GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO | GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO | EDOMÉX DECISIONES FIRMES, RESULTADOS FUERTES. | HIDALGO crece contigo

Programa de gestión para mejorar la CALIDAD DEL AIRE de la Zona Metropolitana del Valle de México



Ehécatl
Dios del viento en la mitología azteca y para otras culturas de Mesoamérica.

"Yo quiero que respiren, tú eres lo único que tienen, por eso eres transparente, para que vean lo que vendrá mañana..

Pablo Neruda

2021-2030

MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

COMISIÓN AMBIENTAL DE LA MEGALÓPOLIS

Citar este documento como:
Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021- 2030). SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH y SEMARNAT. Ciudad de México. Diciembre, 2021.

Primera edición, diciembre 2021.

Impreso y hecho en México.

Este documento se elaboró con recursos del Fideicomiso 1490 "Para Apoyar Los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis".

La reproducción total o parcial de este documento podrá efectuarse mediante autorización expresa de la fuente y dándole el crédito correspondiente.

D.R. © 2021

Directorio

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

María Luisa Albores González	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Tonatiuh Herrera Gutiérrez	Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental
Adolfo Cimadevilla Cervera	Director General de Gestión de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
Daniel López Vicuña	Director de Calidad del Aire

Gobierno de la Ciudad de México

Claudia Sheinbaum Pardo	Jefa de Gobierno de la Ciudad de México
Marina Robles García	Secretaria del Medio Ambiente
Sergio Zirath Hernández Villaseñor	Director General de Calidad del Aire
Patricia Camacho Rodríguez	Directora de Proyectos de Calidad del Aire

Gobierno del Estado de México

Alfredo del Mazo Maza	Gobernador del Estado de México
Jorge Rescala Pérez	Secretario del Medio Ambiente
Carolina García Cañón	Directora General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica
Fátima Ramírez Rodríguez	Coordinadora del Programa Aire Limpio del Valle de Toluca

Gobierno del Estado de Hidalgo

Omar Fayad Meneses	Gobernador del Estado de Hidalgo
Said Javier Estrella García	Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Alma Irays Ramírez Vega	Secretaria Técnica
Ricardo Alberto Pérez Hernández	Subdirector de Mantenimiento de la Calidad del Aire

Comisión Ambiental de la Megalópolis

J. Víctor Hugo Páramo Figueroa	Coordinador Ejecutivo de Vinculación Institucional y de la CAMe
Alejandro Villegas López	Director de Planeación, Sostenibilidad Metropolitana y Vinculación Institucional
Ramiro Barrios Castrejón	Director de Gestión de Calidad del Aire en Zonas Metropolitanas
Gloria Julissa Calva Cruz	Directora de Prevención y Control de la Contaminación Urbana en Zonas Metropolitanas
Luis Fernando Lahud Flores	Director de Coordinación y Vinculación Institucional

Comité Núcleo del ProAire

Adrián Fernández Bremauntz	Director de Iniciativa Climática México
Bárbara Arzate Hernández	JUD de Prevención de Impacto Ambiental de la Alcaldía de Iztapalapa
Carolina García Cañón	Directora General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica de la SMAGEM
Daniel López Vicuña	Director de Calidad del Aire de la SEMARNAT
Erik Hans Solórzano Pedroza	Director de Sustentabilidad de la Alcaldía Cuauhtémoc
Héctor Mayagoitia Domínguez	Responsable de la Coordinación Politécnica para la Sustentabilidad del Instituto Politécnico Nacional
Horacio Riojas Rodríguez	Director de Salud Ambiental, Centro de Investigación en Salud Poblacional. Instituto Nacional de Salud Pública
Jorge Alberto Landeros Sánchez	Municipio de Huixquilucan
J. Víctor Hugo Páramo Figueroa	Coordinador Ejecutivo de la Comisión Ambiental de la Megalópolis
Luis Gerardo Ruiz Suárez	Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Marina Robles García	Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Presidenta)
Oscar Moreno Zúñiga	Subdirector de Comisiones Metropolitanas de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano del Estado de México
Rubén Irvin Rojas Valdés	Investigador del Centro de Investigación y Docencia Económicas
Sergio Z. Hernández Villaseñor	Director General de Calidad del Aire de la SEDEMA (Secretario Técnico)
Stephan Brodziak de los Reyes	El Poder del Consumidor
Telma Gloria Castro Romero	Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México
Víctor Florencio Santes Hernández	Director del Centro de Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional

Elaboración del documento

Edición e integración a cargo del equipo de CAPSUS S.C., con recursos del Fideicomiso Ambiental FIDAM 1490 de la CAMe:

Antares Velázquez Rivera (diseño)
Dante Zayas Mendoza
Guillermo Velasco Rodríguez
Renata Rocha Ojeda
Sebastián Reyes de la Lanza

Se agradece a la SEDEMA, Ricardo García Ruiz, Carmen Valdez Berriozábal, Guillermo Velasco Rodríguez y María Blanco Solana por el apoyo brindando material fotográfico para esta publicación.

Se agradece también el apoyo de otros miembros del equipo de CAPSUS S.C., en específico a María Blanco Solana, Paola Cymet Monroy, Raúl Saucedo Ortiz, Ricardo García Ruiz, y colaboradores externos, Jorge Macías y Roberto de la Maza.

Para el desarrollo del documento, fueron clave los insumos técnicos y las revisiones por parte del equipo de la SEDEMA de la Ciudad de México:

Mónica del Carmen Jaimes Palomera
Olivia Rivera Hernández
Patricia Camacho Rodríguez
Petra Paz Ramírez
Saira Mendoza Pelcastre
Stephanie Montero Bending
Verónica Diego Santos
Yadira Reyes Aguilar

Se agradece también el apoyo del Equipo de Inventario de Emisiones de la SEDEMA.

Se agradece la valiosa colaboración de las siguientes instituciones gubernamentales, así como a todas las partes que proporcionaron información y retroalimentación para la elaboración de este documento:

Alcaldía Álvaro Obregón
Alcaldía Magdalena Contreras
Alcaldía Miguel Hidalgo

Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos

Asociación Interamericana para la Defensa del Medio Ambiente

Centro Mexicano de Derecho Ambiental

Centro de Investigación y Docencia Económicas

Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente

Grupo de Liderazgo Climático C40

Consejo Internacional del Transporte Limpio

El Poder del Consumidor

MCE2 Molina Center for Energy and Environmental

Iniciativa Climática de México

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias

Instituto Nacional de Salud Pública

Instituto Mexicano del Petróleo

Instituto Politécnico Nacional

Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos, México

Petróleos Mexicanos

Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México

Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Ciudad de México

Secretaría de las Mujeres de la Ciudad de México

Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México

Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México

Secretaría de Salud de la Ciudad de México

Sistema de Aguas de la Ciudad de México

Subsecretaría de Coordinación Metropolitana y Enlace Gubernamental de la Ciudad de México

Representantes de los sectores académico, de investigación, público y privado que participaron en los talleres de consulta

Tabla de **contenidos**

14 **Siglas y símbolos**
23 **Presentación**
28 **Resumen ejecutivo**
37 **Antecedentes**
40 **Introducción**
42 **Justificación**

44 **Capítulo 1.Descripción de la zona de estudio**
47 1.1 Delimitación geográfica
49 1.2 Aspectos físicos
49 1.2.1 Relieve
51 1.2.2 Hidrografía
54 1.2.3 Clima
63 1.2.4 Suelos
71 1.2.5 Áreas naturales protegidas
73 1.3 Cuenca atmosférica de la ZMVM
76 1.4 Aspectos socioeconómicos
76 1.4.1 Demografía
86 1.4.2 Actividad económica
93 1.5 Estructura urbana
93 1.5.1 Patrones de desarrollo y organización urbana
95 1.5.2 Movilidad, transporte y vías de comunicación
106 1.5.3 Disposición final de Residuos Sólidos Urbanos
107 1.5.4 Gobernanza y planeación urbana
108 1.6 Estructura institucional

112 **Capítulo 2. Fundamento Jurídico y Marco Normativo**
116 2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
117 2.2 Marco jurídico internacional
117 2.2.1 Calidad del aire y derechos humanos

121 2.2.2 Instrumentos Internacionales relativos a la calidad del aire
122 2.2.3 Agenda 2030
124 2.2.4 Acuerdos bilaterales y multilaterales celebrados por México en materia de calidad del aire
126 2.3 Legislación Federal
126 2.3.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
130 2.3.2 Ley General de Cambio Climático
130 2.3.3 Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos
131 2.3.4 Convenio de Coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental de la Megalópolis
131 2.3.5 Reglamento Interior de la SEMARNAT
132 2.3.6 Normas Oficiales Mexicanas
132 2.3.7 Estrategia Nacional de Calidad del Aire y programas de gestión federales
133 2.4 Legislación Estatal
133 2.4.1 Ciudad de México
137 2.4.2 Estado de México
142 2.4.3 Estado de Hidalgo

144 Capítulo 3. Diagnóstico de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México

148 3.1 Características de los contaminantes atmosféricos
154 3.2 Sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT)
157 3.2.1 La calidad de los datos que genera el SIMAT
158 3.2.2 Sistema de pronóstico de la calidad del aire
159 3.3 Indicadores de calidad del aire
160 3.3.1 Límites permisibles y normas de salud ambiental
162 3.3.2 Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud
163 3.3.3 Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud
163 3.4 Diagnóstico de la calidad del aire

164 3.4.1 Dióxido de azufre
167 3.4.2 Óxidos de nitrógeno
172 3.4.3 Monóxido de carbono
174 3.4.4 Ozono
178 3.4.5 Partículas suspendidas
185 3.4.6 Tendencia histórica de calidad del aire
187 3.4.7 Calidad del aire en el Estado de Hidalgo
189 3.5 Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas
189 3.5.1 Revisión histórica del Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas
193 3.6 Eventos extraordinarios de calidad del aire
193 3.6.1 Incendios de mayo de 2019
195 3.6.2 Pandemia causada por SARS-CoV2 (COVID-19)
199 3.7 Evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020
199 3.7.1 Avances en la implementación de acciones del ProAire ZMVM 2011-2020
202 3.7.2 Reducción de emisiones contaminantes
204 3.7.3 Mejoras en la calidad del aire
208 3.7.4 Lecciones aprendidas
210 3.8 Evidencia científica reciente sobre calidad del aire y química atmosférica en la ZMVM

218 Capítulo 4. El impacto del cambio climático en la calidad del aire de la zona metropolitana del Valle de México

222 4.1 El cambio climático y sus efectos
222 4.1.1 Calentamiento global y sus efectos en el medio ambiente
223 4.1.2 Impacto del cambio climático en la calidad del aire
226 4.1.3 Proyecciones de cambio climático a futuro
227 4.2 Cambio climático en la Zona Metropolitana del Valle de México
228 4.2.1 Aumento de la temperatura
230 4.2.2 Variación en los patrones de precipitación
232 4.2.3 Impactos económicos y sociales

234 4.3 Impacto del cambio climático en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México

238 4.4 Conclusiones

240 Capítulo 5. Inventario de emisiones de la zona metropolitana del Valle de México

244 5.1 Alcance del Inventario de Emisiones 2018

245 5.1.1 Matriz energética

246 5.2 Emisiones de contaminantes criterio y precursores de ozono

247 5.2.1 Partículas suspendidas

249 5.2.2 Precursores de ozono

252 5.3 Emisiones de contaminantes tóxicos

253 5.4 Emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero

256 5.5 Emisiones externas

257 5.5.1 Corredor industrial Tula-Vito-Apasco

258 5.5.2 Actividad volcánica

260 Capítulo 6. Salud pública y calidad del aire

265 6.1 Factores sociodemográficos y condicionantes de la salud

265 6.1.1 Grupos de población vulnerables

275 6.1.2 Morbilidad y mortalidad general en la Zona Metropolitana del Valle de México

278 6.2 Efectos de la contaminación del aire en la salud humana

269 6.2.1 Efectos del dióxido de azufre

280 6.2.2 Efectos de los óxidos de nitrógeno

281 6.2.3 Efectos del monóxido de carbono

281 6.2.4 Efectos del ozono

283 6.2.5 Efectos de las partículas suspendidas

287 6.2.6 Efectos de los compuestos orgánicos volátiles

288 6.2.7 Relación entre la mala calidad del aire y enfermedades infecciosas

289 6.2.8 Impactos del cambio climático en la calidad del aire y la salud humana

290 6.3 Evidencia epidemiológica

291 6.3.1 Evidencia epidemiológica a largo plazo (estudios de cohorte y meta-análisis)

297 6.3.2 Evidencia epidemiológica a corto plazo (estudios de series de tiempo)

301 6.4 Evaluaciones de Impactos a la Salud

301 6.4.1 Metodología para estimar impactos a la salud derivados de mejoras en la calidad del aire

303 6.4.2 Resultados de Evaluaciones de Impactos a la Salud en la ZMVM

316 6.4.3 Beneficios sociales derivados de mejoras en la calidad el aire

316 6.5 Estrategias y acciones institucionales en materia de calidad del aire y salud pública

318 Capítulo 7. Estrategias, medidas y acciones de gestión de la calidad del aire y reducción de emisiones

322 7.1 Objetivos y metas del ProAire

322 7.1.1 Objetivo general

323 7.1.2 Objetivos específicos y metas de reducción de emisiones

324 7.2 Contexto

325 7.3 Estrategia para la definición de medidas del ProAire

327 7.4 Medidas y acciones

370 7.5 Costos y beneficios de la implementación del ProAire

370 7.5.1 Reducciones en emisiones

374 7.5.2 Costo de implementación

375 7.5.3 Beneficios en la calidad del aire y salud

381 7.6 Agenda regulatoria

384 Capítulo 8. Comunicación y participación ciudadana

389 8.1 Percepción ciudadana de la calidad del aire

397 8.2 Principales procesos y canales de comunicación

399 8.3 Participación e involucramiento de la ciudadanía en el desarrollo e implementación del ProAire

399 8.3.1 Procesos participativos para la elaboración del ProAire ZMVM 2021-2030
401 8.3.2 Participación intersectorial para la gestión de la calidad del aire
403 8.4 Estrategia de Comunicación y Participación Ciudadana
403 8.4.1 Eje A. Protección de la salud pública
415 8.4.2 Eje B. Participación ciudadana para disminuir emisiones contaminantes
420 8.4.3 Observaciones para el desarrollo e implementación de la Estrategia Integral de Comunicación

422 Capítulo 9. Financiamiento para mejorar la calidad del aire
428 9.1 Principios de la Estrategia Integral de Financiamiento
430 9.2 Financiamiento municipal, estatal y federal
430 9.2.1 Presupuestos públicos
431 9.2.2 Generación de recursos
432 9.2.3 Fuentes de financiamiento locales
433 9.2.4 Fuentes de financiamiento nacionales
435 9.3 Participación del sector privado, académico y social
435 9.3.1 Inversión de particulares a través de la acción pública
436 9.3.2 Financiamiento privado, académico y social
438 9.4 Colaboración internacional
439 9.4.1 Financiamiento multilateral
441 9.4.2 Financiamiento bilateral

446 Capítulo 10. Seguimiento, monitoreo y evaluación
450 10.1 Principios de la Estrategia de Seguimiento y Evaluación
450 10.1.1 Metodología del Marco Lógico
451 10.1.2 Principios de la Estrategia de Seguimiento y Evaluación
452 10.2 Estrategia de Seguimiento y Evaluación del ProAire
454 10.2.1 Actores clave
456 10.2.2 Herramientas para el seguimiento y evaluación
457 10.2.3 Proceso de seguimiento y mejora continua

460 10.2.4 Metodología de evaluación periódica
462 10.2.5 Digitalización para el seguimiento y evaluación del ProAire
464 10.3 Retos para el seguimiento y evaluación del ProAire
464 10.3.1 Limitaciones y retos para un efectivo seguimiento y monitoreo
465 10.3.2 Mecanismo de cumplimiento

466 Capítulo 11. Implementación
470 11.1 Cronograma general de implementación
474 11.2 Roles y responsabilidades
476 11.3 Barreras de implementación
476 11.3.1 Barreras presupuestales
478 11.3.2 Barreras económicas
478 11.3.3 Barreras sociales
479 11.3.4 Barreras políticas
479 11.3.5 Barreras institucionales
480 11.3.6 Barreras operativas
480 11.3.7 Barreras del sector involucrado
481 11.3.8 Barreras tecnológicas

482 Capítulo 12 Conclusiones

494 Fuentes de información

Siglas y **símbolos**

Siglas y acrónimos

ADIP	Agencia Digital de Innovación Pública de la Ciudad de México
AICM	Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México
ANP	Área Natural Protegida
APS	Agencia de Protección Sanitaria de la Ciudad de México
AQFS-Mex	Sistema de Pronóstico de la Calidad del Aire de la Ciudad de México (en inglés, *Air Quality Forecasting System*)
ASEA	Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos
AVU	Áreas Verdes Urbanas
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BRT	Autobús de Tránsito Rápido (en inglés, Bus Rapid Transit)
BSC	Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (en inglés, Barcelona Supercomputing Center)
BTX	Benceno, Tolueno y Xilenos
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM
CDMX	Ciudad de México
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CEND	Coordinación de Estrategia Digital Nacional
CEPAL	Comisión Económica de América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas
CEPANAF	Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna del Estado de México
CETRAM	Centros de transferencia modal
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CICA	Centro de Información de la Calidad del Aire
CMM	Centro Mario Molina
COA	Cédula de Operación Anual
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios

Siglas y acrónimos

COI	Cédula de Operación Integral
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
CONAPO	Consejo Nacional de Población
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
COVID-19	Enfermedad por Coronavirus
CPBEM	Código para la Biodiversidad del Estado de México
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DENUE	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas
EdoMex	Estado de México
EIC	Estrategia Integral de Comunicación
EIF	Estrategia Integral de Financiamiento
EIS	Evaluaciones de Impactos a la Salud
ELAC	Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México
ENCA	Estrategia Nacional de Calidad del Aire
ENOS	El Niño – Oscilación del Sur
EOD	Encuesta Origen Destino
EPOC	Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica
ESE	Estrategia de Seguimiento y Evaluación
FCR	Función concentración – respuesta
FIDAM	Fideicomiso Ambiental 1490 “Para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis”
Gas L.P.	Gas Licuado de Petróleo
GCA	Guía de Calidad del Aire
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GyCEI	Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (también CyGEI)
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Siglas y acrónimos

HCNQ	Hidrocarburos No Quemados
HNC	Programa Hoy No Circula
IEECC	Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático del Estado de México
IGECEM	Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IRA	Infecciones Respiratorias Agudas
IRPS	Índice de Riesgo para Personas Susceptibles
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental
LAPTDF	Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal
LAU-CDMX	Licencia Ambiental Única para la Ciudad de México
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LMP	Límite Máximo Permisible
LPAEH	Ley para la Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo (LPAEH)
MB	Metrobús
MML	Metodología del Marco Lógico
m s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (en inglés, National Aeronautics and Space Administration)
NOM	Norma Oficial Mexicana
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONG	Organización no gubernamental

Siglas y acrónimos

ONU	Organización de las Naciones Unidas
PACCM	Programa de Acción Climática de la Ciudad de México
PBT	Peso bruto vehicular
PAOT	Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México
PCAA	Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PGD	Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México
PGEEE	Plantas Generadoras de Energía Eléctrica de Emergencia
PIB	Producto Interno Bruto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PPRECAA	Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas
PROBOSQUE	Protectora de Bosques del Estado de México
PROESPA	Procuraduría Estatal de Protección al Ambiente de Hidalgo
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
PROPAEM	Procuraduría de Protección al Ambiente del Estado de México
PVVO	Programa de Verificación Vehicular Obligatorio
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMA	Red Manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
RHA	Región Hidrológico-Administrativa
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RTP	Red de Transporte de Pasajeros
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SAF	Secretaría de Administración y Finanzas de la Ciudad de México
SAT	Servicio de Administración Tributaria

Siglas y acrónimos

SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SDF	Sitio de Disposición Final
SE	Secretaría de Economía
SECTEI	Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México
SECTUR	Secretaría de Turismo
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SEDECO	Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SEDESA	Secretaría de Salud de la Ciudad de México
SEDUC	Secretaría de Educación del Estado de México
SEDUO	Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Estado de México
SEDUVI	Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Ciudad de México
SEFIN	Secretaría de Finanzas del Estado de México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEMARNATH	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo
SEMOV	Secretaría de Movilidad del Estado de México
SEMOVI	Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México
SENER	Secretaría de Energía
SEP	Secretaría de Educación Pública
SFP	Secretaría de la Función Pública
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
SIVEESCA	Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Efectos a la Salud relacionados con la Contaminación Atmosférica
SMAGEM	Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SOA	Aerosol Orgánico Secundario, por sus siglas en inglés (en inglés, *Secondary Organic Aerosol*)

Siglas y acrónimos

SOBSE	Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México
SRV	Sistemas de Recuperación de Vapores
SS	Secretaría de Salud
SSC	Secretaría de Seguridad Ciudadana de la Ciudad de México
SSP	Servicios de Salud Públicos de la Ciudad de México
STC Metro	Sistema de Transporte Colectivo Metro
STE	Servicio de Transportes Eléctricos
STPS	Secretaría del Trabajo y Previsión Social
SUV	Vehículo utilitario deportivo (en inglés, *Sport Utility Vehicle*)
TMCA	Tasa Media de Crecimiento Anual
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
UV	Ultravioleta
VSL	Valor de una Vida Estadística
ZBE	Zona de Bajas Emisiones
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Unidades

h	Hora
ha	Hectárea
J	Joule o julio
km²	Kilómetro cuadrado
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
MJ	Megajoule o megajulio
mm	Milímetro
mmHg	Milímetros de mercurio
PJ	Petajoule o petajulio
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
ppt	Partes por trillón
s	Segundo
t	Tonelada
W	Watt o vatio
µg	Microgramo
µm	Micrómetro
ºC	Grado Celsius o centígrado

Sustancias, Compuestos y mezclas químicas

BTX	Benceno, Tolueno e Isómeros de Xileno
CH_4	Metano
CN	Carbono negro
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
CO_2eq	Dióxido de carbono equivalente
COV	Compuestos orgánicos volátiles
HNO_3	Ácido nítrico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
NH_3	Amoniaco
N_2O	Óxido nitroso
NO	Óxido nítrico
NO_2	Dióxido de nitrógeno
NO_X	Óxidos de nitrógeno
O_3	Ozono
Pb	Plomo
PM_{10}	Partículas con diámetro aero-dinámico igual o menor a 10 µm
$PM_{2.5}$	Partículas con diámetro aero-dinámico igual o menor a 2.5 µm
$PM_{0.1}$	Partículas con diámetro aero-dinámico igual o menor a 0.1 µm (ultrafinas)
PST	Partículas suspendidas totales
SO_2	Dióxido de azufre
HFC	Hidrofluorocarbonos

MENSAJE DE LA **AUTORIDAD FEDERAL**

PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

María Luisa Albores González
Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es la metrópoli con la mayor población en el país y una de las diez más grandes del mundo, en donde interactúan personas con una valiosa diversidad cultural que desarrollan múltiples actividades sociales, económicas y educativas que la posicionan como un área de interés nacional, tanto por las oportunidades que ofrece, como por los retos que implica, siendo la calidad ambiental uno de los más importantes y urgentes que la región tiene por delante.

En la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) estamos convencidos de que garantizar el derecho a un medio ambiente sano, incluido un aire limpio, es una condición primordial para asegurar un desarrollo sustentable de la mano de la justicia social y el equilibrio ecológico.

Esta coyuntura exige la intervención de todos los actores de la sociedad, desde los tres órdenes de gobierno, el sector privado, social y académico, hasta las propias comunidades, pues sólo coadyuvando entre todos se logrará generar la consciencia necesaria para elaborar e implementar las acciones para alcanzar un medio ambiente sano y limpio.

Por lo anterior, la SEMARNAT, en coordinación con el Estado de México, el Estado de Hidalgo y la Ciudad de México, trabaja activamente para mejorar la calidad del aire de la ZMVM a corto, mediano y largo plazo. En los próximos años, este esfuerzo común entre el sector público, el privado y el social será guiado por el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030 (ProAire), que contiene estrategias y acciones diseñadas en consenso con la sociedad y con la academia, para lograr una mejor calidad de aire en la región.

Este ProAire es el tercer programa en su tipo que abarca toda la metrópoli y plantea el camino a seguir para lograr un aire más limpio por los próximos 9 años. Así como otros programas impulsados por el Gobierno de la Cuarta Transformación, este ProAire tiene como objetivo principal proteger a la comunidad y a los sectores más vulnerables de los efectos adversos que la contaminación atmosférica causa en su salud y bienestar.

Las estrategias más relevantes de este documento están dirigidas a reducir las emisiones de sectores contaminantes, como el transporte particular y las industrias; además de impulsar el conocimiento académico en la materia, la participación ciudadana, la comunicación y la educación.

Si bien el ProAire es un instrumento de gestión para revertir las tendencias del deterioro de la calidad del aire, su carácter no sólo es de tipo correctivo, ya que cuenta con un fuerte componente de acciones preventivas, que apuesta por la generación de conocimientos y habilidades ambientales desde lo individual a lo colectivo y permitirán conducirnos al origen de este problema ambiental, lo que también nos llevará a reducir su incidencia en el futuro.

En el proceso de elaboración de las estrategias alrededor de este Programa, se buscó establecer un número limitado de medidas contundentes, con la finalidad de dirigir la acción pública en actividades de alto beneficio social para las personas, sus familias y sus comunidades.

La SEMARNAT reitera su compromiso de implementar políticas ambientales que impacten positivamente en el territorio, en el patrimonio natural y en la vida de todas y todos los mexicanos, con miras a lograr un medio ambiente en armonía con nuestra madre tierra.

En el Gobierno de México tenemos la convicción de que el medio ambiente no sólo es el lugar que habitamos, sino también es nuestra fuente de vida y el espacio que permita crear mejores realidades y proyectos de vida para nuestros hijos y las generaciones venideras.

Mensaje de la **Ciudad de México**

PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

Claudia Sheinbaum Pardo
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

La Ciudad de México y su zona metropolitana representan uno de los principales motores del desarrollo económico del país. Generan la mayor cantidad de bienes y servicios y, si bien presenta oportunidades de crecimiento y desarrollo, también tiene retos para que ese desarrollo sea bajo las mejores condiciones de bienestar y calidad de vida de todas las personas que aquí habitamos.

Nuestra ciudad ha enfrentado varias crisis, algunas de ellas agudas como los terremotos y pandemias, y otros problemas crónicos como la degradación ambiental, donde la calidad del aire ha sido la más evidente y preocupante por sus efectos directos en la salud humana.

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030 (ProAire ZMVM) se presenta en un contexto de transformación de la ciudad, donde nuestro mayor propósito es proteger la salud pública de quienes vivimos, trabajamos, estudiamos y disfrutamos de esta urbe. En el mismo sentido que el Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México, este ProAire ZMVM confluye con la necesidad de establecer políticas públicas de largo alcance y de gran coordinación entre los distintos sectores y actores sociales.

Se articula con otros programas de la Ciudad de México para reducir emisiones de contaminantes atmosféricos locales y las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, como evidencia clara del compromiso que tenemos con el mundo por disminuir las emisiones de gases y compuestos causantes del cambio climático global.

El esfuerzo es conjunto con las entidades vecinas de la Ciudad de México, conscientes de que un reto de esta envergadura, sólo se alcanza bajo una lógica de trabajo común y coordinado.

La visión de este Proaire ZMVM tiene como referente las aspiraciones colectivas para los próximos 9 años. En él se sigue un esquema de planeación que busca garantizar el derecho a la ciudad, hacer efectiva su función social, económica, cultural, territorial y ambiental, y orientarse al ejercicio progresivo de los derechos, a la prosperidad y la funcionalidad de la urbe.

El Programa presenta estrategias que incorporan el sentido de transformación social e institucional que demanda una experiencia como la que hemos vivido con la pandemia del coronavirus; una nueva normalidad que debe llevarnos a cambios profundos, de gran compromiso y solidaridad. Estamos claros que la pandemia es parte de una crisis múltiple, que nos coloca ante la prioridad de proteger la salud pública, y de favorecer políticas costo-efectivas que logren resultados en el corto y largo plazo.

En esta nueva transformación de la Ciudad, nos hemos propuesto y trabajamos con un modelo que busca el reequilibrio de las condiciones ambientales y sociales, claros de que, sólo así es posible una ciudad sustentable: con un ordenamiento territorial adecuado, un transporte público eficiente, seguro y limpio, y la ampliación de áreas verdes y espacios públicos.

En su condición de capital de la República, la Ciudad seguirá recibiendo a quienes la elijan para vivir, estudiar, trabajar y pasear, y por ello este Programa identifica y asume los retos diversos que enfrenta la metrópoli, reconociendo su complejidad y magnitud, y entendiendo también que es posible solucionarlos con un esfuerzo sostenido y con la participación de todos los sectores de la sociedad.

La Ciudad de México dispone de conocimientos y de personas preparadas en todas sus áreas críticas, cuenta con instituciones de investigación y con universidades de alta calidad, y está en condiciones de acelerar los procesos de cambio para superar sus problemas ambientales y enfilarse hacia una nueva ciudad: innovadora y de derechos; una ciudad sustentable, vivible y amable para todas las personas.

Los objetivos y metas del ProAire ZMVM se evaluarán periódicamente y buscaremos la mayor articulación y difusión con otras entidades del país para que recorran y solucionen con más facilidad y velocidad los problemas que también están presentándose en ellas.

En el seguimiento y evaluación de este Programa estará garantizada la participación ciudadana y la difusión de resultados de su aplicación, como parte de nuestro compromiso con la transparencia y para hacer más evidente que una Ciudad Sustentable, sólo es posible con un gobierno honesto, cercano y de buena administración y con una sociedad comprometida con su futuro.

MENSAJE DEL
ESTADO DE MÉXICO
PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

Alfredo Del Mazo Maza
Gobernador Constitucional del Estado de México

En la última década hemos avanzado con firmeza y decisión en la resolución de nuestras problemáticas ambientales de nuestra región. Sin embargo, los retos continúan y la urgencia por atender las problemáticas ambientales se mantiene.

El mejoramiento de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México representa uno de los retos más importantes en materia ambiental. Por ello, comprometidos con la protección de la salud de los habitantes de esta importante zona, los Gobiernos Federal, de la Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo trabajaron de manera coordinada en la elaboración del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030, ProAire, el cual marcará la ruta para sortear los desafíos ambientales que enfrentará nuestra región durante la siguiente década.

Este Programa presenta una investigación extensa sobre las condiciones atmosféricas, económicas, sociales y urbanas que vivimos más de 20 millones de habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México, así como un estudio detallado sobre los efectos de la calidad del aire en la salud pública.

A través de 19 medidas, 40 acciones y 125 actividades orientadas a prevenir, controlar y reducir las emisiones contaminantes, atendemos integralmente temas transversales que fortalecen la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos, la participación ciudadana, los arreglos institucionales, el seguimiento y coordinación metropolitana, el monitoreo atmosférico y la investigación científica.

Cabe destacar que el Estado de México lleva ya un camino avanzado gracias a los compromisos cumplidos del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de México 2018-2030, el cual fue presentado en enero de 2019. Este programa cuenta con la participación de los 125 municipios que conforman la entidad, así como de diversas instancias gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil y la academia.

Con la implementación del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030, nuestra entidad reafirma su compromiso para trabajar por días más claros, limpios y saludables para los mexiquenses y los habitantes de la zona centro del país.

MENSAJE DEL
ESTADO DE HIDALGO
PROAIRE ZMVM 2021 A 2030

Omar Fayad Meneses
Gobernador Constitucional del Estado de Hidalgo

En el Gobierno del Estado de Hidalgo estamos conscientes de que uno de los principales problemas ambientales y de salud pública que aquejan no solo a nuestro estado sino al mundo entero es la contaminación del aire.

Hidalgo cuenta con corredores industriales esenciales para el desarrollo económico del país que albergan industrias de energía eléctrica y de combustibles, además de actividades comerciales, de servicios y de transporte. Pero todas estas actividades impactan también en la calidad del aire que respiramos en todo el Valle de México. Este es un problema que nos afecta aquí en Hidalgo y en el resto del país. De hecho es uno de los más grandes desafíos globales que hoy enfrenta la humanidad.

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM) 2021-2030, es la estrategia conjunta que los tres órdenes de gobierno, la academia, la iniciativa privada y la sociedad organizada planteamos para poder enfrentar este enorme reto.

En este importante documento se establecen estrategias y medidas que buscan una mejora ambiental. El éxito de las acciones propuestas en esta iniciativa dependerá de la responsabilidad que asumamos todos.

De esta manera Hidalgo reafirma su compromiso con la protección ambiental y se une al esfuerzo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Federal, la Comisión Ambiental de la Megalópolis, el Gobierno del Estado de México y al Gobierno de la Ciudad de México, en beneficio de todos nuestros ciudadanos.

Para mi gobierno cuidar nuestro medio ambiente ha sido y sigue siendo una prioridad. Todos los seres humanos tenemos que hacer nuestra parte para cuidar y salvar nuestro planeta que es nuestra casa, la de nuestros hijos, nietos y de toda la humanidad.

Resumen **ejecutivo**

Históricamente, una de las principales problemáticas ambientales en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) ha sido la contaminación atmosférica. Inclusive, a inicios de los noventa, la Ciudad de México y su zona conurbada fueron clasificadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la ciudad con la peor calidad del aire a nivel mundial (OMS, 1992).

En la región, que está integrada por las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, habita el 17% de la población del país y se genera el 22% del producto interno bruto nacional. El crecimiento de la población, la estructura urbana dispersa, distante y desconectada, y los patrones no sostenible de producción, consumo y movilidad son la principal causa de la emisión de contaminantes atmosféricos, los cuales afectan a la salud de la población.

Para atender esta problemática, desde la década de los 90, las autoridades locales y federales han implementado exitosamente distintas estrategias para limitar las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire. Estas políticas, que se centraron principalmente en limitar las emisiones de fuentes móviles e industriales a través de cambios tecnológicos y regulatorios, impulsaron una mejora continua en la calidad del aire. Las concentraciones atmosféricas de todos lo contaminantes mostraron reducciones significativas y, actualmente, solo el ozono (O_3) y las partículas suspendidas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$) superan los límites normados, en tanto que el dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO) y el plomo se mantiene por debajo de los umbrales permisibles. No obstante, también se detecta una desaceleración en la tasa de mejora, sin tendencias a la baja perceptibles en las concentraciones de estos contaminantes en la última década. Aun así, los resultados son interesantes, puesto que se ha limitado la contaminación a pesar del crecimiento poblacional y la expansión del área urbana.

La complejidad de la gestión de la calidad del aire se debe en parte a que el clima y la orografía de la ZMVM favorecen de forma natural la acumulación de los contaminantes en el aire. Por ejemplo, la contaminación por partículas es más intensa en los meses de invierno, cuando las bajas temperaturas y las inversiones térmicas evitan la dispersión de la contaminación. Por su parte, la temporada de O_3 comienza en febrero y termina en junio; en esta época del año, la intensa radiación solar acelera las reacciones entre los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), que derivan en la formación de O_3. Además, los cambios en el sistema climático derivados del aumento en la concentración de gases y contaminantes de efecto invernadero pueden tener una penalización sobre los niveles de contaminación, incrementando la concentración de O_3 y $PM_{2.5}$ independientemente de los niveles en emisiones.

De acuerdo con el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018, en ese año se emitieron más de 34 mil y 16 mil toneladas de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente. Las primeras provienen principalmente del sector transporte (39.6%), el tránsito sobre vialidades (24.4%), la labranza y cosecha (7.6%), y la quema a cielo abierto de residuos (5.4%). Las $PM_{2.5}$ se generan en su mayoría por el transporte (43.0%), donde los vehículos pesados a diésel tienen la mayor contribución. Las fuentes de área (35.8%) también tienen una fuerte incidencia en el nivel de partículas $PM_{2.5}$ emitidas, particularmente por la quema a cielo abierto de residuos, el tránsito sobre vialidades y la labranza y la cosecha.

En 2018 se emitieron 413 mil toneladas de COV y 144 mil toneladas de NO_x. Los NO_x provienen en su mayoría del transporte (85.8%), mientras que los COV son emitidos por diversas actividades

como el uso comercial y doméstico de solventes (31.6%), las fugas en instalaciones de gas L.P. (20.0%) y el sector transporte (22.2%). La formación de O_3 a partir de estos dos precursores es compleja; investigaciones recientes sugieren que, en el área urbana de la ZMVM, la producción de O_3 es sensible a los COV. Por ello, las políticas de control de contaminantes locales deben enfocarse en las fuentes que generan este tipo de compuestos, ya que solo reducir los NO_x no causará cambios significativos o incluso podría detonar aumentos en la concentración de O_3. Ejemplo de esto es lo observado durante la pandemia por COVID-19, cuando las restricciones en la movilidad redujeron el tráfico vehicular en hasta 60%; si bien la concentración promedio de NO_x disminuyó en 44%, los niveles de O_3 incrementaron en 11% respecto de años anteriores.

A estos fenómenos se suma el impacto negativo que tienen algunas fuentes de emisión externas a la ZMVM, como las del sector energético y el petroquímico en la región de Tula, Hidalgo, que en conjunto producen 45 veces más SO_2 que toda la ZMVM, contaminante que puede ser transportado hacia la metrópoli. Asimismo, las tolvaneras y los incendios forestales pueden generar emisiones elevadas que afectan a la calidad del aire local, aun cuando estos fenómenos ocurren en estados aledaños. Cuando estas emisiones inusuales se combinan con condiciones meteorológicas adversas, se pueden presentar eventos extraordinarios y transitorios con concentraciones elevadas de contaminación en la ZMVM, comúnmente denominados contingencias ambientales atmosféricas.

Reducir las emisiones de partículas y precursores de O_3 es prioritario, puesto que estos contaminantes generan impactos en la salud de la población. La mala calidad del aire incrementa la tasa de incidencia y la mortalidad asociada a cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias, cardiovasculares y metabólicas. Distintos estudios estiman que, en la ZMVM, se podrían evitar más de 6 mil 500 muertes anuales en caso de cumplir con los límites normados para partículas $PM_{2.5}$ y O_3 (INSP & INECC, 2017; Trejo-González *et al*., 2019). Alrededor del 90% de estos beneficios se asocian a la contaminación por $PM_{2.5}$, contaminante que ocasiona los impactos a la salud más severos. Se destaca que evitar estas defunciones se traduciría en beneficios económicos que ascienden a 130 mil millones de pesos a precios de 2018. Además, el resto de los contaminantes atmosféricos también generan impactos negativos en la salud de la población; por ejemplo, algunos COV son altamente tóxicos y/o carcinogénicos, aunque su concentración en el aire ambiente aún no se regula a nivel nacional.

Resulta igualmente relevante garantizar una adecuada comunicación de los riesgos asociados a la contaminación atmosférica. Es necesario informar a la población sobre el estado de la calidad del aire, para que las personas implementen acciones que reduzcan su exposición en función de sus condiciones de vulnerabilidad, que dependen de factores biológicos como la edad y el sexo, así como condiciones sociales o de conducta. Algunos grupos de interés por su nivel de vulnerabilidad a los efectos de la mala calidad del aire son las niñas y niños, personas adultas mayores, embarazadas y la población con condiciones médicas preexistentes o prevalencia de enfermedades crónicas. También se consideran como factores que inciden en la vulnerabilidad el estatus socioeconómico, el nivel de actividad física en exteriores, el modo predominante de transporte utilizado, el lugar de residencia, la profesión ejercida y los roles de género, variables que determinan el grado de exposición a los contaminantes. Además, los esfuerzos de comunicación de riesgos se deben intensificar durante episodios de contaminación severa, como sucede durante las contingencias ambientales atmosféricas, durante las cuales también se limitan las emisiones de fuentes específicas para evitar que la situación continúe empeorando.

El diagnóstico de la situación actual y una serie de procesos participativos con actores relevantes permitió diseñar el Programa de Gestión de Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021 – 2030 (ProAire ZMVM 2021-2030). El presente instrumento establece metas, medidas y acciones con el objetivo de reducir las emisiones a la atmósfera de contaminantes atmosféricos, así como gases y compuestos de efecto invernadero, para mejorar la calidad del aire que respiran los habitantes de la región y proteger su salud, además de coadyuvar en la mitigación del cambio climático. En total, se cuenta con una cartera de 19 medidas, 40 acciones y 126 actividades orientadas a prevenir, controlar y reducir las emisiones de fuentes prioritarias, al mismo tiempo que se atienden temas transversales que fortalecen la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos y participación ciudadana, los arreglos institucionales, el seguimiento y coordinación metropolitana, el monitoreo atmosférico y la investigación científica. En específico, las medidas del ProAire se centran en:

- Incrementar el uso de tecnologías más limpias y reforzar la normatividad para reducir las emisiones en el sector transporte.
- Administrar la demanda del transporte individual, para reducir el número de viajes, las distancias recorridas y los tiempos de traslado.
- Ampliar el uso de modos de transporte masivos y de bajas emisiones, y promover un desarrollo urbano sostenible.
- Extender el uso de combustibles fósiles más limpios (menor volatilidad y contenido de azufre) tanto para el transporte como para la industria.
- Modificar la normatividad para reducir las emisiones industriales, así como aplicar esquemas de auditoría y vigilancia para controlar las emisiones en industrias prioritarias (siderúrgica, del aluminio, del vidrio y la generación electricidad).
- Reducir el uso de gas L.P. y las fugas asociadas en distintas etapas de la cadena de suministro y consumo.
- Limitar el contenido de COV en productos de uso cosmético, doméstico, industrial, comercial y de servicios.
- Atender la emisión de partículas fugitivas por el tránsito en vialidades, actividades de labranza y cosecha y por la erosión eólica, a través del barrido húmedo y el mantenimiento de vialidades, buenas prácticas agrícolas y programas de reforestación, respectivamente.
- Mejorar la gestión de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales.
- Mejorar el manejo del fuego y la capacidad para combatir incendios forestales.
- Limitar la contaminación por SO_2 en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco.
- Procurar la promoción de la salud entre la sociedad y reducir la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos.
- Mejorar el monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM.
- Generar conocimiento científico para mejorar la gestión de la calidad del aire y la salud de la población.

Se estima que la implementación de las medidas del ProAire permitirá reducir, en promedio, entre 20% y 25% de la contaminación atmosférica al año 2030. En cuanto a los contaminantes prioritarios, las reducciones en emisiones ascienden a más del 20% de las PM_{10}, 35% de $PM_{2.5}$, 35% de NO_X y 20% de COV respecto de un escenario tendencial al año 2030. Estos beneficios se alinean con el objetivo a largo plazo de alcanzar los estándares de la OMS de calidad del aire durante dos terceras partes del año para el 2040.

El costo aproximado de la implementación de las medidas es de $280.71 mil millones de pesos mexicanos a precios de 2021. En cuanto a los beneficios en calidad del aire por la reducción de emisiones, se determinó que con la aplicación y cumplimiento de las medidas del ProAire los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ serían ~22% (~4 $\mu g/m^3$) menores en el promedio anual de 24 horas en toda la ZMVM. Así mismo, se reducirían los niveles de concentración promedio diaria de O_3 en ~2% (~3 ppb) y, si se considera el valor máximo horario de ozono, se presentaría una reducción de hasta el ~7% (~13 ppb). Los beneficios en salud debido a la menor exposición que tendría la población a la contaminación atmosférica de implementarse el ProAire, especialmente por la mejora en los niveles de NO_2 y $PM_{2.5}$, se calcula se podrían evitar al menos seis mil muertes en el año 2030, con un ahorro económico estimado de 119 mil 256 millones de pesos.

Estas medidas han sido conceptualizadas como esfuerzos a corto, mediano y largo plazo, de forma que no todas tendrán impactos en la calidad del aire de forma inmediata. Además, el escenario de reducción de emisiones y los beneficios estimados están condicionados al cumplimiento de las medidas en tiempo y forma. Para garantizar la correcta implementación del ProAire, se integraron fichas descriptivas según los lineamientos de la Metodología del Marco Lógico de la Comisión Económica de América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas.

Además, para guiar la futura ejecución de las 19 medidas, se definieron lineamientos para el desarrollo de una Estrategia Integral de Comunicación, una Estrategia Integral de Financiamiento y una Estrategia de Seguimiento y Evaluación. Estas estrategias buscan garantizar el cumplimiento de los objetivos del Programa, a través de la participación ciudadana, la evaluación de resultados y mejora continua, mecanismos de seguimiento institucional, sistemas de reporte y la adecuada consecución y gestión de recursos financieros.

Por último, se subraya la necesidad de fortalecer esquemas de gobernanza que garanticen la colaboración entre el Gobierno Federal, los ejecutivos de la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo, los Municipios y las Alcaldías, dado que todos los niveles de gobierno tienen atribuciones distintas y jurisdicción sobre fuentes específicas de contaminación. La implementación del ProAire no debe recaer únicamente en las autoridades ambientales; en el ámbito público se requiere la colaboración de otros sectores como comunicaciones y transportes, tránsito, movilidad y desarrollo urbano, obras públicas, energía y agua, salud, educación, agricultura, desarrollo económico y fomento industrial, por poner algunos ejemplos. Asimismo, también se requiere la participación del sector privado, la academia y las organizaciones no gubernamentales, así como de la sociedad en general.

Executive **summary**

Historically, one of the main environmental problems in the Metropolitan Area of Mexico City (MCMA) has been air pollution. In the early nineties, Mexico City and its metropolitan area were classified by the World Health Organization (WHO) as the city with the worst air quality in the world (WHO, 1992).

The region, which is made up of the 16 mayoralties of Mexico City, 59 municipalities of the State of Mexico and the municipality of Tizayuca, Hidalgo, is home to 17% of the country's population and 22% of the national economy (measured as GDP). The growth of the population, the dispersed, distant and disconnected urban structure, and the unsustainable patterns of production, consumption and mobility are the main cause of the emission of atmospheric pollutants, which gravely affect the public health of the city's population.

To address this problem, since the 1990s, local and federal authorities have successfully implemented different strategies to improve the local air quality. These policies focused primarily on limiting emissions from the transportation and industrial sources through technological and regulatory changes. The atmospheric concentrations of all pollutants showed significant reductions in the last two decades and currently only ozone (O_3) and suspended particles smaller than 10 and 2.5 micrometers (PM_{10} and $PM_{2.5}$) exceed the national air quality standards, while nitrogen dioxide (NO_2), sulfur dioxide (SO_2), carbon monoxide (CO) and lead remain below allowable thresholds. However, in the last years a slowdown in the rate of improvement has occurred, with no perceptible downward trends in the concentrations of these pollutants. Even so, the results are still positive, since air pollution has been limited despite population and economic growth, and the expansion of the urban area.

The complexity of managing air quality is partly due to the climate and orography of the MCMA, which favors the accumulation of pollutants in the air. For example, particulate pollution is most intense in the winter months, when low temperatures and thermal inversions prevent the spread of pollution; while the ozone season begins in February and ends in June, due to the intense solar radiation that fosters the formation of O_3. In addition, changes in the climate system derived from the increase in the concentration of greenhouse gases may have a penalty on pollution levels, increasing the concentration of O_3 and $PM_{2.5}$.

According to the 2018 MCMA Emissions Inventory, more than 34 thousand tons of PM_{10} and 16 thousand tons of $PM_{2.5}$ particles were emitted. The former come mainly from the transportation sector (39.6%), road traffic (24.4%), agriculture (7.6%), and open-air burning of solid waste (5.4%). While $PM_{2.5}$ is generated mostly by transportation (43.0%), where heavy diesel vehicles have the highest contribution. Area sources (35.8%) also have a strong impact on the emission of $PM_{2.5}$, particularly from open-air burning of solid waste, road traffic, and agricultural activities.

In 2018, an estimated total of 413 thousand tons of volatile organic compounds (VOC) and 144 thousand tons of nitrogen oxides (NO_X) were emitted. NO_X comes mostly from transportation (85.8%), while VOCs are emitted by various activities such as commercial and domestic use of solvents (31.6%), LPG leaks (20.0%) and the transportation sector (22.2%). The formation of O_3 from these two precursors is complex; research suggests that, in the urban area of the MCMA, O_3 production is limited by VOCs. Therefore, local pollutant control policies should focus on the sources that generate VOCs, since reducing NO_X will not cause air quality improvements in O_3 concentration. A clear example of this situation was observed during the COVID-19 pandemic, when mobility restrictions reduced vehicular traffic by up to 60% in the area, causing the average concentration of NO_X to decrease by 44%; however, a 11% increase of O_3 compared to previous years was detected in the same period of time.

Aside from the local sources, the MCMA receives the negative impact from external emission sources, such as those from the power plant and the refinery in the Tula, Hidalgo region, which together produce 45 times more SO_2 than the entire local sources. Likewise, regional dust storms and forest fires generate high emissions that affect local air quality, even when these phenomena occur in neighboring states. When these unusual emissions are combined with adverse weather conditions, extraordinary high concentrations of air pollution can occur in the MCMA, commonly referred to as atmospheric environmental contingencies.

Reducing emissions of particles and precursors of ozone is a priority, since these pollutants directly impact the public health. Poor air quality increases the morbidity and mortality associated with lung cancer and respiratory, cardiovascular and metabolic diseases. Research shows that in the MCMA, more than 6,500 deaths per year could be avoided if the national standards for $PM_{2.5}$ and O_3 are met (INSP & INECC, 2017; Trejo-González *et al.*, 2019). Around 90% of these benefits are associated with $PM_{2.5}$, a pollutant that causes the most severe health impacts. The economic estimation of avoiding these deaths is equivalent to 130 billion Mexican pesos at 2018 prices.

Communicating the risks associated with air pollution is paramount. It is necessary to inform the population about the air quality conditions, so that people can act accordingly and reduce their exposure based on their conditions of vulnerability, which depend on biological factors, as well as social conditions. The main sectors of public health concern are girls and boys, the elderly, pregnant women and the population with pre-existing medical conditions or prevalence of chronic diseases, since they are the most vulnerable to the effects of poor air quality. Aside from this biological factors, socioeconomic status, the quantity of outdoor activity, the mode of transport used, the place of residence, the profession practiced and gender roles, are all variables that determine the degree of exposure and the vulnerability to pollutants. Therefore, risk communication efforts should be tailored to these agencies and should be intensified during severe pollution episodes.

The design of the MCMA Air Quality Program for 2021-2030 is based on a deep diagnosis of the emission sources and atmospheric conditions, and from a series of participatory processes with relevant stakeholders and scientists. This instrument establishes goals, measures and actions with a public health vision and the objective of reducing air pollutants, as well as greenhouse gases. In total, the program includes 19 public policy measures, 40 actions and 126 activities aimed at preventing, controlling and reducing emissions from priority sources, while addressing cross-cutting issues that strengthen air quality management, such as risk communication processes, citizen participation, institutional arrangements, monitoring, metropolitan coordination, and scientific research. The Air Quality Program strategies focus on:

- Increasing the use of cleaner technologies and strengthen regulations in the transportation sector.
- Establishing travel demand management to reduce number of trips, distances and times.

- Expanding massive and low-emission transportation options.
- Promoting sustainable urban development.
- Extending the use of cleaner fossil fuels (lower volatility and sulfur content) for the transportation and industrial sectors.
- Modifying regulations to reduce industrial emissions and apply surveillance schemes to control emissions from the steel, aluminum, glass, oil and power generation industries.
- Reducing the use of LPG and associated leaks at different stages of the supply chain.
- Limiting the VOC content in cosmetic and domestic products as well as those aimed at industrial and commercial use.
- Addressing the emission of fugitive particles from road traffic, agricultural activities and wind erosion, through wet sweeping and road maintenance, good agricultural practices and reforestation programs, respectively.
- Improving the management of urban solid waste and sewage.
- Enhancing the ability to fight forest fires.
- Limiting SO_2 pollution in the Tula-Vito-Apasco industrial corridor.
- Promoting healthy habits and air quality awareness among the urban population to reduce their exposure and vulnerability to atmospheric pollutants.
- Improving air quality monitoring in the MCMA.
- Generating scientific knowledge to help improve air quality and public health policies.

It is estimated that the implementation of the air quality strategies will reduce, on average, between 20% and 25% of air pollution by 2030. Regarding the priority pollutants, the reductions in emissions are more than 20% of PM_{10}, 35% of $PM_{2.5}$, 35% of NO_X and 20% of VOC compared to a trend scenario to the year 2030. These benefits are aligned with the long term objective of achieving the WHO air quality standards for more than 240 days per year by 2040.

The approximate cost of implementing the Air Quality program of the MCMA is estimated at $280.71 billion Mexican pesos at 2021 prices. Regarding the benefits on air quality associated with the reduction of air pollutants, it is estimated that the successful application of the program, the concentration of $PM_{2.5}$ could be ~22% (~4 µg/m^3) lower in the 24-hour annual average at the MCMA. Although, the daily average concentration levels of O_3 would be reduced by ~2% (~3 ppb) and, considering the maximum hourly value of ozone, there would be a reduction of ~ 7% (~13 ppb) in this pollutant. The health benefits due to the lower exposure that the population would have to air pollution if ProAire were implemented especially due to the improvement in NO_2 and $PM_{2.5}$ levels, it is calculated that at least six thousand deaths could be avoided in 2030, with an estimated economic saving of 119 thousand 256 million pesos.

The emission reduction scenario and the estimated benefits are conditional on compliance with the policies in a timely manner. To guarantee the correct implementation of the program, the environmental actions were developed according to the guidelines of the Logical Framework Methodology of the United Nations Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC).

To guide the implementation of the 19 public policy measures, a Comprehensive Communication Strategy, a Comprehensive Financing Strategy, and a Monitoring and Evaluation Strategy were developed. These strategies seek to guarantee compliance with the objectives of the Program, through citizen participation, evaluation of results, continuous improvement, institutional monitoring mechanisms, reporting systems and the adequate achievement and management of financial resources.

The program recognizes the coordination challenges that will be faced during the implementation of the program, these challenges will need and institutional reform that strengthens the existing governance and cooperation schemes to guarantee collaboration between the Federal Government, and the local governments of Mexico City, the State of Mexico and Hidalgo, and the Municipalities and townships. This is especially important, because each government institution has different attributions and jurisdictions over specific pollution sources that need to be tackled. Furthermore, the implementation of the program should not fall solely on the environmental authorities, other public entities need to contribute to the implementation of the program, such as transportation, urban development, public works, energy, water, public health, education, agriculture, economic development and industrial development. Likewise, the participation of the private sector, the academia and non-governmental organizations, as well as society in general, is also required to reach the objectives set forth in the MCMA Air Quality Program.



Antecedentes

Los esfuerzos entre los distintos niveles de gobierno por mejorar la calidad del aire, la salud pública y el medio ambiente en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) han sido plasmados a través de la puesta en marcha de diferentes instrumentos de política pública, entre ellos, los Programas de Gestión de Calidad del Aire de la ZMVM, también conocidos como ProAire.

Diversos programas de mejoramiento ambiental precedieron al ProAire ZMVM 2002-2010, el cual fue el primer programa con vigencia de nueve años, que incluyó acciones de diferentes dependencias gubernamentales, el sector privado, educativo y de la sociedad en general, para atender la necesidad de reducir los contaminantes del aire y proteger la salud pública. El Programa tuvo una visión científica e integró investigaciones nacionales e internacionales.

Este programa destacó los impactos en la salud que causan la contaminación del aire en la ZMVM. En el proyecto, también se realizó una evaluación de los posibles escenarios entre los años 1998 y 2010, sobre el crecimiento del Valle de México y en consecuencia el aumento en los niveles de contaminación atmosférica sin la implementación de medidas para la gestión de la calidad del aire. Este programa también incluyó un análisis sobre los costos económicos y sociales asociados a la contaminación de aire.

El primer ProAire de la ZMVM realizó un análisis del comportamiento de los contaminantes entre la década de 1990 al 2000 y presentó un inventario de emisiones con proyecciones al año 2010 con y sin la implementación del Programa, además aplicó un modelo fotoquímico para simular la formación y el comportamiento del ozono.

En este sentido, los objetivos del ProAire 2002-2010 fueron reducir las concentraciones de ozono y PM_{10} en consonancia con los límites establecidos en la normatividad mexicana, así como el número de días en que las concentraciones sobrepasan dichos límites. Además, respecto a los $PM_{2.5}$, se contemplaba que para el año 2003 se pudiera contar con la tecnología suficiente para establecer una medición periódica de su concentración atmosférica, de forma que sirviera para encauzar políticas públicas en el futuro.

El ProAire 2011-2020 retomó las experiencias del Programa anterior y presentó un cambio en la concepción y tratamiento de los procesos que deterioran la calidad del aire. Este instrumento incluía los conocimientos científicos más actualizados para plantear un manejo ecosistémico de la ZMVM a través del fortalecimiento en la gestión de la calidad del aire, de forma sostenible con cobeneficios urbanos, económicos y sociales. El diseño de este instrumento recabó datos más precisos sobre las complejas características del Valle de México y su relación con la emisión de contaminantes en la atmósfera. La protección de la salud de la población fue el eje estratégico y se incorporó evidencia sobre los efectos negativos de la contaminación atmosférica en la salud pública.

El segundo ProAire de la ZMVM recogió, desde el punto de vista de la salud de la población, la medición y el registro espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos criterio e identificó las fuentes más emisoras en el Valle de México. Además, realizó una evaluación del estado de la calidad del aire y las tendencias de los contaminantes con relación al grado de cumplimiento de los límites que se establecen en las Normas Ofi-

ciales Mexicanas (NOM) de salud ambiental, incluyendo un análisis sobre la distribución espacial de los contaminantes y el riesgo de exposición que enfrenta la población. Asimismo, tomó en consideración experiencias internacionales exitosas para la gestión de la calidad del aire con el objeto de retomar algunas de ellas y ajustarlas a la ZMVM.

Además, el Programa 2011-2020 analizó de manera ecosistémica la relación entre la estructura urbana y la generación de contaminantes, incluyendo los índices de entropía urbana y de mezcla de usos del suelo, los cuales permitieron comprender el papel del desarrollo urbano en la emisión de contaminantes e introdujo un modelo de simulación de emisiones por los viajes de los vehículos, con una proyección de generación de contaminantes al año 2020.

Este ProAire planteó ocho estrategias centrales; 1) Ampliar y reforzar la protección a la salud, 2) Disminuir el consumo energético de la ZMVM, 3) Mejorar la calidad y eficiencia energética de todas las fuentes, 4) Regular el consumo energético del parque vehicular, 5) Controlar las emisiones mediante cambios tecnológicos, 6) Fomentar la educación ambiental, la cultura de sustentabilidad y la participación ciudadana, 7) Mejorar el manejo de las áreas verdes, reforestación y naturación urbana, y 8) Fortalecer instituciones e investigación científica en la materia. Finalmente, el Programa incluyó 81 medidas y 116 acciones con objetivos específicos en materia de calidad del aire.

Así mismo, la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA), en colaboración con el Barcelona Supercomputing Center (BSC), en el año 2017 llevó a cabo una evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020, sobre el impacto de la reducción de las emisiones que propician la formación de ozono en la ZMVM.

El análisis tomó en consideración 13 acciones del Programa, las cuales contaban con un potencial elevado para la reducción de los precursores del ozono y se destacó la necesidad de disminuir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes de fuentes de área para controlar los niveles de ozono.

Por su parte, el Estado de México cuenta con un ProAire con vigencia 2018-2030. Este Programa abarca a toda la entidad y se centra en la mitigación de emisiones de contaminantes criterio, como las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como el ozono, ya que son los que tienen un mayor impacto en la salud pública y más presencia en el Estado.

El programa considera una evaluación sobre la calidad del aire en el Estado en la década anterior, a partir de las tendencias en las concentraciones atmosféricas de los contaminantes y los límites que se establecen en las NOM de salud ambiental. Así mismo, identifica qué tipo de contaminantes se producen en el Estado y en qué magnitud. El Programa del Estado de México se estructura alrededor de ocho estrategias; 1) Reducción de emisiones en fuentes

móviles, 2) Reducción de emisiones en fuentes fijas, 3) Reducción de emisiones en fuentes naturales, 4) Reducción de Programa emisiones de en el sector doméstico, comercial y de servicios, 5) Desarrollo urbano, 6) Protección a la salud, 7) Fortalecimiento institucional y financiamiento y 8) Comunicación y educación ambiental.

El ProAire del Estado de México evalúa a detalle la relación entre el deterioro de calidad del aire y la salud, realizando un análisis sobre las estadísticas de mortalidad y morbilidad de la entidad. Los resultados que presenta este programa señalan que, al cumplir con las NOM se evitarían alrededor de 2 mil 200 muertes por la exposición a $PM_{2.5}$, poco más de mil 200 por PM_{10} y 35 por ozono. Asimismo, estima con base en estándares internacionales, que el costo relacionado con la contaminación del aire ronda los 35 mil millones de pesos.

Por su parte, el Estado de Hidalgo presentó el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire para el periodo 2016-2024. Este Programa es el instrumento central de la entidad para mitigar y prevenir la contaminación del aire en el Estado, además de prevenir las posibles contingencias que deterioren la calidad del aire y tiene por objeto integrar estrategias que coadyuven a la gestión de la calidad del aire, reducir las emisiones por medio de acuerdos, compromisos y programas con los principales emisores en la entidad, actualizar el marco normativo estatal que regule y controle a los generadores de contaminantes y reducir los efectos en la salud pública por el deterioro de la calidad del aire.

En el año 2019, la SEDEMA, la SMAGEM, la SEMARNAT y la Coordinación Ejecutiva de la CAMe, presentaron las Medidas Necesarias para Mejorar la Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (14 medidas), en respuesta a los episodios de mala calidad de aire que se presentaron en el mes de mayo del mismo año, y se orientan a la disminución de los principales contaminantes precursores del ozono (compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno) y partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

Las 14 medidas son las siguientes; 1) Reducción de emisiones en la distribución y uso de gas L.P., 2) Regulación de compuestos orgánicos volátiles en recubrimientos y productos de uso doméstico, 3) Inspección y vigilancia estratégica para el control de emisiones en gasolineras, 4) Distribución de gasolinas menos volátiles en la Megalópolis, 5) Mejores prácticas para el manejo del fuego y prevención de incendios, 6) Control de emisiones y uso de comustibles limpios en el sector industrial, 7) Reducción de emisiones por mantenimiento urbano, 8.1) Ordenamiento de la circulación del transporte de carga, 8.2) Detección de vehículos ostensiblemente contaminantes, 9) Normas de emisiones vehiculares, 10) Regulación de emisiones de motocicletas nuevas, 11) Implementación de un nuevo esquema para el otorgamiento de los hologramas de verificación vehicular, 12) Fomento de la movilidad sustentable, 13) Aumento de la capacidad del transporte público sustentable, y 14) Reto para el desarrollo tecnológico para mejorar la calidad del aire.

Introducción

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) confluyen tres entidades federativas y un total de 76 demarcaciones locales: 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca en el Estado de Hidalgo. La ZMVM es la metrópoli más poblada en el país, con alrededor de 22 millones de personas. Además, tiene un papel relevante como centro económico, político, financiero y cultural, y produce aproximadamente un cuarto del Producto Interno Bruto nacional. Su extensión territorial abarca una superficie total de más de 7 mil 800 km^2, la cual se caracteriza por contar con sistemas montañosos que rodean a un valle central y que actúan como barreras físicas naturales a la circulación del aire, limitando la dispersión de contaminantes e incrementando el reto de su gestión ambiental. Por otro lado, el clima de la ZMVM provoca una variación estacional en la contaminación y también propicia su acumulación bajo ciertas condiciones meteorológicas, lo cual suma desafíos adicionales.

Con el fin de que la ZMVM continúe con la mejora de su calidad del aire, se requiere una visión que defina una trayectoria de reducción consistente en las emisiones contaminantes. Para lograrlo, además de incorporar la investigación científica y el entendimiento del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, es necesario abordar la gestión de la calidad del aire con una visión sistémica que incluya las vertientes presupuestales, operativas y de aplicación de políticas públicas. La gestión de la calidad del aire se refiere a todas las actividades que una autoridad reguladora realiza para ayudar a proteger la salud humana de los efectos nocivos de la contaminación del aire.

En la ZMVM se ha avanzado significativamente en la mejora de calidad del aire, combinando políticas regulatorias con cambios tecnológicos y de protección a la salud. Como resultado, las concentraciones de contaminantes criterio han ido disminuyendo de manera paulatina; sin embargo, las concentraciones de ozono y partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) continúan excediendo los límites permisibles definidos en la normatividad. Diversos estudios técnicos han demostrado que es necesario priorizar acciones que tiendan a reducir las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), con la finalidad de disminuir las concentraciones de ozono. Asimismo, se requiere enfocar esfuerzos para el control de emisiones de partículas finas, que son uno de los contaminantes de mayor impacto a la salud de la población. Por esta razón, se tiene el compromiso de desarrollar políticas que consideren los avances tecnológicos y los nuevos hallazgos científicos para mejorar la calidad del aire, atendiendo a las realidades institucionales y necesidades actuales de la población, su calidad de vida, el desarrollo económico y social.

El nuevo Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021 – 2030 (ProAire ZMVM 2021-2030) es un documento de planeación participativa que orientará, durante los próximos 10 años, las políticas públicas en materia de calidad del aire. Este es un instrumento clave para fomentar la aplicación coordinada de las medidas y acciones que previenen o revierten las tendencias de deterioro de la calidad del aire en la región, y con ello contribuir a mejorar la salud de la población y a la conformación de una sociedad más informada y colaboradora en la conservación del medio ambiente.

El ProAire ZMVM 2021 – 2030 es un instrumento de gestión ambiental que servirá como guía para las dependencias y ciudadanos en un proceso de mejora continua de la calidad del aire. Este es el resultado de retomar las experiencias de los programas anteriores, de un proceso de elaboración participativa con autoridades gubernamentales, académicos, especialistas y sociedad civil, y de abordar los nuevos y pasados retos de calidad de aire.

Este instrumento incluye una estrategia integral que toma en cuenta la incorporación de cobeneficios en materia de cambio climático, a través de acciones transversales en temas prioritarios como la movilidad urbana, industria y servicios, consumo energético, salud de la población y comunicación. Se desarrolla a lo largo de 12 Capítulos que guían la implementación del ProAire:

1) Descripción de la zona de estudio, 2) Fundamento jurídico y marco normativo, 3) Diagnóstico de la calidad del aire en la ZMVM, 4) Impacto del cambio climático en la calidad del aire de la ZMVM, 5) Inventario de emisiones de la ZMVM, 6) Salud pública y calidad del aire, 7) Estrategias, medidas y acciones de gestión de la calidad de aire y reducción de emisiones, 8) Comunicación y participación ciudadana, 9) Financiamiento para mejorar la calidad del aire, 10) Seguimiento, monitoreo y evaluación, 11) Implementación, y 12) Conclusiones.

La calidad del aire es un bien público cada vez más valorado por la población, pues es una condición necesaria para la preservación de la salud y de la calidad de vida. Por ello, las autoridades ambientales estatales y del Gobierno Federal tienen el compromiso de implementar medidas tendientes a mejorar la calidad del aire en la ZMVM por lo que, a través de la coordinación entre la Secretarías de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y las autoridades ambientales de la Ciudad de México (SEDEMA), del Estado de México (SMAGEM) y del Estado de Hidalgo (SEMARNATH), en colaboración con la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe), se implementarán las estrategias, medidas y acciones prioritarias para disminuir la concentración de contaminantes atmosféricos, de forma que se mejore el estado de la calidad del aire y se generen beneficios en salud, sociales, económicos y ambientales.

Justificación

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM) 2021-2030 tiene por objeto establecer el plan estratégico y operativo para el diseño de políticas públicas, medidas y acciones enfocadas a mejorar la calidad del aire, en beneficio de la salud de la población de la región. Las acciones planteadas se sustentan en el marco jurídico nacional y los marcos estatales, así como en evidencia técnica y científica para la gestión de la calidad del aire, y un análisis de los resultados del ProAire ZMVM 2011-2020, que permitirá dar seguimiento a los esfuerzos previos para el control y la prevención del deterioro de la calidad del aire a corto, mediano y largo plazo en la ZMVM en el periodo 2021-2030.

Entre los diferentes instrumentos normativos con los que México cuenta, se sostiene la importancia de garantizar un medio ambiente sano para el desarrollo y bienestar de las y los ciudadanos que residen y transitan en la ZMVM. Además, las leyes mexicanas reconocen al aire y la atmósfera como recursos naturales, por lo cual deben de ser protegidos por ser elementos esenciales para el desarrollo humano y por formar parte del ejercicio pleno al respeto de los derechos humanos, a la vida, a la salud, a un nivel de vida adecuado y a respirar aire puro.

La gestión de la calidad del aire en la ZMVM se materializa a través del presente Programa, al contar con metas específicas para reducir emisiones contaminantes, en línea con la Estrategia Nacional de Calidad del Aire y programas locales de las entidades de la ZMVM, para alcanzar estándares nacionales e internacionales. Las acciones descritas plantean indicadores para su evaluación y seguimiento, que al implementarse permitirán salvaguardar la salud de la población, con un respaldo técnico que analiza las tendencias de la calidad del aire en la metrópoli y el comportamiento de las fuentes de emisión que influyen en la mala calidad del aire, así como su relación con las características físicas propias de la región que propician niveles elevados de contaminación. Con esto en mente, se pone especial énfasis en atender las problemáticas ambientales que de manera más frecuente afectan a la ZMVM, la contaminación por ozono y por partículas suspendidas.

Por su cobertura geográfica, en la ZMVM confluye el actuar de múltiples Dependencias y Entidades de la Administración Pública del Gobierno Federal, de tres entidades federativas (la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo) y 76 gobiernos locales. Al mismo tiempo, una estructura urbana con patrones de expansión y movilidad complejos incide en el comportamiento de las fuentes de emisiones contaminantes. Es así que se justifica la incorporación de mecanismos de coordinación transversal al interior de los ejecutivos estatales y municipales, y entre estos e instituciones federales, para involucrar no solo a autoridades ambientales, sino también a otros departamentos gubernamentales, a la academia, a la sociedad civil, al sector privado y a los medios de comunicación para garantizar la correcta implementación de las acciones planteadas.

El presente ProAire reconoce la importancia de tomar acción ante el impacto o efectos perjudiciales de los contaminantes atmosféricos y toma como base los parámetros y límites permisibles establecidos por la normatividad ambiental mexicana para la concentración de contaminantes atmosféricos en el aire ambiente. Se presta especial atención a las Guías de Calidad el Aire de la Organización Mundial de la Salud, las cuales permiten orientar las metas establecidas en el ProAire en función de recomendaciones internacionales para reducir los efectos perjudiciales de la contaminación del aire en la salud. El uso y seguimiento de estos indicadores permitirá vigilar y disminuir los efectos de los contaminantes en la salud pública de las personas que habitan y se desplazan en la ZMVM.

México también se ha suscrito en acuerdos y tratados de carácter bilateral y multilateral, donde las obligaciones relacionadas con la calidad del aire influyen en las políticas públicas que buscan controlar las emisiones de contaminantes criterio que se regulan en este Programa. Además, la implementación de las medidas y recomendaciones que el presente ProAire establece, contribuirá en los esfuerzos nacionales e internacionales de mitigación del cambio climático y desarrollo sostenible.

01

Descripción de la zona de estudio

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se encuentra en la región central de la República Mexicana y está integrada por un total de 76 demarcaciones.



16 alcaldías de la Ciudad de México

59 municipios del Estado de México

1 municipio de Hidalgo

7866.1 kilómetros cuadrados

01

1.1. Delimitación geográfica

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se encuentra en la región central de la República Mexicana y está integrada por un total de 76 demarcaciones: 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, abarcando una superficie total de 7866.1 kilómetros cuadrados (km^2) (CONAPO, SEDATU, & INEGI, 2018). El listado completo de las demarcaciones que conforman la ZMVM se encuentra en el Anexo 1.1. La ZMVM se localiza entre los 18°56' y 20°04' de Latitud Norte y los 98°36' y 99°39' de Longitud Oeste, colinda al norte con el estado de Hidalgo, al sur con el estado de Morelos, al este con los estados de Tlaxcala y Puebla y al oeste con el Estado de México (ver Figura 1.1).

Localización y delimitación geográfica de la ZMVM

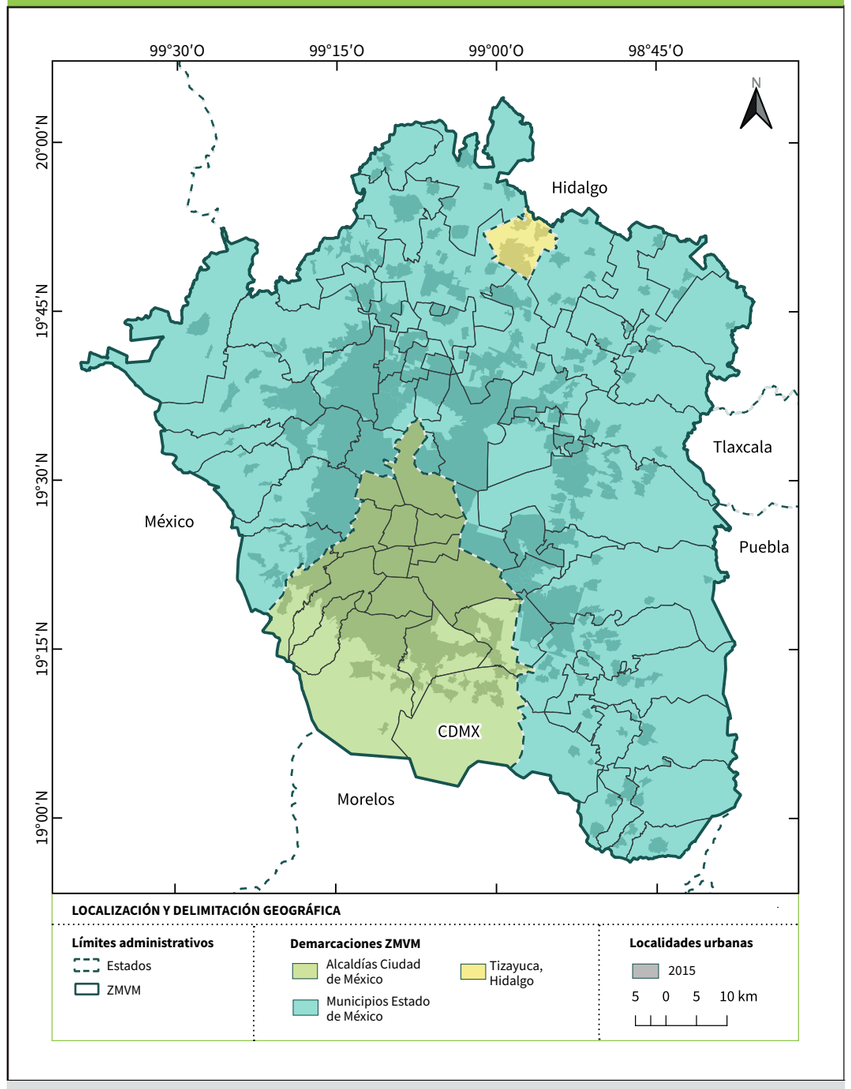


Figura 1.1 Localización y delimitación geográfica de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Elaborado con datos del Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2019a).*

1.2 Aspectos físicos

1.2.1 Relieve

La ZMVM se localiza en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, la cual se distribuye en la porción central del país (INEGI, 2019b, 2019c). En la región predominan las planicies y montañas, seguidas de áreas con lomeríos. En la Figura 1.2 se observa que la mayoría del territorio corresponde a llanuras y valles por encima de los 2000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.).

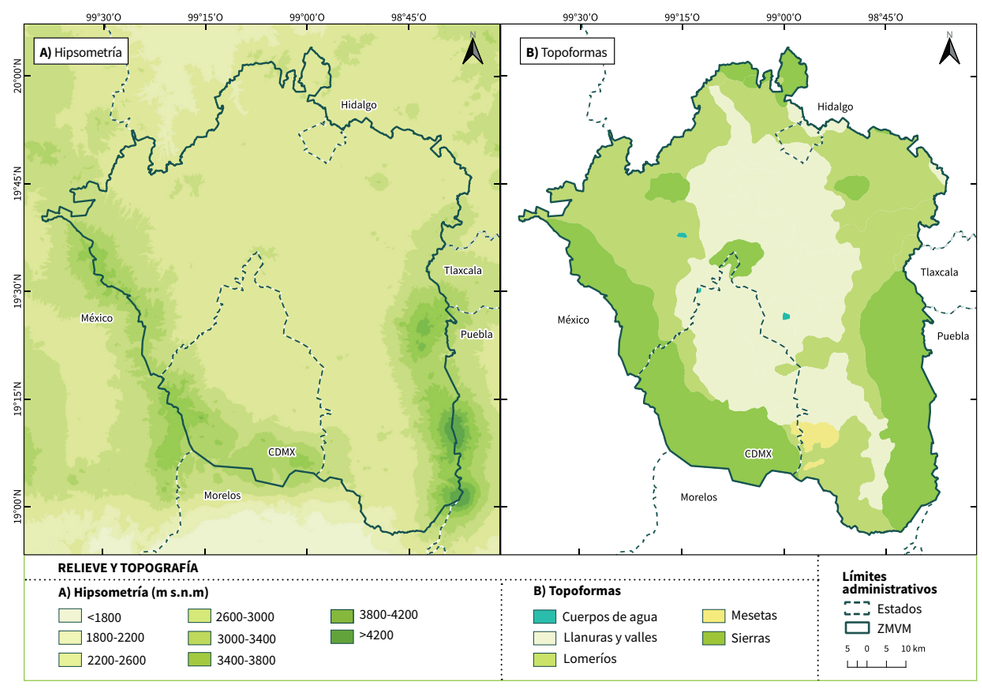


Figura 1.2 Relieve de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Elaborado con datos del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0; el conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital, por condensado estatal (edición 2015), escala 1:250 000, y el conjunto de datos vectoriales fisiográficos, serie I, sistema topoformas (INEGI, 2012b, 2020a).*

El relieve de la ZMVM está definido por varios sistemas montañosos que rodean a un valle central. Al sur se localiza la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, la cual está conformada por rocas ígneas producto de episodios volcánicos. Esta sierra constituye el límite meridional de la ZMVM y la separa del valle de Cuernavaca (INEGI, 2001); su pico más elevado es el cerro La Cruz del Marqués o Ajusco, con 3930 m s.n.m., seguido del volcán Tláloc (3690 m s.n.m.) y el cerro Pelado (3620 m s.n.m.) (INEGI, 2019b). Al norte de la ZMVM, entre los límites de la Ciudad de México con el Estado de México, se encuentra la Sierra de Guadalupe, la cual tiene una altura que oscila entre los 2500 y 3050 m s.n.m., teniendo como picos principales al cerro Picacho-Moctezuma y el cerro del Chiquihuite (SEDEMA, 2016).

Al oeste de la Ciudad de México se ubica la Sierra de las Cruces, que separa a la ZMVM del valle de Toluca y cuenta con elevaciones de 3100 a 3600 m s.n.m., como los cerros La Columna, Los Potrilleros y La Campana (INEGI, 2001). La Sierra Nevada, en el oriente del Estado de México, forma un límite natural entre la metrópoli y Puebla; se destacan sus dos elevaciones más características, los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl, con picos por encima de los 5000 m s.n.m. (INEGI, 2001). Finalmente, la planicie del valle se ve interrumpida por la Sierra de Santa Catarina al oriente de la Ciudad de México, sistema al cual pertenecen el Cerro de la Estrella y el Volcán Guadalupe, también conocido como El Borrego (INEGI & Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

Las características orográficas son una barrera física natural para la circulación del viento, lo que limita la dispersión de contaminantes emitidos dentro de la ZMVM (SEMARNAT, Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, & Secretaría de Salud, 2001). Las cadenas montañosas forman entradas naturales de aire al norte y al sureste de la región. Se observan dos corredores en el norte: el primero está formado por las sierras de Guadalupe y de las Cruces, y el segundo por las sierras de Guadalupe y Nevada. Las sierras Ajusco-Chichinautzin y Nevada forman otro corredor al sureste de la ZMVM en la región de Chalco, el cual comunica a la ZMVM con el valle de Cuautla, Morelos (SEDEMA, 2015b).

Actividad volcánica

A partir de 1994, el volcán Popocatépetl reinició su actividad, presentando exhalaciones y explosiones acompañadas de emisiones de vapor de agua, gases y cenizas (CENAPRED, 2014). La actividad volcánica representa una fuente natural de contaminación atmosférica, particularmente de dióxido de azufre (SO_2) y partículas suspendidas, contaminantes que ponen en riesgo la salud pública al provocar problemas respiratorios por la inhalación de ceniza fina, así como efectos perjudiciales en los ecosistemas que se localizan en las inmediaciones del volcán (INECC, 2013).

Las emisiones del volcán afectan con mayor frecuencia al municipio de Amecameca en el Estado de México (SEMARNAT, CAMe, & INECC, 2017). El viento en la región sopla hacia el oriente; sin embargo, durante el verano, vientos en dirección de este a oeste pueden acarrear cenizas hacia regiones urbanas en la ZMVM (Martin-Del Pozzo, 2012; UNAM & INECC, 2016). Algunos municipios de la región que se han visto más afectados por las emisiones de ceniza son Atlautla, Ayapango, Ecatzingo, Juchitepec, Ozumba, Tenango y Tepetlixpa (SMAGEM, 2018b; UNAM, 2017).

De acuerdo con la actualización de los mapas de peligros del volcán Popocatépetl, las emisiones de ceniza con columnas menores a 10 kilómetros (km) de altura –como las que han acontecido de 1994 a la fecha– conforman el escenario de mayor probabilidad de ocurrencia. Bajo este supuesto, la totalidad de la ZMVM podría verse afectada por la caída de trazas de cenizas, con mayores impactos en el sureste del Estado de México y la Ciudad de México (Coordinación Nacional de Protección Civil, 2017). En la Figura 1.3 se muestran los radios de afectación por caída de ceniza del Popocatépetl bajo el escenario de mayor probabilidad de ocurrencia.

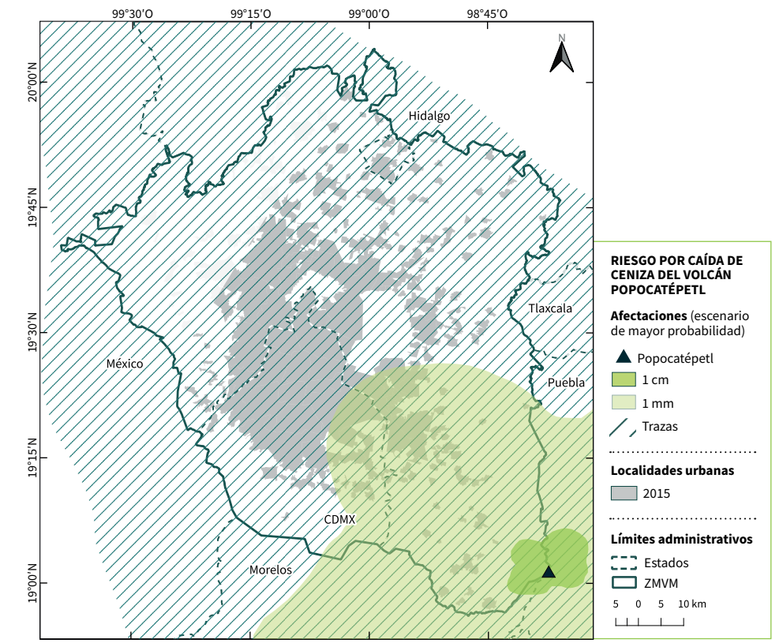


Figura 1.3 Mapa de riesgo por caída de ceniza del volcán Popocatépetl, escenario de mayor probabilidad
Fuente: *Elaborado a partir de la memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatépetl (UNAM, 2017).*

1.2.2 Hidrografía

La ZMVM se ubica principalmente en la Región Hidrológico-Administrativa (RHA) XIII "Aguas del Valle de México" y en la región hidrológica no. 26 "Pánuco", de acuerdo con la división establecida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010). Una porción en el sureste de la ZMVM (5.8%) pertenece a la región hidrológico-administrativa IV, denominada "Balsas", así como a la región hidrológica homónima[1]. La Figura 1.4 muestra la división hidrológico-administrativa de la ZMVM, los principales cuerpos de agua en la región y el sistema de cuencas hidrológicas.

Los recursos hídricos de la RHA XIII tienen el mayor grado de presión registrado en todo el país, con un valor de 141.4%[2] (CONAGUA, 2018). Esto se debe a que la cantidad de agua empleada en usos consuntivos es significativamente mayor al

1 El país está dividido en 37 regiones hidrológicas que agrupan un total de 757 cuencas. Al mismo tiempo, se tiene una división hidrológico-administrativa con 13 regiones. Este último sistema se ajustó a los límites municipales, mientras que el primero respeta los parteaguas naturales de las cuencas. Por esta razón, la delimitación hidrográfica de las cuencas varía ligeramente respecto de la administrativa (CONAGUA 2018; Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México 2014).

2 El grado de presión representa el volumen de extracción de agua media anual total para usos consuntivos (volumen concesionado) respecto del total de recursos hídricos renovables. Un valor superior al 100% indica que se extrae un volumen mayor al escurrimiento medio superficial y la recarga media de los acuíferos que ocurren de forma natural en la región.

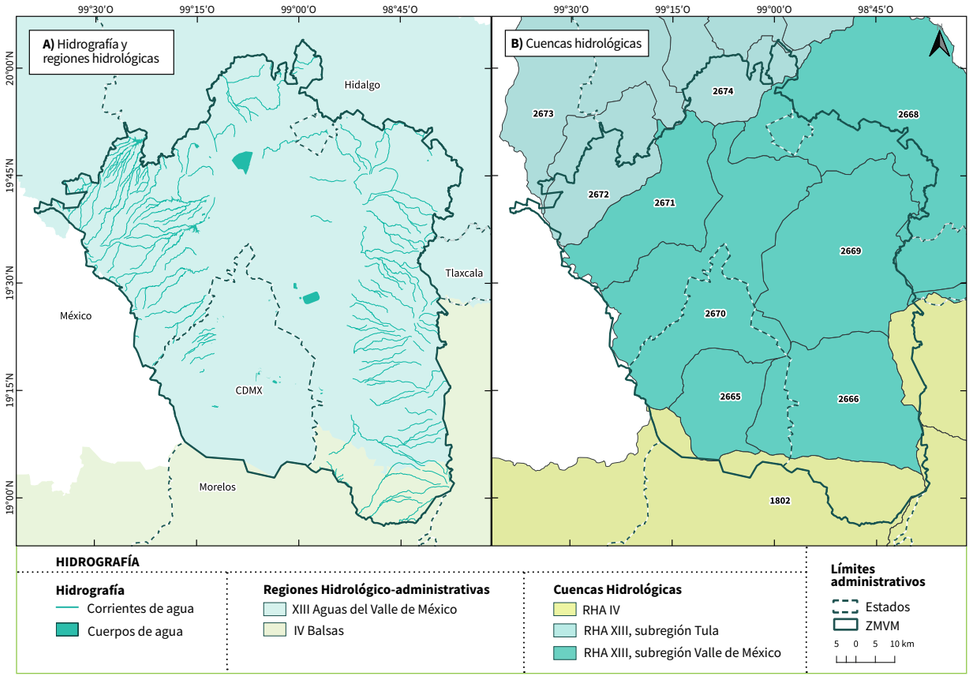


Figura 1.4 Características hidrográficas de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Elaborado con datos del Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2020) y el conjunto de datos vectoriales de información topográfica digital, por condensado estatal (edición 2015), escala 1:250 000 (INEGI, 2020a).*

volumen de agua renovable de la cuenca. Este estrés se traduce en un deterioro en la cantidad y calidad de los recursos hídricos, y contribuye a la sobreexplotación de acuíferos, ríos secos, eutrofización, contaminación con materia orgánica e intrusión salina, entre otros problemas. La Tabla 1.1 resume las características principales de la RHA XIII.

El consumo de agua de la población de la región es atendido por dos de los acueductos principales del país, el Sistema Lerma y el Sistema Cutzamala, los cuales suministran a la ZMVM recursos hídricos provenientes de otras cuencas. El primero abastece a ciertos alcaldías de la Ciudad de México a través de la extracción de agua subterránea del acuífero del Río Lerma, mientras que el segundo proporciona agua a toda la población de la ZMVM con recursos proveniente de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosques, entre otras (CONAGUA, 2018). También se cuenta con un sistema de pozos que permite la explotación de los acuíferos de la región (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2014).

Tabla 1.1 Características de la Región Hidrológico-Administrativa no. XIII

Superficie 18 229 km^2	**Población (a)** 23.55 millones de habitantes	**Agua renovable** 3401 hm^3/año 144 m^3/habitante/año
Aportación al PIB nacional (b) 24.63%	**Volumen total concesionado** 4808 hm^3/año	**Grado de presión** Muy Alto 141.4%

a. Población a mediados de 2017. b. Datos de Producto Interno Bruto al 2016.

Fuente: *Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2018).*

Aguas superficiales

En el Valle de México existía originalmente un sistema lacustre de casi 2000 km^2, conformado por cinco grandes lagos (Xaltocan, Zumpango, Texcoco, Chalco y Xochimilco). Hoy en día estos cuerpos de agua se han reducido a un sistema de embalses con una superficie de 56.76 km^2. De las 757 cuencas existentes a nivel federal (CONAGUA, 2018), 13 pertenecen a la RHA XIII. Para fines de planeación, estas se agrupan en dos subregiones: Valle de México y Tula (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2014). La Figura 1.4 muestra gráficamente la distribución espacial de los cuerpos de agua y las cuencas hidrográficas en la ZMVM. En el Anexo 1.2 se enlistan los principales cuerpos de agua superficial que pertenecen a la RHA XIII.

Aguas subterráneas

En la RHA XIII se encuentran 14 de los 653 acuíferos del país, siete en cada subregión de planeación. Actualmente cuatro acuíferos están sobreexplotados, todos ubicados en la subregión Valle de México. El déficit total de la RHA XIII es negativo (-579.6 hm^3/año), indicando que se extrae más de la cantidad límite establecida para no poner en riesgo el equilibrio de los ecosistemas dependientes de las descargas naturales del sistema de acuíferos. En la Tabla 1.2 se resumen las características principales del sistema de aguas subterráneas, en términos de la disponibilidad media anual y el nivel de explotación de los acuíferos. La tabla desagregada por acuífero y una representación gráfica de los mismos se pueden consultar en el Anexo 1.2.

Tabla 1.2 Características principales del sistema de aguas subterráneas de la Región Hidrológico-Administrativa no. XIII

	Acuíferos						DMA (hm^3/año)	
Subregión	**Sobre-explotados**	**Sin disponibilidad**	**Con disponibilidad**	**R (hm^3/año)**	**DNC (hm^3/año)**	**VEAS (hm^3/año)**	**Positivo**	**Déficit**
Valle de México	4	0	3	1209.0	30.4	1919.2	0.0	-740.6
Tula	0	1	6	1085.4	671.3	253.1	161.0	0.0

R: recarga total media anual
VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas
DNC: descarga natural comprometida
DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo

Fuente: *Elaborado con información del Diario Oficial de la Federación (DOF, 2018).*

1.2.3 Clima

El clima y las condiciones meteorológicas de la ZMVM están determinados por la fisiografía de la región y fenómenos meteorológicos a escala local, regional y sinóptica[3]. A continuación se describen, en primer instancia, los sistemas y fenómenos meteorológicos que influyen en la variabilidad anual y estacional de las condiciones meteorológicas en la región. Posteriormente se describen los tipos de clima y los patrones anuales y estacionales de las variables meteorológicas en la ZMVM, puntualizando los valores registrados en el año 2018 para temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión barométrica, radiación solar y altura de la capa de mezclado.

Sistemas y fenómenos meteorológicos que afectan a la ZMVM

La ZMVM es impactada por sistemas anticiclónicos[4] que se localizan tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico; específicamente se ve afectada por el sistema anticiclónico del Atlántico Norte y por el anticiclón del Pacífico. Estos sistemas generan estabilidad atmosférica, condición que inhibe el movimiento ascendente del aire y, por lo tanto, también la formación de nubes, lo cual propicia que una gran cantidad de radiación solar incida sobre la superficie terrestre. Estos factores hacen que la atmósfera de la ZMVM sea altamente foto-reactiva y favorecen las reacciones entre compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_X). A su vez, estas reacciones pueden derivar en la formación de smog fotoquímico y ozono (O_3) troposférico.

En la época invernal, la presencia de la corriente en chorro subtropical, caracterizada por una fuerte velocidad de los vientos del oeste en niveles altos de la tropósfera (los cuales superan los 100 km por hora sobre la región), favorece el transporte de humedad y genera precipitaciones normalmente no muy importantes, en las cuales la orografía juega un papel decisivo. Durante esta época también se presentan incursiones de masas de aire frío y seco, impulsadas por sistemas anticiclónicos situados en la porción centro occidental de los Estados Unidos o aún más al norte, que penetran por la región septentrional del territorio mexicano y avanzan hacia la zona central. Estos sistemas llegan a extenderse sobre la ZMVM, donde provocan descensos de temperatura, algunas heladas y nevadas, así como la estratificación de las capas troposféricas, induciendo la formación de inversiones térmicas en superficie o en capas atmosféricas muy bajas.

El verano corresponde a la época de lluvias en la ZMVM, periodo del año en el que esta se ve afectada por la entrada de aire cálido y húmedo procedente del Océano Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. Estos fenómenos favorecen el movimiento ascendente del aire e inhiben la formación de inversiones térmicas. Durante esta época también se registra un incremento en la humedad, debido al patrón de viento propio de la temporada (los vientos alisios[5]), así como la constante presencia de perturbaciones atmosféricas conocidas como ondas tropicales, las cuales generan grandes cantidades de precipitación sobre los lugares por los que se desplazan.

Es muy importante resaltar el papel del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) en las variaciones del clima en México (Magaña & Quintanar, 1997). Durante El Niño[6], las lluvias de invierno se intensifican y las de verano se debilitan, en tanto que en el Pacífico mexicano se incrementa la frecuencia con la que se presentan las tormentas tropicales y huracanes; en cambio, durante La Niña ocurre lo contrario, por lo que los inviernos son más secos. Bajo condiciones neutrales de ENOS, su influencia en los patrones observados de temperatura y precipitación es menos significativa.

Sin embargo, El Niño y La Niña no son los únicos factores que condicionan las características climáticas a nivel global y regional; existen otras oscilaciones de interconexión océano-atmósfera que se presentan en diversas escalas de tiempo y que modulan los patrones de circulación atmosférica global. En la ZMVM influyen oscilaciones o tele-conexiones tales como la Oscilación Madden-Julian (MJO), la Oscilación del Ártico (AO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y el Patrón Pacífico Norte América (PNA).

Durante 2018 los patrones observados de circulación, temperatura y precipitación se asociaron en mayor medida a las condiciones atmosféricas y oceánicas registradas en el Pacífico Norte. El sistema océano-atmósfera durante los meses de enero y febrero de 2018 presentó un debilitamiento en las condiciones de La Niña. Entre los meses de marzo a mayo las condiciones observadas se mantuvieron en un escenario de transición de La Niña a condiciones neutrales de ENOS, situación que prevaleció hasta finales de 2018 (Pascual Ramírez *et al.*, 2018).

Unidades climáticas

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, el clima que predomina en la ZMVM es del tipo templado subhúmedo con lluvias en verano, el cual se caracteriza por una temperatura media anual que oscila entre los 12 y los 18 grados Celsius (°C), y un porcentaje de lluvia invernal entre el 5.0 y 10.2% del total anual. Los climas templados se concentran en los valles altos del noroeste de la ZMVM, así como en el centro y este de la región (ver Figura 1.5). En la zona centro-norte del Estado de México se registra un clima semiseco templado, con veranos cálidos y una temperatura media anual entre 12 y 18°C. Por último, en los sistemas montañosos, al este y suroeste del valle central, prevalece un clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano y una temperatura media anual entre 5 y 12°C (García, 2004; INEGI, 2005; SEDEMA, 2018a, 2020b). Las variaciones estacionales durante el año, relacionadas con los patrones de temperatura, humedad y eventos de gran escala, marcan temporadas climáticas al interior del Valle de México y mantienen una estrecha relación con la presencia de algunos contaminantes atmosféricos, lo cual se discutirá más a detalle en el Capítulo 3.

Clima predominante en la ZMVM



Templado subhúmedo
con lluvias en verano

temperatura media anual entre los	porcentaje de lluvia invernal entre el
12-18°C	**5.0-10.2%**

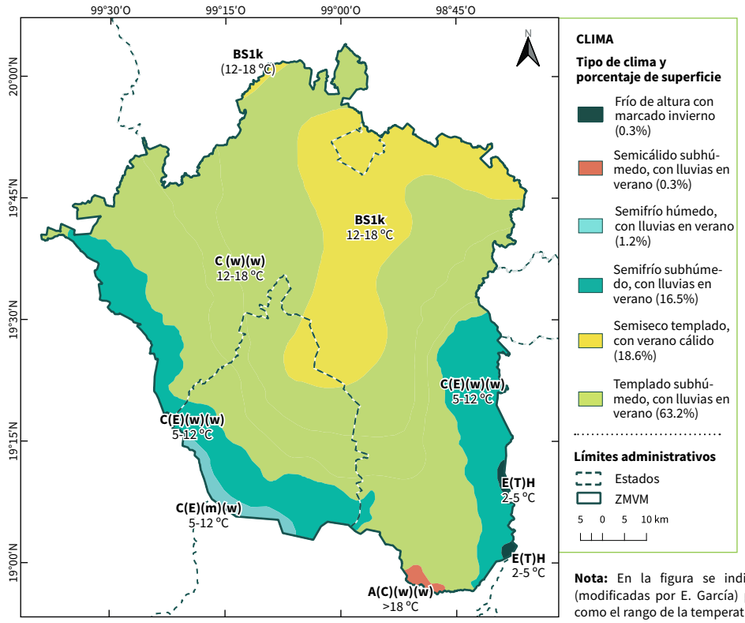
Los climas templados se concentran en los valles altos del noroeste de la ZMVM, así como en el centro y este de la región.

3 También conocidos como fenómenos de gran escala, con una longitud horizontal superior a los 1000 km.

4 Zonas atmosféricas de alta presión, en las cuales la presión atmosférica es superior a la del área circundante.

5 Vientos de dirección e intensidad relativamente constante, que soplan entre los trópicos. En el hemisferio norte soplan del noreste.

6 El fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) hace referencia a un calentamiento en la temperatura superficial del mar desde el Pacífico central hacia el Pacífico tropical del este, a lo largo de la línea ecuatorial, el cual modifica patrones climáticos globales. ENOS resulta de una fluctuación interanual del sistema océano-atmósfera en el Océano Pacífico ecuatorial y tiene tres fases: una cálida (El Niño), una fría (La Niña) y una neutral, siendo esta última la fase donde el océano se comporta de manera normal. Según la Organización Mundial Meteorológica, El Niño y La Niña son condiciones anómalas en el Pacífico tropical del este; por "anómalo" se entiende una elevación (descenso en caso de La Niña) de 0.5°C o más (-0.5°C o menos) por encima (abajo) de la media del periodo 1971—2000, durante un trimestre, y debe permanecer al menos 5 trimestres con esas condiciones (CONAGUA, s/f.).

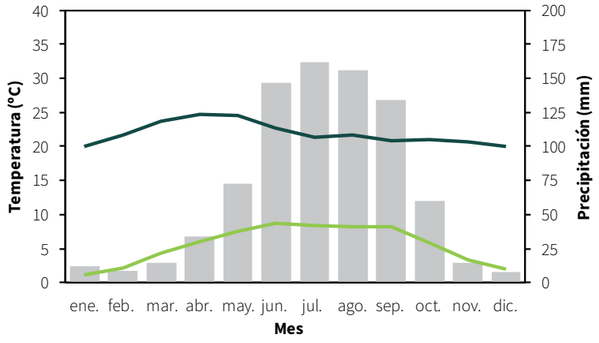


Nota: En la figura se indican las claves de Köppen (modificadas por E. García) para cada tipo de clima, así como el rango de la temperatura media anual.

Figura 1.5 Clima de la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de unidades climáticas, escala 1:1 000 000, edición 2008 (INEGI, 2020a).*

El ciclo anual y variación estacional de la precipitación y la temperatura para la ZMVM se muestra en la Figura 1.6; los datos corresponden a las normales climatológicas durante el periodo 1950-2000. Se puede observar que los valores máximos de precipitación se presentan durante el verano, específicamente en los meses de julio y agosto, y los mínimos ocurren durante el invierno y la primavera. Las temperaturas más elevadas se registran en abril y mayo, durante la primavera, mientras que las temperaturas más bajas se alcanzan en invierno, con mínimos en enero. Si bien las temperaturas máximas disminuyen durante el verano en comparación con los valores durante la primavera, la temperatura mínima sigue una tendencia distinta y sus valores máximos se registran de junio a septiembre (INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017; INECC & UNAM, 2015b; SEDEMA, 2018a).



Nota: La precipitación corresponde al promedio mensual acumulado en toda la ZMVM. Se reportan los promedios de la temperatura máxima y mínima en toda la ZMVM, por lo que los valores pueden diferir de datos para zonas o regiones específicas dentro del área de estudio.

Figura 1.6 Climograma para la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Datos climatológicos de referencia (WorldClim 1950-2000) de los escenarios de cambio climático de México (INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017; INECC & UNAM, 2015b).*

Las consecuencias del cambio climático incluyen modificaciones en la temperatura atmosférica, los patrones de precipitación, vientos y pautas de circulación atmosférica y oceánica (SEMARNAT, 2014). Es importante comprender las anomalías en la temperatura y la precipitación a nivel regional y a escala mundial; por ejemplo, por efecto del cambio climático pueden modificarse las trayectorias de tormentas, corrientes en chorro y sistemas anticiclónicos (Solomon, Qin, & Manning, 2007). Es así que los efectos del cambio climático pueden tener un impacto sobre el comportamiento de la contaminación atmosférica y el nivel de calidad del aire en la ZMVM. En el Capítulo 4 se analiza detalladamente la relación entre el cambio climático y la calidad del aire, así como las implicaciones que pudieran tener las anomalías en las variables meteorológicas sobre los niveles de contaminación.

Temperatura

La temperatura media anual en la ZMVM oscila entre los 12 y los 18°C. A lo largo del año se observan variaciones estacionales típicas, con temperaturas más cálidas entre abril y mayo, templadas entre mayo y principios de octubre, y mínimas durante el invierno. Las variaciones en la temperatura también se modifican en función de la altitud, con temperaturas medias anuales más bajas en las zonas montañosas. La Figura 1.7 muestra gráficamente la variación regional de la temperatura media anual. En cuanto a las variaciones diurnas, los registros horarios indican que la temperatura disminuye durante la noche; los valores mínimos acontecen en la madrugada y aumentan a lo largo del día hasta alcanzar valores máximos entre las 14:00 y las 17:00 horas (SEDEMA, 2015b).

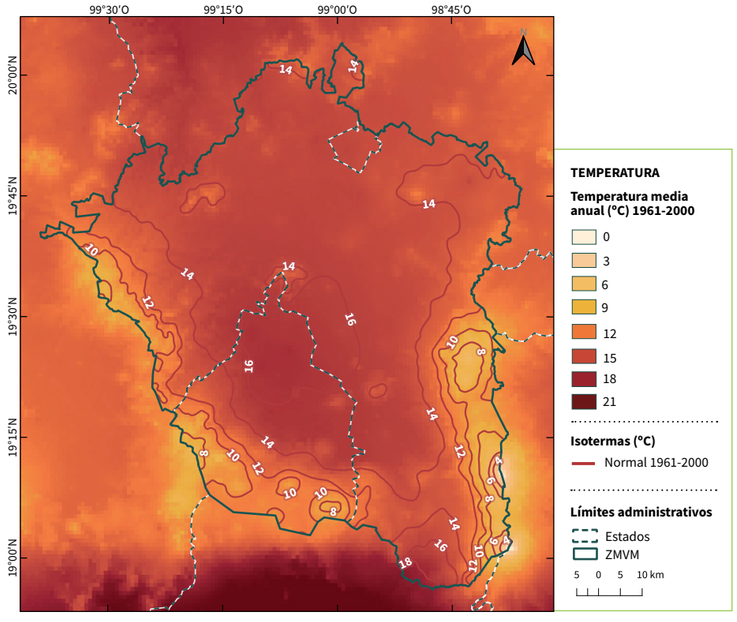


Figura 1.7 Variación espacial de la temperatura media anual en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de temperatura media anual (edición 2007), escala 1:1 000 000 (INEGI, 2020a), y datos climatológicos de referencia (SMN 1961-2000) de los escenarios de cambio climático de México (INECC & UNAM, 2015a).*

El promedio reportado en 2018 por la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México[7] fue de 16.7°C. La máxima temperatura registrada alcanzó los 32.8°C el 31 de mayo en la estación Montecillos (MON), en el municipio de Texcoco, Estado de México, y un mínimo de -6.2°C el 15 de enero en la estación Ajusco (AJU) en la zona montañosa de la Sierra Ajusco-Chichinautzin. El promedio mensual de temperatura muestra que, en 2018, el mes más frío fue enero, con un valor promedio de 12.5°C, mientras que el más cálido fue mayo con un promedio de 19.4°C. El promedio anual fue 0.1°C menor que el registrado en 2017 (SEDEMA, 2020b).

En general, las estaciones ubicadas en áreas suburbanas o rurales reportan las temperaturas más bajas, mientras que las estaciones ubicadas dentro del área urbana registran valores promedio más altos. De igual manera, las estaciones suburbanas o rurales presentan un mayor contraste entre las temperaturas máxima y mínima diarias, en comparación con las estaciones urbanas (SEDEMA, 2018a), lo que evidencia el fenómeno de la isla de calor urbana.

La temperatura es inversamente proporcional a la densidad de un gas, por lo que se relaciona directamente con la estabilidad atmosférica; a bajas temperaturas en la región inferior de la atmósfera, el aire será más denso y la dispersión de la contaminación será desfavorable por las condiciones de estabilidad atmosférica. Cuando la temperatura aumenta, la capa de aire superficial se calienta, generando condiciones de inestabilidad que favorecen el mezclado del aire y la dispersión de los contaminantes (SEDEMA, 2015b).

Precipitación

La temporada de lluvias inicia en las últimas semanas de mayo y concluye durante las primeras semanas de octubre, con un periodo relativamente seco durante el resto del año, aunque se llegan a presentar lluvias aisladas. Este régimen pluvial refleja la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos sinópticos en los océanos Pacífico y Atlántico (SEDEMA, 2006). En la RHA XIII, la precipitación normal anual entre 1981 y 2010 fue de 648.9 mm (CONAGUA, 2018); la Tabla 1.3 muestra la precipitación mensual normal para este mismo periodo de tiempo y para el año 2018.

Tabla 1.3 Precipitación pluvial normal (1981-2010) y en 2018 para la Zona Metropolitana del Valle de México

	Precipitación mensual (mm)												
Periodo	**Ene.**	**Feb.**	**Mar.**	**Abr.**	**May.**	**Jun.**	**Jul.**	**Ago.**	**Sep.**	**Oct.**	**Nov.**	**Dic.**	**Precipitación anual (mm)**
Normal 1981-2010, RHA XIII	11.2	11.2	11.6	27.6	51.4	109.2	125.8	114.7	110.4	56.9	13.3	5.6	648.9
Año 2018, ZMVM	7.9	7.7	12.2	44.5	59.1	127.4	85.9	198.2	120.7	86.8	31.1	4.8	786.2

Fuente: *Para el periodo 1981-2010, Estadísticas del Agua en México 2018 (CONAGUA, 2018); para el año 2018, registros del Sistema Meteorológico Nacional, reportados por la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2020b).*

Al igual que con la temperatura, además de las variaciones estacionales, se observan cambios en la precipitación en función del tipo de clima y la altitud, producto del efecto orográfico. Dada la extensión de la ZMVM, el esquema de precipitación es desigual; se observa un aumento en la cantidad de precipitación conforme incrementa la elevación del terreno, particularmente en las Sierras del Ajusco-Chichinautzin y de las Cruces, donde el clima es más húmedo que en la región centro-norte de la ZMVM. La Figura 1.8 muestra la variación regional de la precipitación anual de acuerdo con registros históricos de precipitación.

7 La configuración del SIMAT y la REDMET se describen a detalle en el Capítulo 3.

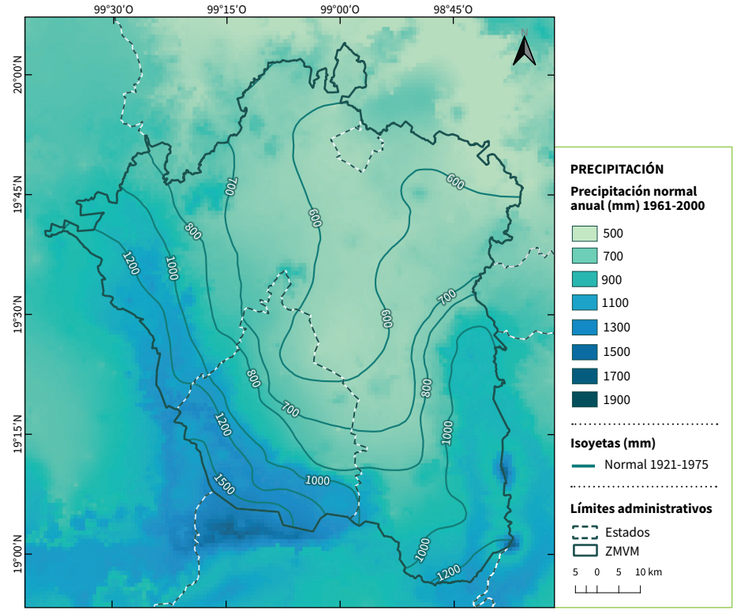


Figura 1.8 Variación espacial de la precipitación pluvial en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de precipitación media anual (edición 2006), escala 1:1 000 000 (INEGI, 2020a) y datos climatológicos de referencia (SMN 1961-2000) de los escenarios de cambio climático de México (INECC & UNAM, 2015a).*

La precipitación tiene un efecto positivo sobre la calidad del aire. La fracción gruesa de partículas (con diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 micrómetros) eventualmente cae a la superficie de la tierra por gravitación o impactación inercial, aunque también son eliminadas de la atmósfera por gotas de lluvia conforme estas precipitan. En cambio, las partículas menores a 2.5 micrómetros no se remueven tan fácilmente de la atmósfera; estas tienden a incorporarse en las gotas de las nubes, por lo que su tiempo de residencia en la atmósfera es similar al del agua, aproximadamente de 10 días (INE-SEMARNAT, 2011).

Este fenómeno, conocido como deposición húmeda, puede tener efectos perjudiciales sobre la vegetación y la infraestructura. Cuando el agua en el aire reacciona con el SO_2 y los NO_X, forma ácidos que pueden depositarse a través de la lluvia. Los efectos dependen de las características de la vegetación y los materiales donde se da la deposición, e incluyen la acidificación de cuerpos de agua y la lixiviación de nutrientes del suelo; la deposición de partículas también genera efectos negativos en el follaje de plantas, reduciendo el crecimiento vegetal (INE-SEMARNAT, 2011).

Humedad relativa

La humedad relativa es un indicador de la cantidad de vapor de agua presente en el aire ambiente y depende estrechamente del régimen pluvial. Durante la temporada seca en la ZMVM, la humedad relativa promedio varía entre el 30 y 50%, mientras que durante los meses de lluvia oscila entre el 60 y 80%. En 2018, el periodo del año con los valores mínimos de humedad relativa fue el trimestre de marzo a mayo, con un mínimo de 43% en marzo, los meses entre agosto y octubre presentaron los máximos de

humedad con valores superiores al 68%, y el promedio anual fue del 57% (SEDEMA, 2020b).

Este parámetro meteorológico también desempeña un papel importante en la química atmosférica, tanto diurna como nocturna. Durante el día, el agua participa en los procesos fotoquímicos de la atmósfera y tiene una influencia importante en las propiedades fisicoquímicas de los aerosoles atmosféricos. Durante el periodo nocturno la humedad se relaciona con la formación de compuestos secundarios (aerosoles y gases) a través de reacciones heterogéneas que ocurren en la superficie de los aerosoles, en las superficies de la infraestructura urbana y de la vegetación, así como en el suelo (SEDEMA, 2018a). La precipitación, la humedad relativa y la temperatura tienen un rol clave en la formación y remoción de contaminantes atmosféricos, principalmente de partículas suspendidas. Las propiedades termodinámicas de las partículas, en específico la distribución de su masa entre la fase gaseosa y de aerosol, también es un factor determinante en su tiempo de residencia en la atmósfera; esta relación depende de la temperatura y la humedad (INE-SEMARNAT, 2011).

Vientos

Los campos de flujo de viento en la ZMVM están determinados por la fisiografía de la región y los fenómenos meteorológicos sinópticos. Las montañas que rodean al valle central influyen en la dirección y velocidad del viento; la abertura orográfica en la región nororiental, donde el relieve es casi plano, provoca que la dirección predominante de los vientos sea, con mayor frecuencia, del noreste hacia el suroeste. Sin embargo, al presentarse eventos de escala sinóptica, las condiciones meteorológicas y los campos de flujo de viento se modifican (SEDEMA, 2006). La Figura 1.9 muestra los campos de viento superficial promedio por mes para el año 2018.

En el análisis de los campos de viento promedio para los diferentes meses se puede observar que, durante la mayor parte del año (enero a octubre), la dirección del viento predominante es del norte y noreste. Sin embargo, se presentan algunas corrientes del sur, lo cual es más notorio en los meses de enero a abril; esta situación crea zonas de convergencia de vientos en el centro y sur de la ZMVM. En los meses de noviembre y diciembre la dirección de viento predominante es del sur y sureste, lo que deriva en la formación de zonas de convergencia de vientos en el centro y norte de la ZMVM (SEDEMA, 2020b).

De noviembre a abril también predomina un flujo desde el oeste (SEDEMA, 2015b); en esta época del año es frecuente el registro de sistemas anticiclónicos en la región centro del país, ubicados tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico (SEDEMA, 2006; SEMARNAT, Gobierno de la Ciudad de México, & Gobierno del Estado de México, 1996). Cuando estos fenómenos impactan al Valle de México, se generan condiciones de estabilidad atmosférica que inhiben el movimiento vertical del aire y la formación de nubes, lo que puede generar cápsulas de aire inmóvil en áreas que llegan a extenderse sobre todo el Valle de México (SEMARNAT *et al.*, 2001). El resto del año los vientos alisios propios de la temporada acarrean humedad desde el noreste; la entrada de aire cálido y húmedo favorece el movimiento ascendente del aire y coincide con la temporada de lluvias en la región.

El perfil horario del viento para las estaciones ubicadas en la región urbana se caracteriza por velocidades bajas durante la noche, con incrementos graduales a partir del amanecer y una aceleración más súbita a medida que el sol calienta la superficie del suelo durante la mañana y en las primeras horas de la tarde. Esto hace que los valores máximos de velocidad del viento se registren alrededor de las 18:00 horas (SEDEMA, 2018a, 2020b).

El promedio anual para la velocidad escalar del viento en 2018 fue de 2.0 metros por segundo (m/s), similar a los reportados en 2017 y 2016. En mayo se presentó el máximo, con 2.3 m/s, mientras que el valor mínimo se registró en septiembre y diciembre, ambos con un promedio de 1.8 m/s. Las estaciones Ajusco Medio (AJM) y Milpa Alta (MPA) promediaron la velocidad máxima con 2.7 m/s, en tanto que el mínimo fue de 1.4 m/s y se registró en la estación San Agustín (SAG) en el municipio de Ecatepec de Morelos, Estado de México (SEDEMA, 2020b).

El viento influye en la calidad del aire de la ZMVM. Un viento fuerte, independientemente de su dirección, permite una mayor dispersión de los contaminantes atmosféricos. Por otro lado, un viento débil limita su dispersión y propicia un incremento en la concentración de los contaminantes, situación que se puede agravar cuando se presentan alturas bajas en la capa de mezclado y/o durante un episodio intenso de radiación solar (SEDEMA, 2018a).

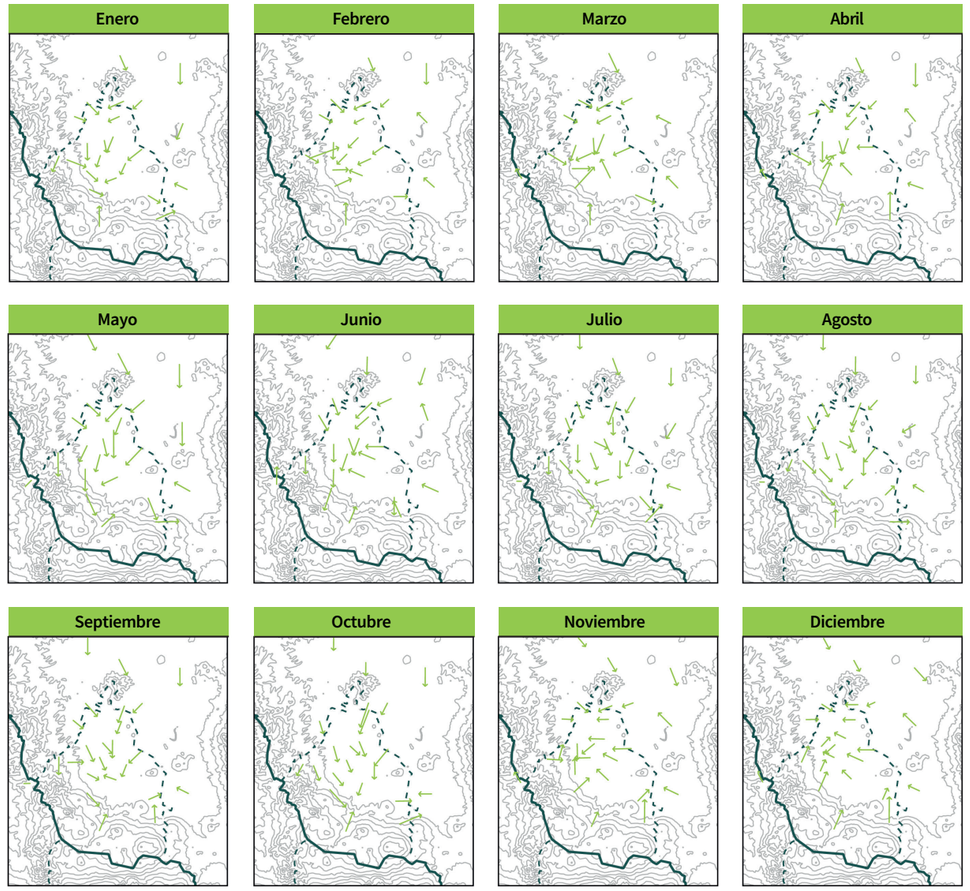


Figura 1.9 Campos de viento en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Informe 2018 de la calidad del aire en la Ciudad de México (SEDEMA, 2020b).*

Presión barométrica

La presión barométrica desciende conforme aumenta la altitud, y depende también de la humedad relativa. La presión será menor en días nublados y húmedos, dado que el contenido de humedad es inversamente proporcional a la densidad del aire. Los sistemas de baja presión traen consigo nubosidad y lluvia, mientras que los sistemas de alta presión (anticiclónicos) favorecen días despejados y sin precipitación (SEDEMA, 2015b). El fenómeno sinóptico conocido como la "corriente en chorro subtropical" favorece la disminución de la presión atmosférica, el incremento en la velocidad del viento y la dispersión de contaminantes (SEDEMA, 2018a). En 2018, el promedio anual de la presión en las estaciones que se ubican dentro de la ZMVM fue de 584.9 milímetros de mercurio (mmHg) (SEDEMA, 2020b).

La magnitud de la emisión de ciertos contaminantes durante los procesos de combustión se puede explicar en términos de la presión barométrica. Cuando disminuye la presión y la densidad del aire con la altitud, la cantidad de oxígeno por unidad de volumen es menor. Es así que hay "menos" oxígeno para respirar o para participar en reacciones de combustión, provocando que este último proceso sea menos eficiente y que se genere una mayor cantidad de contaminantes (SEMARNAT *et al.*, 2001).

Radiación solar

La localización, fisiografía y el clima de la ZMVM determinan la cantidad de radiación solar que incide sobre su superficie. Por su latitud, en la región se registran periodos de radiación solar de 11 horas en invierno a 13 horas en verano. La elevación también influye en la incidencia de radiación, puesto que la luz solar debe atravesar un menor espesor de la atmósfera y hay una probabilidad más baja de que sea reflejada o absorbida por compuestos y moléculas presentes en esta. Finalmente, la ausencia de nubes propicia que una mayor cantidad de radiación solar llegue a la superficie terrestre; en ese sentido, los sistemas anticiclónicos favorecen cielos despejados y mayores niveles de radiación solar.

Dentro de la zona de estudio, la radiación ultravioleta (UV) es particularmente relevante. Este tipo de radiación tiene una longitud de onda entre 280 y 440 nanómetros (nm). Se divide al espectro en dos tipos de radiación UV, la banda "B" (UV-B) entre los 280-315 nm y la "A" (UV-A) de 315-400 nm. La radiación UV es un factor determinante en el avance de las reacciones químicas a través de las cuales se forma el *smog fotoquímico.* El nivel de radiación solar hace que la atmósfera de la ZMVM sea altamente foto-reactiva. En la tropósfera[8], el O_3 se produce cuando los COV y los NO_X reaccionan en presencia de luz solar, específicamente en la banda UV-B. La radiación también contribuye a la formación de aerosoles secundarios, resultado de la oxidación fotoquímica de COV (INE-SEMARNAT, 2011; SEDEMA, 2015b; UNAM & INECC, 2016).

La altitud de la ZMVM provoca que la región esté expuesta a un 20% más de radiación UV en comparación con el nivel del mar. Esta variable meteorológica se relaciona directamente con la temperatura ambiente y su variación estacional y diurna. De acuerdo con los registros de la REDMET, los máximos diarios de irradiancia se presentan comúnmente entre las 12:00 y 14:00 horas. Los registros tienen una menor variabilidad en los meses de la temporada seca, cuando predominan los días despejados, mientras que una distribución poco uniforme de la nubosidad en la temporada de lluvias ocasiona una mayor fluctuación en las mediciones. La intensidad máxima de radiación solar se recibe en verano, durante el mes de julio, cuando los días son más largos. Durante el invierno los días son más cortos, por lo que la radiación disminuye. Sin embargo, en la ZMVM, la nubosidad durante la temporada de lluvia reduce de manera considerable la intensidad de la radiación, por lo que los máximos se registran en primavera.

En 2018 el promedio anual para el período diurno (8:00 a 20:00 horas) de radiación UV-A fue de 2.0 vatios por metro cuadrado (W/m^2) y para la radiación UV-B de 0.09 W/m^2. Los máximos de radiación solar ultravioleta se reportaron en el periodo comprendido entre los meses de mayo a agosto, con valores de 6.275 W/m^2 y 0.375 W/m^2 (UV-A y UV-B, respectivamente); los mínimos se registraron en los meses de invierno, con 0.001 W/m^2 de radiación UV-A y 0.0001 W/m^2 UV-B, respectivamente (SEDEMA, 2020b).

Altura de mezcla e inversiones térmicas

Para entender los procesos de dispersión de contaminantes en la ZMVM es fundamental comprender el concepto de *altura de mezcla.* Los gases emitidos en la superficie terrestre se difunden y diluyen en la capa de aire adyacente, definida como capa límite atmosférica. Esta capa tiene una altura límite, denominada altura de mezcla o de mezclado, y su extensión determina el volumen de dilución y la concentración de los contaminantes en la atmósfera. La altura de la capa de mezclado depende de la temperatura ambiente y la evolución del calor en la capa. En general, las alturas máximas se observan entre las 14:00 y 16:00 horas, en los meses de abril y mayo, mientras que los valores mínimos se registran en la noche y durante la temporada de invierno[9] (SEDEMA, 2018a).

Dentro de la tropósfera, donde se ubica la capa límite atmosférica, la condición normal es que la temperatura disminuya con la altitud. Sin embargo, en la ZMVM es común que una capa de aire caliente se forme encima de una fría; a este fenómeno se le denomina *inversión térmica*, e impide el movimiento convectivo natural del aire, lo que se traduce en la reducción de la capacidad de dilución de los contaminantes y un aumento en sus concentraciones. En la ZMVM, este tipo de fenómenos ocurren principalmente durante los meses de invierno.

Las inversiones térmicas radiativas o de superficie son las más comunes en la región. En las noches despejadas, el suelo y el aire en contacto con él se enfrían; esta capa de aire fría se vuelve más densa que la capa de aire inmediata superior, generando una inversión térmica que se "rompe" cuando la energía solar iguala la temperatura de las dos capas, permitiendo el transporte vertical de los contaminantes. Este fenómeno se agudiza en la época seca-fría, por la presencia de sistemas anticiclónicos y condiciones atmosféricas estables que provocan descensos de la temperatura y la estratificación de las capas troposféricas. En cambio, durante el verano, la entrada de aire cálido y húmedo proveniente de los océanos favorece procesos de convección e inhibe la formación de inversiones (SEDEMA, 2006).

1.2.4 Suelos

Edafología

Las unidades edafológicas predominantes en la ZMVM se representan gráficamente en la Figura 1.10. Los suelos del tipo feozem son comunes en las zonas más planas y representan un 55.6% del total del territorio. Estos suelos se caracterizan por tener una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y en nutrientes, por lo que coinciden con las zonas de cultivo en la región. Los feozems profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, donde tienen rendimientos altos. A su vez, los feozems más someros se sitúan en laderas o pendientes, teniendo como principal limitante la roca subyacente o alguna cementación muy fuerte en el suelo. Este tipo de suelo es susceptible a la desertificación en áreas donde la actividad humana requiere de sustratos libres de vegetación; esto acelera la erosión hídrica, especialmente en zonas semiáridas y templadas.

8 La tropósfera es la capa superficial de la atmósfera, la cual se extiende hasta una altitud de aproximadamente 10 km (Newman, 2018).

9 Por ejemplo, el promedio de la altura máxima de mezcla en 2017 fue de 2390 m s.n.m., con un intervalo de 729 a 4352 m s.n.m.

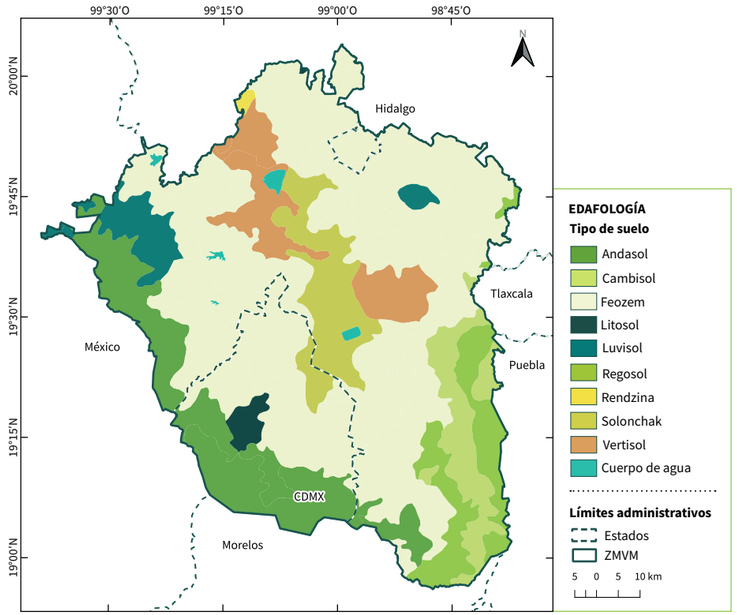


Figura 1.10 Tipos de suelo en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con el conjunto de datos vectoriales de perfiles de suelos (edición 2005), escala 1:1 000 000 (INEGI, 2020a).*

En la región central de la ZMVM también predominan los suelos del tipo solonchack (7.1%) y vertisol (6.7%). Los solonchacks son suelos salinos que se presentan en lechos de lagos y en las regiones más bajas de los valles; en ellos predominan los pastizales y otros tipos de vegetación halófila. Los vertisoles son de textura fina a muy fina y poseen un contenido bajo de materia orgánica; son comunes en climas templados con una marcada estación seca y otra lluviosa, como es el caso de la ZMVM; su uso agrícola es extenso, variado y productivo ya que son muy fértiles, pero su dureza dificulta la labranza; presentan baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización.

En la zona montañosa prevalecen tres tipos de suelo: los andosoles (13.6% del territorio) en las sierras Ajusco-Chichinautzin y de las Cruces, al sur y al oeste; y los regosoles (6.4%) y cambisoles (5.4%) en la sierra Nevada, al este. En condiciones naturales, los andosoles, de origen volcánico, presentan vegetación de bosque. Las actividades agrícolas y el uso pecuario, especialmente ovino, son actividades comunes en la zona a pesar de tener rendimientos bajos en este tipo de suelo. Se caracterizan por ser suelos sueltos con una gran capacidad de retención de humedad, por lo que son susceptibles a la erosión tanto hídrica como eólica, particularmente cuando se encuentran desprovistos de vegetación.

Por su parte, los suelos de tipo regosol y cambisol se presentan en diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Los regosoles muestran poco desarrollo y diferenciación del material parental; frecuentemente son someros y tienen contenidos bajos de materia orgánica, por lo que su fertilidad varía en función de la profundidad y la pedregosidad del terreno. Los cambisoles son suelos jóvenes y poco desarrollados, por lo que en ellos son evidentes los vestigios de la roca madre. Se destinan a muchos usos, con rendimientos variables, y son propensos a la erosión.

Erosión

La erosión es un proceso natural que implica el desgaste, disminución y deterioro del suelo por factores naturales como el agua, el hielo, vientos, cambios térmicos y la precipitación. Esta se ha visto acelerada en las ultimas décadas por las actividades antropogénicas, que incluyen la construcción de infraestructura, actividades agrícolas y la tala de recursos forestales, así como por fenómenos naturales como los incendios forestales y el escurrimiento natural del agua.

De acuerdo con el conjunto de datos de erosión de suelo del INEGI (edición 2014), el tipo predominante de erosión en la ZMVM es hídrica; esto es, la pérdida de la capa superficial por la acción directa del agua. En total, 2024.6 km^2 de la región presentan erosión hídrica, con distintos grados de afectación; de esta área, la mayoría de los impactos se clasifican como leves (54.9%) o moderados (42.3%), con el porcentaje restante correspondiente a sitios afectados fuerte o extremadamente. Otros 43.1 km^2 presentan erosión antrópica, asociada a modificaciones irreversibles del paisaje (por ejemplo, la construcción de caminos y carreteras) que facilitan la acción directa de otros agentes erosivos.

En la Figura 1.11 se observa que la erosión hídrica afecta primordialmente a las faldas de las sierras que enmarcan el valle central de la ZMVM, así como en los lomeríos al noreste y noroeste de la región. En estas zonas se llevan a cabo actividades agrícolas que, aunadas a las diferencias de altitud y a la susceptibilidad natural del tipo de suelo predominante (feozem), crean condiciones favorables para la erosión hídrica. Una vez que el suelo queda desprovisto de vegetación, el agua (en forma de torrente, lluvia o crecida de cuerpos de agua, así como por el efecto del riego) arrastra las partículas del suelo, el cual entra en un proceso de degradación por endurecimiento. El resultado final puede llegar a ser una región completamente desertificada.

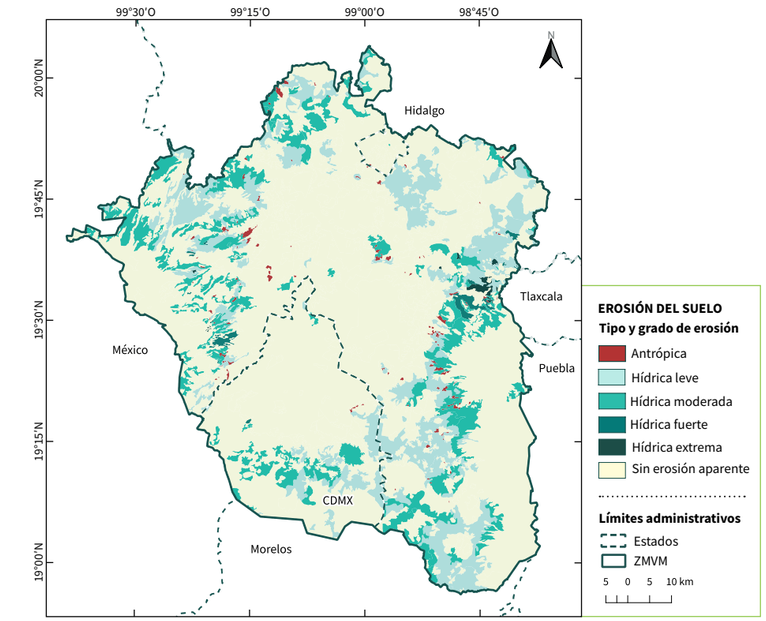


Figura 1.11 Erosión del suelo en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con el conjunto de datos de erosión de suelo, serie I (edición 2014), escala 1:250 000 (INEGI, 2020a).*

La erosión eólica es una fuente natural de partículas suspendidas totales[10] (PST) de origen mineral, las cuales pueden afectar a la salud y al medio ambiente. Estudios de modelación han identificado tres zonas en la ZMVM donde la erosión eólica puede derivar en la suspensión de partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) en el aire ambiente: el lago de Texcoco, el cual históricamente se ha considerado la fuente erosiva principal de partículas en la región (Jáuregui, 1989; López, Villaseñor, Quintanar, & Mora, 1970), y las zonas agrícolas al norte de la ZMVM y entre Chalco y Tenango del Aire (Díaz-Nigenda *et al.*, 2010; Sheinbaum Pardo, Jazcilevich Diamant, Siebe Grabach, & García, 2014). La región del Lago de Texcoco impacta principalmente a la población en el noreste; los modelos muestran que la magnitud de las emisiones ha disminuido notablemente gracias a intervenciones como la construcción del lago Nabor Carrillo y programas para plantar vegetación autóctona. La erosión en Tenango del Aire-Chalco afecta al sur, sureste y centro de la ZMVM, en donde la dirección e intensidad del viento puede tener un efecto significativo sobre la concentración de partículas que se alcanza en sitios específicos. La degradación del suelo por erosión eólica también se agrava por el abandono de suelos agrícolas a medida que la periferia de la mancha urbana se expande (UNAM & INECC, 2016).

Usos de suelo y vegetación

Se realizó un análisis comparativo de las cartas de uso de suelo y vegetación de tres años base: 1985 (Serie I del INEGI), 2002 (Serie III del INEGI) y 2014 (Serie VI del INEGI). En el periodo 1985-2014 la vegetación natural disminuyó principalmente por la conversión a zonas agropecuarias y por el crecimiento de la mancha urbana. El área ocupada por localidades urbanas casi se triplicó, con un crecimiento del 184.3% que afectó principalmente a pastizales y zonas agrícolas, mientras que las zonas agropecuarias se redujeron en un 15.5%. Se observa que los procesos de cambio de uso de suelo han resultado en la urbanización de zonas agrícolas ubicadas en la periferia de la mancha urbana; a su vez, se muestra un incremento de usos de suelo agrícolas en zonas que anteriormente eran forestales, reduciendo la vegetación primaria en 24.5%. En el periodo de estudio también se registró un aumento en la vegetación secundaria del 39.5%, la cual se caracteriza por formarse cuando un tipo de vegetación primario es eliminado o alterado por diversos factores humanos o naturales. La Figura 1.12 muestra gráficamente la distribución de los usos de suelo en los tres años de estudio; en el Anexo 1.2 se indican los cambios históricos en el porcentaje de cobertura por tipo de suelo.

La causa principal de los cambios de uso de suelo y vegetación es el proceso de urbanización. Para el periodo 2011-2030 la tendencia indica un crecimiento de los asentamientos humanos sobre las tierras planas, aptas para la agricultura, las cuales dejarán de ser productivas, así como el crecimiento de vegetación secundaria por la disminución del área de bosques. Los cambios en la cubierta vegetal se relacionan directamente con la calidad del aire; la magnitud de los impactos depende del tipo de vegetación y transición de uso de suelo. La biósfera terrestre es una fuente natural de aerosoles y partículas primarias, así como de COV y NO_X, ambos precursores en la formación de aerosoles secundarios y O_3. La vegetación también actúa como un sumidero de dióxido de carbono (CO_2) y contaminantes atmosféricos a través de procesos de deposición seca: la vegetación puede funcionar como una barrera natural donde se interceptan partículas y aerosoles, mientras que absorbe partículas suspendidas y O_3 (Heald & Spracklen, 2015), lo cual puede tener efectos negativos sobre la vegetación (Calfapietra et al., 2007; Lombardozzi, Sparks, Bonan, & Levis, 2012).

Además de impactar en la concentración en el aire ambiente de O_3 y partículas suspendidas, los cambios de uso de suelo modifican el ciclo biogeoquímico del nitrógeno y generan emisiones tanto de NO_X como de amoniaco (NH_3). Se estima que a nivel global, el 15% de las emisiones de nitrógeno provienen de incendios forestales, mientras que un 10-20% proviene de procesos microbiológicos que ocurren en el suelo. El uso de fertilizantes para la agricultura es otro factor que incrementa las emisiones de precursores de partículas suspendidas como los NO_X y el NH_3 (Heald & Spracklen, 2015).

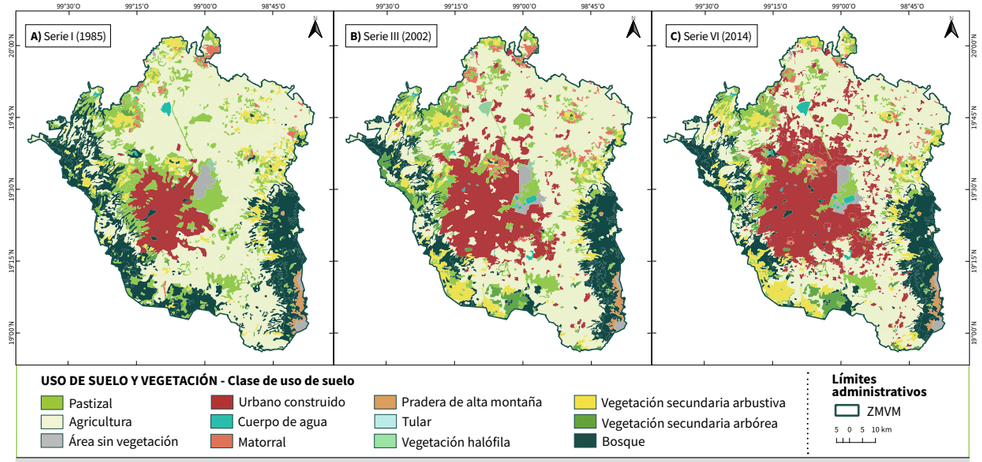


Figura 1.12 Uso de suelo y vegetación en la Zona Metropolitana del Valle de México (1985-2014)
Fuente: *Elaborado con datos de las cartas de uso de suelo (Series I, III y VI), escala 1:250 000 (INEGI, 2020a).*

Finalmente, los cambios de uso de suelo y las emisiones asociadas se ven afectadas por el cambio climático y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). En primer lugar, se espera que el cambio climático modifique procesos naturales de cambio de uso de suelo, como los incendios forestales, las infestaciones por insectos y las sucesiones ecológicas. La "fertilización con dióxido de carbono" describe el proceso por el cual la densidad y productividad de la vegetación incrementa de manera proporcional a la concentración de CO_2 en la atmósfera (Drake, González-Meler, & Long, 1997). Esto provoca un aumento en las emisiones biogénicas de COV como el isopreno y el monoterpeno, así como en la formación de aerosoles secundarios orgánicos; no obstante, otros estudios también han demostrado que niveles elevados de CO_2 pueden inhibir la producción vegetal de isopreno (Possell & Hewitt, 2011). El isopreno, junto con el metano (CH_4), es uno de los flujos más importantes de carbono orgánico reactivo hacia la atmósfera; este compuesto juega un papel fundamental en la formación de O_3 (Wang & Shallcross, 2000) y aerosoles secundarios (Kroll, Ng, Murphy, Flagan, & Seinfeld, 2006).

En el territorio de la ZMVM es posible encontrar distintos ecosistemas y tipos de vegetación. Como se ha expuesto anteriormente, la vegetación funge como una barrera natural que intercepta partículas suspendidas en la atmósfera, además de que interviene en procesos de deposición seca de contaminantes. No obstante, esto puede repercutir negativamente en el desarrollo vegetal. Se ha documentado que la concentración elevada de contaminantes en la atmósfera perjudica a la vegetación, con posibles implicaciones en el crecimiento forestal y los rendimientos de los cultivos (Heald & Spracklen, 2015). Las partículas interceptadas por los árboles a menudo son resuspendidas hacia la atmósfera, son lavadas por la lluvia o caen al suelo junto con hojas y ramas, por lo que se puede decir que la vegetación también actúa como un sitio de retención temporal para muchas partículas atmosféricas (Nowak, Crane, & Stevens, 2006).

Para establecer las particularidades y atributos de los ecosistemas, existen diversos criterios e indicadores que permiten caracterizarlos. Frecuentemente se utiliza el reconocimiento de comunidades vegetales y criterios primordialmente fisionómicos, derivados del biotipo de las especies dominantes y determinados por factores climatológicos, geológicos y edafológicos (Miranda & Hernández, 1963; Rzedowski, 2006).

10 Partículas con un diámetro aerodinámico menor a 100 micrómetros (µm), medidas con un muestreador de alto volumen.

A nivel mundial se emplea la categorización "ecorregional", la cual refleja la distribución de una amplia gama de fauna y flora en todo el planeta, clasificada por regiones biogeográficas y biomas (Olson *et al.*, 2001). Las ecorregiones proveen un marco para la identificación de hábitats representativos y conjuntos de especies; estas son áreas que contienen un conjunto geográficamente distintivo de comunidades naturales, así como condiciones ambientales similares, que interactúan ecológicamente de manera determinante para su subsistencia prolongada. Esta caracterización fomenta un enfoque ecológico común a escala regional e incluye unidades que se subdividen utilizando criterios ambientales, por tipo de vegetación, rasgos fisiográficos como sierras o cuencas, y elementos del clima como humedad y temperatura (Comisión para la Cooperación Ambiental, 1997). Las unidades del nivel ecorregional I permiten distinguir las principales áreas ecológicas a escala global e intercontinental; el nivel II proporciona mayor detalle en la descripción de áreas ecológicas en México, en tanto que el nivel III describe áreas ecológicas más pequeñas, con características regionales y locales más precisas. En la ZMVM se identifican tres ecorregiones de nivel III (ver Figura 1.13):

Lomeríos y Sierras con Bosques de Coníferas, Encino y Mixtos del Centro de México:	Se extiende a lo largo del Eje Neovolcánico. Es la ecorregión predominante en la ZMVM, abarcando 57.7% de la superficie total. La vegetación principal corresponde a extensos bosques de pino, encino, oyamel y mixtos (pino-encino). Esta ecorregión abarca la región sur de la ZMVM, así como las zonas de mayor altitud en los sistemas de sierras y lomeríos al oriente y poniente.
Planicies y Piedemontes del Interior con Pastizal y Matorral Xerófilo:	Se localiza al norte y centro de la ZMVM y ocupa 40.1% del territorio. La vegetación predominante en esta ecorregión son sistemas extensos de pastizales inducidos y halófilos, así como vegetación xerófila crasicaule. Sin embargo, se ha modificado la vegetación natural en las últimas décadas, debido a los cambios de uso de suelo forestal a zonas agrícolas.
Lomeríos y Planicies del Interior con Matorral Xerófilo y Bosque Bajo de Mezquite:	En esta ecorregión prevalecen los matorrales xerófilos-crasicaules y bosques de encino. Ocupa una pequeña porción de la ZMVM (2.2%) en el extremo norte que limita con el estado de Hidalgo.

La cobertura vegetal en la ZMVM está conformada principalmente por tres tipos de bosque (pino, oyamel y encino), un tipo de matorral (crasicaule) y vegetación secundaria arbórea y arbustiva. Los bosques cubren 14.4% de los 7866.1 km^2 de la ZMVM y se distribuyen principalmente al este y suroeste, en las zonas montañosas. Los matorrales predominan al norte y noreste de la región, en donde el clima se vuelve más seco, cubriendo 1.9% de la superficie total. Aproximadamente 8.3% del territorio de la ZMVM corresponde a vegetación secundaria arbustiva y arbórea que ha reemplazado a la vegetación primaria por diversos factores antropogénicos o naturales. Finalmente, en la ZMVM también es posible encontrar pastizales naturales e inducidos (1.3% y 9.2% de la superficie total, respectivamente), así como a otras comunidades vegetales en regiones específicas; ejemplo de esto es la pradera de alta montaña en las inmediaciones de los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl. Para mayor información sobre las características y extensión de los distintos tipos de vegetación en la zona de estudio, consultar el Anexo 1.2.

La ZMVM posee una extensa biodiversidad de flora y fauna, misma que se ve afectada por la degradación de sus recursos por diferentes procesos. Algunos ejemplos de deterioro ambiental son la deforestación, cambios de uso de suelo en zonas forestales y el manejo inadecuado de los bosques, lo cual favorece la propagación de plagas y enfermedades, incendios forestales, tala ilegal, contaminación ambiental y pastoreo excesivo, entre otros (SEDEMA, 2007).

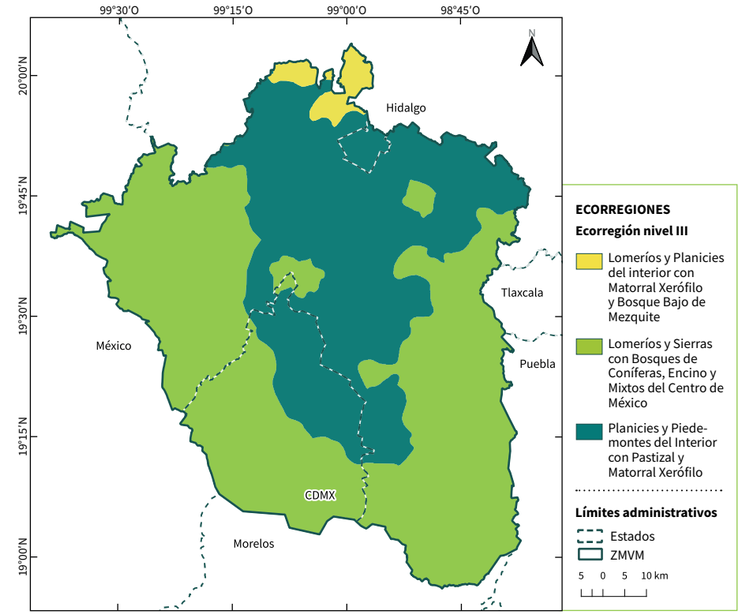


Figura 1.13 Ecorregiones de la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con datos de la Comisión para la Cooperación Ambiental (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2011).*

La flora y fauna que habita en la Ciudad de México representa una gran riqueza natural. Se tienen registradas 2254 especies de fauna, entre gusanos, moluscos, artrópodos, peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos, y 1607 especies de plantas, de las cuales algunas son endémicas de la región (SEDEMA, 2015a). El municipio de Tizayuca, en el estado de Hidalgo, contiene una amplia riqueza vegetal, compuesta principalmente por maguey, nopal, cactus y arbustos leñosos (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2002).

Por su parte, la cubierta vegetal del territorio del Estado de México se encuentra muy fragmentada, particularmente en el Valle de México, donde las actividades humanas han reemplazado casi por completo a los ecosistemas originales, dejando los principales macizos relegados a las zonas de topografía accidentada. El Estado de México cuenta con un registro de 6104 especies de flora, 830 especies de anfibios y reptiles, 134 especies de mamíferos y 535 especies de aves (SMAGEM, 2017).

Dentro de los diferentes niveles de gobierno y de la sociedad civil organizada se han realizado grandes esfuerzos que pretenden conservar la biodiversidad que integra la ZMVM. Estos se manifiestan en la conservación de miles de hectáreas con vegetación original de distintos tipos y con un gran valor paisajístico y estético, así como un valor ambiental por la prestación de servicios ecosistémicos (SMAGEM, 2018a). Algunos ejemplos de estos servicios son la captación y filtración de agua, la mitigación de los efectos del cambio climático, la generación de oxígeno y asimilación de diversos contaminantes, la protección de la biodiversidad, la retención de suelo, el refugio de fauna silvestre y la belleza escénica.

Incendios forestales

Los incendios forestales son la propagación libre y no programada de fuego sobre la vegetación en bosques, selvas y zonas áridas y semiáridas (CONAFOR, 2014). Los más comunes son incendios superficiales que se caracterizan por propagarse de forma horizontal sobre el terreno, con una altura máxima de 1.5 metros. También existen los incendios copa o aéreos y los subterráneos, que son poco comunes, pero más difíciles de controlar.

La magnitud de un incendio forestal dependerá de las condiciones meteorológicas, el tipo de vegetación, el contenido de humedad y la cantidad de material vegetal –el combustible– por unidad de área. Los incendios forestales tienen como consecuencia la pérdida de suelo y el aumento de contaminantes como CO_2, monóxido de carbono (CO), NO_X y partículas suspendidas en la atmósfera; la dirección y los patrones de viento determinarán el transporte atmosférico de estos contaminantes y las afectaciones sobre poblaciones específicas (Bravo, Sosa, Sánchez, Jaimes, & Saavedra, 2002). Además, la disminución de vegetación causada por los incendios expone al suelo a la erosión por viento y lluvia (CENAPRED, s/f).

Los incendios forestales son causados por acciones humanas o por fenómenos naturales, como tormentas eléctricas o erupciones volcánicas. El 99% de los incendios forestales son antropogénicos; algunos causas son las actividades agropecuarias, aunque también pueden acontecer por la quema de basura, fogatas, colillas de cigarro, limpieza de vías en carreteras y al uso del fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales (CONAFOR, 2014).

En la ZMVM, la temporada de incendios abarca principalmente los meses de abril y mayo, durante la época seca-caliente. La Ciudad de México y el Estado de México se encuentran dentro de las primeras cinco entidades con mayor número de incendios forestales en el país, destacando este último como el primer lugar (CONAFOR, 2019). En la ZMVM se registraron 973 incendios en el 2018, 590 en la Ciudad de México y 383 en los municipios conurbados del Estado de México, de los cuales el 63.7% fueron incendios forestales. La superficie siniestrada total fue de 4641.5 hectáreas (ha) y, en proporción al número de incendios, el Estado de México se vio más afectado (2299.7 ha, equivalente al 49.5%). Las demarcaciones que registraron la mayor área siniestrada fueron Milpa Alta y Tlalpan en la Ciudad de México, seguidas por los municipios de Tlalmanalco, Texcoco e Ixtapaluca en el Estado de México. La alcaldía Cuajimalpa y los municipios de Axapusco, Nicolás Romero, Otumba y Villa del Carbón también registraron afectaciones importantes. En el año de análisis no se registraron afectaciones en Tizayuca, Hidalgo. Se destaca que las causas principales de los incendios en el Estado de México son las actividades agropecuarias, en tanto que la Ciudad de México registra un importante número de incendios asociados a actividades vandálicas (CONAFOR, 2019).

Los incendios forestales en la región central del país impactan la calidad del aire en la ZMVM. Los procesos de transporte transfronterizo de contaminantes hacen que los incendios forestales en otras regiones de México también contribuyan al deterioro de la calidad del aire en la metrópoli. Ejemplo de ello sucedió en mayo de 2019, cuando los incendios en la región centro y sur del país, combinados con patrones climáticos desfavorables, intensificaron la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) en la ZMVM, lo que derivó en la activación de una contingencia ambiental atmosférica extraordinaria.

1.2.5 Áreas naturales protegidas

La principal función de un Área Natural Protegida (ANP) es la protección y conservación de recursos naturales de importancia especial, ya sean especies de fauna o flora que se encuentran catalogados bajo algún estatus de riesgo o bien ecosistemas representativos a nivel local. En materia de calidad del aire, la cobertura arbórea presente en estas zonas contribuye a la remoción de partículas suspendidas en el aire y a la absorción de ciertos contaminantes a través de procesos de deposición seca, aunque también contribuye a la emisión de COV biogénicos.

Más del 23% de la ZMVM se encuentra bajo algún estatus de protección como ANP (ver Figura 1.14). En primera instancia, las superficies decretadas como ANP de competencia federal que se ubican dentro de los límites administrativos de la ZMVM, ya sea completa o parcialmente, suman un total de 486.6 km^2; de esta área, el 73.1% se ubica dentro de la zona de estudio. En total se cuentan doce Parques Nacionales: siete en la Ciudad de México, cuatro en el Estado de México y uno compartido por ambas entidades. Se destaca al Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl, localizado al oriente del Estado de México, como el ANP de competencia federal más extensa en la región (CONANP, 2019).

En lo que se refiere a áreas protegidas de competencia local, en la Ciudad de México las ANP estatales cubren 148.6 km^2 y se distribuyen a lo largo de 15 unidades clasificadas bajo distintas categorías[11]: cuatro Zonas de Conservación Ecológica,

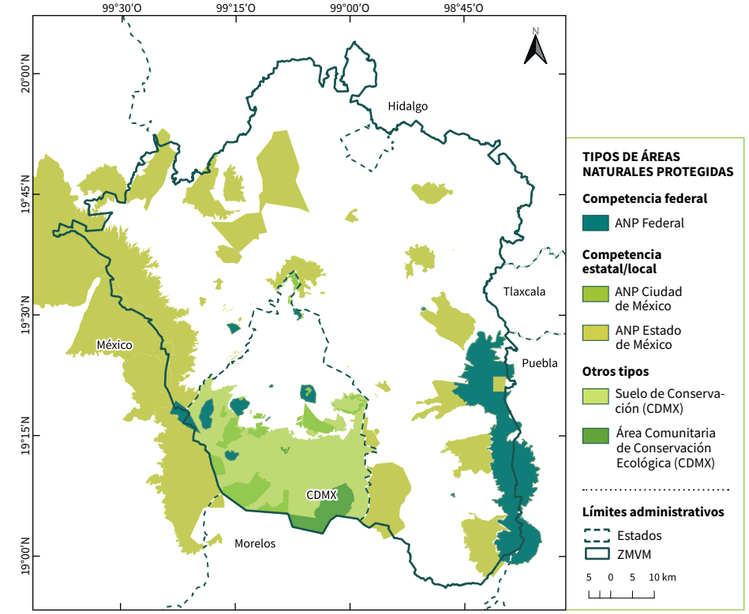


Figura 1.14 Áreas Naturales Protegidas en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con información geoespacial de las Áreas Naturales Protegidas administradas por la SEDEMA (SEDEMA, 2019b), la CEPANAF (CEPANAF, 2020) y la CONANP (CONANP, 2019).*

11 El ANP Sierra de Santa Catarina participa en dos categorías distintas, por lo que en ocasiones se contabiliza como dos ANP, dando un total de 16 áreas de competencia estatal en la Ciudad de México.

una Zona de Protección Hidrológica y Ecológica, dos Zonas Ecológicas y Culturales, cuatro Reservas Ecológicas Comunitarias y cinco Zonas Sujetas a Conservación Ecológica (SEDEMA, 2020a). Además, se tienen dos Áreas Comunitarias de Conservación Ecológica que cubren 76.9 km^2 (SEDEMA, 2019b) al sur de la Ciudad de México, mientras que más de la mitad del territorio (872.9 km^2) de la entidad se clasifica como suelo de conservación (SEDEMA, 2020d).

En los municipios del Estado de México que forman parte de la zona metropolitana, las ANP de competencia estatal o local abarcan un total de 1264.0 km^2 e incluyen Parques Estatales, Parques Municipales, Parques Urbanos, Reservas Ecológicas Estatales y Santuarios del Agua (CEPANAF, 2020).

Las áreas de valor ambiental (AVA) son zonas en donde los ambientes originales han sido modificados por actividades antropogénicas y requieren ser restauradas o preservadas, en función de que aún mantienen ciertas características biofísicas y escénicas, las cuales les permiten contribuir a mantener la calidad ambiental de la región. En la Ciudad de México, bajo la categoría de AVA de Bosque Urbano, se tienen las siguientes: el Bosque de Nativitas, en la alcaldía de Xochimilco; el Bosque San Luis Tlaxialtemalco, en la alcaldía Cuauhtémoc; el Bosque de Chapultepec, en la alcaldía Miguel Hidalgo; el Bosque de San Juan de Aragón, en la alcaldía Gustavo A. Madero; y el Cerro Zacatépetl, en Coyoacán. En conjunto, las AVA abarcan un total de 9.0 km^2 (SEDEMA, 2019a).

Regiones prioritarias para la conservación

La identificación de regiones prioritarias para la conservación de la biodiversidad en México es el resultado de diversas iniciativas auspiciadas por instituciones gubernamentales y no gubernamentales (Arriaga Cabrera, Aguilar, & Espinoza, 2009). Desde 1997, estas iniciativas concentran esfuerzos de investigación y conservación de la biodiversidad, e incluyen las Regiones Terrestres Prioritarias, las Regiones Hidrológicas Prioritarias, las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) y los sitios Ramsar (Humedales de Importancia Internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas).

Las Regiones Terrestres Prioritarias icluyen sitios con un alto valor de biodiversidad en los ambientes terrestres del país, determinados por criterios biológicos, criterios de amenaza para el mantenimiento de la biodiversidad y criterios de oportunidad para su conservación (Arriaga Cabrera *et al.*, 2009). Dentro de la ZMVM se ubican dos regiones de este tipo, el Ajusco-Chichinautzin, al sur de la Ciudad de México, y la Sierra Nevada, al sureste del Estado de México; ambos suman una superficie total de 1099.1 km^2 (CONABIO, 2017).

Las AICA promueven la formación de una red de sitios importantes para el mantenimiento a largo plazo de las poblaciones de ornitofauna en todo el mundo. Dentro de la ZMVM se localizan cuatro AICA: la Ciénega de Tláhuac en la frontera este de la Ciudad de México con el Estado de México; la región denominada “Sur del Valle de México”, que cubre la sierra del Ajusco-Chichinautzin; los volcanes Iztaccíhuatl-Popocatépetl, y el Lago de Texcoco en el Estado de México. Estas cuatro zonas cubren una superficie de 1182.9 km^2 (CONABIO, 2017).

Debido a su valor ecológico excepcional, en la Ciudad de México se une a la lista internacional de sitios Ramsar la “Zona Lacustre Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”, ubicada en el centro-sureste de la ZMVM. Este sitio abarca una superficie de 26.1 km^2 (CONABIO & SEDEMA, 2016) y su importancia, en términos de biodiversidad, está determinada por la flora y fauna acuática y terrestre que en ella habita. Se destaca la presencia de algunas especies vulnerables y de distribución restringida como el ajolote neoténico *(Ambystoma mexicanum)*, además de funcionar como zona de alimentación y reproducción de peces y aves (Aranda Sánchez, 2004).

1.3 Cuenca atmosférica de la ZMVM

Una cuenca atmosférica es un espacio geográfico delimitado parcial o totalmente por características fisiográficas (por ejemplo, elevaciones montañosas), factores climatológicos u otros atributos naturales, el cual es ocupado por un volumen de aire definido con características similares. Este concepto se ha concebido tradicionalmente con base en rasgos geográficos como los valles y las serranías. De esta manera, una cuenca será afectada principalmente por emisiones de origen antropogénico y natural dentro del área de flujo de la misma. No obstante, para la definición de una cuenca, en específico con el objetivo de aplicar medidas tendientes a mejorar la calidad del aire dentro de ella, es necesario considerar los límites en la capacidad de actuación de los entes reguladores de la gestión de la calidad del aire; por esta razón, la definición de una cuenca también obedece a límites administrativos metropolitanos, estatales o municipales. El estudio y gestión de la calidad del aire en la ZMVM, desde una perspectiva de cuenca atmosférica, es prioritario dado el tamaño de los centros urbanos y la intensidad energética y productiva de las actividades industriales en la región.

La definición de una cuenca atmosférica se valida a través de análisis de patrones de viento, cálculos de divergencia y estudios de intercambio de partículas. Como se ha expuesto anteriormente, en la ZMVM, los sistemas orográficos alrededor del valle central actúan como una barrera natural que limita la dispersión de contaminantes emitidos dentro de la cuenca; a su vez, fenómenos meteorológicos de gran escala también influyen en la circulación del aire y generan condiciones de estabilidad e inestabilidad atmosférica que inhiben o favorecen, respectivamente, la dispersión de los contaminantes. En términos físicos, la cuenca atmosférica de la ZMVM está delimitada al sur por la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, al oeste por la Sierra de las Cruces y al oriente por la Sierra Nevada; al norte su delimitación es más difusa pues los intercambios de parcelas de aire se extienden hasta el estado de Hidalgo (UNAM & INECC, 2016).

Diferentes estudios a escala regional y a nivel de cuenca han permitido caracterizar la circulación del viento en la ZMVM, en específico durante las campañas de medición MCMA-2003 (de Foy *et al.*, 2005) y MILAGRO (de Foy *et al.*, 2008). La Figura 1.15 muestra seis patrones de flujo meteorológicos identificados durante estas campañas. Los eventos de tipo venteo-sur se asocian a vientos fuertes que soplan de norte a sur, generando condiciones despejadas y bajos niveles de contaminación. Los días clasificados como O_3-sur presentan tiempos de residencia prolongados por la formación de una zona de convergencia este-oeste que promueve concentraciones elevadas de O_3 en el sur de la ciudad. En contraste, los eventos O_3-norte se caracterizan por vientos del suroeste más fuertes, los cuales generan mejores condiciones de ventilación; en estos casos, el pico de O_3 ocurre al norte. Los eventos de frente frío traen consigo aire húmedo proveniente de la costa del Golfo de México que, cuando se combinan con vientos débiles del oeste, favorecen la convección del aire y precipitación durante las tardes. Este último fenómeno se divide en días donde la convección ocurre más al sur de la ciudad (convección-sur), y en días donde se presenta al norte (convección-norte) (de Foy *et al.*, 2008).

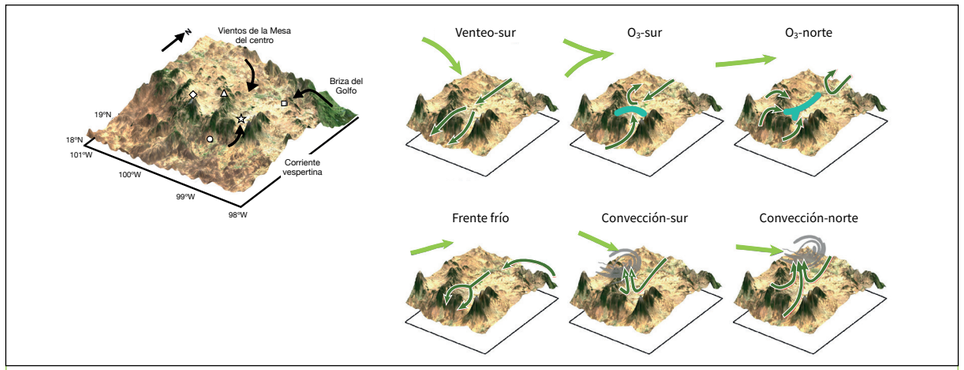


Figura 1.15 Modelo conceptual de la circulación del viento en la cuenca de la Zona Metropolitana del Valle de México durante las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO
Fuente: *Estudios de circulación de viento en la ZMVM (de Foy et al., 2005, 2008).*

Otro factor por considerar es el transporte de contaminantes entre cuencas. Recientemente, el diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México, elaborado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en cooperación con el INECC (UNAM & INECC, 2016), resumió los hallazgos principales de campañas de monitoreo en cuencas vecinas a la cuenca atmosférica del Valle de México y en sitios de intercambio entre cuencas (Garcia-Yee *et al.*, 2017; Salcedo *et al.*, 2012). Estos estudios demuestran el transporte de masas de aire entre el Valle de México y los Valles de Cuernavaca-Cuautla, el Valle de Toluca, la cuenca atmosférica de Puebla-Tlaxcala y las cuencas de Pachuca y Tula.

Los resultados de los estudios antes citados muestran que la cuenca atmosférica de la ZMVM exporta partículas y parcelas (o masas) de aire hacia el norte (Estado de México e Hidalgo) entre enero y marzo; hacia el estado de Morelos de julio a diciembre; hacia el este del Estado de México (Valle de Toluca) de septiembre a diciembre; y en mayo permanecen en el Valle de México y zonas aledañas (UNAM & INECC, 2016).

A su vez, la cuenca atmosférica de la ZMVM recibe emisiones y parcelas o masas de aire de las cuencas aledañas:

- Los valles de Cuernavaca y Cuautla exportan hacia la ZMVM a través de la Sierra del Ajusco-Chichinautzin y el Paso de Tenango del Aire.
- Pachuca exporta hacia el Estado de México a través del corredor Texcoco–Amecameca y Ozumba, principalmente entre junio y diciembre.
- Puebla-Tlaxcala exporta hacia el Valle de México a través del Paso de Tenango del Aire entre junio y septiembre.

La Megalópolis es una gran concentración urbana que se encuentra en la región centro de México, y está conformada por la Ciudad de México, el Estado de México y los estados de Hidalgo, Puebla, Morelos, Tlaxcala y Querétaro (CAMe, 2018a; SEMARNAT *et al.*, 2017). En ella convergen 11 cuencas atmosféricas (ver Figura 1.16) cuya interacción determina la circulación de los vientos, el transporte transfronterizo de contaminantes y su subsecuente impacto sobre la población.

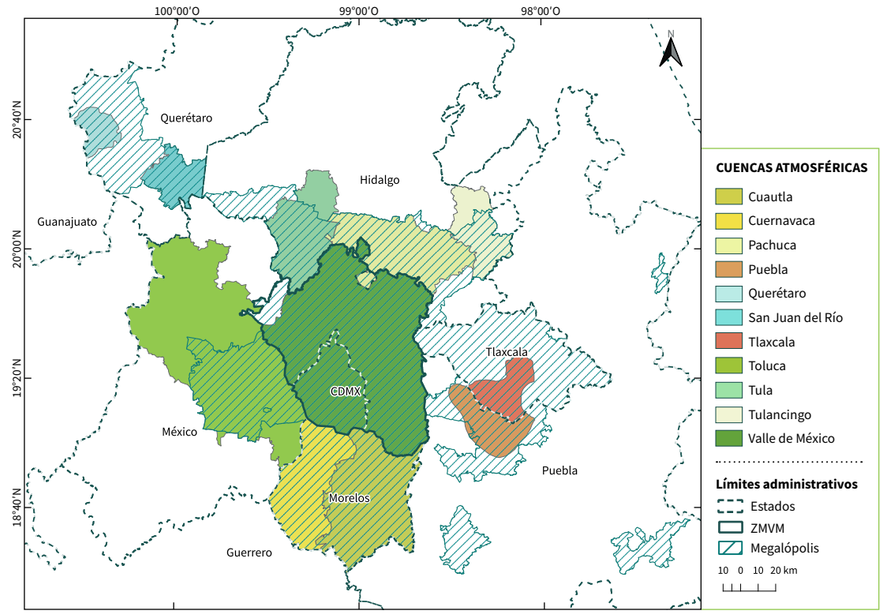


Figura 1.16 Cuencas atmosféricas de la Megalópolis
Fuente: *Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe, 2018a).*

La Megalópolis ha tenido un crecimiento acelerado caracterizado por la reconfiguración de procesos industriales hacia zonas periurbanas del Valle de México, la formación de "ciudades secundarias" y la generación de flujos continuos de personas entre las principales ciudades de la región y las ciudades secundarias, así como flujos semi-continuos de bienes y mercancías. Estas actividades inciden a su vez en el volumen y distribución espacial de las emisiones dentro de la Megalópolis, en donde la cuenca del Valle de México es la más grande, tanto en extensión territorial como en el tamaño de su población y la magnitud de sus emisiones contaminantes (CAMe, 2018a).

El transporte transfronterizo de contaminantes entre cuencas en el centro de México tiene un impacto significativo en la calidad del aire. Diversos estudios basados en modelos, simulaciones, sensores remotos y comparaciones con mediciones *in situ* muestran cómo las emisiones en la ZMVM influyen en la calidad del aire de cuencas adyacentes, así como los impactos de emisiones que ocurren fuera de la cuenca del Valle de México, pero que contribuyen a incrementar los niveles locales de concentración de contaminantes. Por ejemplo, algunos estudios sugieren que la refinería de Tula aporta del 10 al 28% de la concentración de SO_2 en ciertas regiones de la ZMVM (Almanza, Molina, & Sosa, 2012). Por su parte, las emisiones dentro de la ZMVM tienen impactos discernibles en la calidad del aire y la actividad fotoquímica regional, contribuyendo con 10 al 30% de las emisiones de CO y NO_X en un radio de 200 km, aunque los efectos se pueden extender hasta 900 km (Mena-Carrasco *et al.*, 2009). Un ejemplo más es el estudio de García-Yee, donde se demuestra el intercambio de masas de aire entre Cuautla y la ZMVM, a través del paso de Tenango del Aire, el cual implica un flujo neto de masas de aire ricas en O_3 (+10 ppb) hacia la metrópoli (Garcia-Yee *et al.*, 2017).

El transporte transfronterizo de contaminantes no se limita únicamente a las emisiones cotidianas. Cuando ocurren eventos extraordinarios dentro o fuera de la cuenca del Valle de México, y en caso de que las condiciones meteorológicas lo favorezcan, masas de aire con concentraciones inusuales de contaminantes pueden ser transportadas grandes distancias. Ejemplo de esto es el evento ocurrido el 3 de mayo de 2018, en el que una fuga de gasolina de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en Acolman, Estado de México, incrementó la concentración de COV. La masa de aire fue transportada desde el noreste de la ZMVM hacia el este y sur de la Ciudad de México, donde las estaciones de monitoreo registraron un concentración de O_3 con valores fuera de lo normal (CAMe, 2018b).

1.4 Aspectos socioeconómicos

La ZMVM tiene un papel muy importante como centro económico, financiero, político y cultural del país (OCDE, 2015). Sin embargo, el crecimiento poblacional y la producción con modalidades de consumo no sostenibles es el agente de presión más importante sobre los ecosistemas en la región. En una ciudad, el volumen, tasa de crecimiento, estructura y distribución territorial de su población se interrelacionan de forma compleja con procesos de desarrollo económico y social; estos fenómenos son una de las múltiples causas que determinan el nivel de explotación de los recursos naturales, la generación de residuos y la contaminación ambiental en la ZMVM, por mencionar solo algunos ejemplos de deterioro ambiental. A pesar de esto, la población humana tiene la capacidad de implementar acciones para revertir las tendencias de deterioro y conservar el medio ambiente (SEMARNAT, 2012; Velázquez Uribe, 1996).

A continuación se describen algunas de las características sociodemográficas y económicas más importantes de la ZMVM, que se relacionan directamente con el medio ambiente y la contaminación atmosférica en la región.

1.4.1 Demografía

En 2010, la ZMVM, integrada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, contaba con una población total de 20 116 842 habitantes, equivalente al 17.9% de la población nacional (INEGI, 2013a). La Tabla 1.4 desagrega la población de la ZMVM por tipo de demarcación; se incluyen también los valores de población actualizados con los datos reportados en la Encuesta Intercensal 2015 (INEGI, 2015) y las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO) a 2018 y 2020 (CONAPO, 2013b). Los datos por municipio y alcaldía para el año 2010 se reportan en el Anexo 1.1.

Tabla 1.4 Población de la Zona Metropolitana del Valle de México

Tipo de demarcación	Población (habitantes) y porcentaje respecto del total							
	Censo 2010		Encuesta Intercensal 2015		Proyección CONAPO 2018		Proyección CONAPO 2020	
59 municipios del Estado de México	11 168 301	**55.5%**	11 854 629	**56.7%**	12 522 763	**57.7%**	12 786 856	**58.3%**
16 alcaldías de la Ciudad de México	8 851 080	**44.0%**	8 918 653	**42.7%**	9 041 395	**41.7%**	9 018 645	**41.1%**
Tizayuca, Hidalgo	97 461	**0.5%**	119 442	**0.6%**	130 160	**0.6%**	137 165	**0.6%**
ZMVM	**20 116 842**		**20 892 724**		**21 694 318**		**21 942 666**	
México	**112 336 538**		**119 530 753**		**125 327 797**		**127 792 286**	

Fuente: *Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2013a), la Encuesta Intercensal 2015 (INEGI, 2015) y proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).*

En el año 2010, 12 de las 76 demarcaciones de la ZMVM tenían más de 500 mil habitantes, agrupando más de la mitad de la población de la ZMVM; de estos entes administrativos, seis eran alcaldías de la Ciudad de México y el resto municipios del Estado de México (ver Tabla 1.5). Según datos de la Encuesta Intercensal 2015, para ese año otros dos municipios del Estado de México, Atizapán de Zaragoza y Tultitlán, habrían superado la marca del medio millón de residentes, en tanto que para 2020 la CONAPO estima que también Tecámac e Ixtapaluca rebasarían este umbral.

Tabla 1.5 Demarcaciones de la Zona Metropolitana del Valle de México con más de 500 000 habitantes

No.	Demarcación	Entidad	Población (2020)	No.	Demarcación	Entidad	Población (2020)
1	Iztapalapa	CDMX	1 815 551	9	Tlalpan	CDMX	682 234
2	Ecatepec de Morelos	EdoMex	1 707 754	10	Coyoacán	CDMX	621 952
3	Gustavo A. Madero	CDMX	1 176 967	11	Cuautitlán Izcalli	EdoMex	577 190
4	Nezahualcóyotl	EdoMex	1 135 786	12	Atizapán de Zaragoza	EdoMex	557 108
5	Naucalpan de Juárez	EdoMex	910 187	13	Tultitlán	EdoMex	556 493
6	Tlalnepantla de Baz	EdoMex	756 537	14	Ixtapaluca	EdoMex	551 034
7	Álvaro Obregón	CDMX	755 537	15	Cuauhtémoc	CDMX	548 606
8	Chimalhuacán	EdoMex	720 207	16	Tecámac	EdoMex	500 585

Fuente: *Proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).*

En términos de estructura, la población de la zona metropolitana sigue la tendencia observada a nivel nacional. De las 20.12 millones de personas que habitaban en la metrópoli en 2010, 51.63% eran mujeres y 48.37% hombres. Para 2020, la CONAPO proyectaba que dichos porcentajes se mantendrían iguales. En 2010 la población en edad de 0 a 4 años correspondía al 8.25% del total, valor por debajo del promedio nacional (9.49%). Las niñas, niños y adolescentes de 5 a 14 años sumaban el 17.25%, en tanto que las personas de más de 65 años representaban el 6.22% de la población de la ZMVM. La fracción restante corresponde a la población en edad productiva (entre 15 y 64 años) con una participación del 68.28%. Para 2020, las proyecciones indican que la población de 0 a 4 años representará el 6.80% del total, las niñas, niños y adolescentes (5 a 14 años) el 14.48% y las personas mayores de 65 años el 8.69%.

Se observa que la base de la pirámide poblacional comienza a ser más angosta en la región inferior (ver Figura 1.17), lo cual indica que la población infantil y juvenil ha reducido su peso relativo. Otro indicador que representa este mismo fenómeno es la edad mediana de la población, es decir, la edad que divide en dos mitades iguales a los residentes de la ZMVM, que en 2010 era igual a 28 años, pero que para 2020 estará entre los 30 y 34 años según las proyecciones de CONAPO.

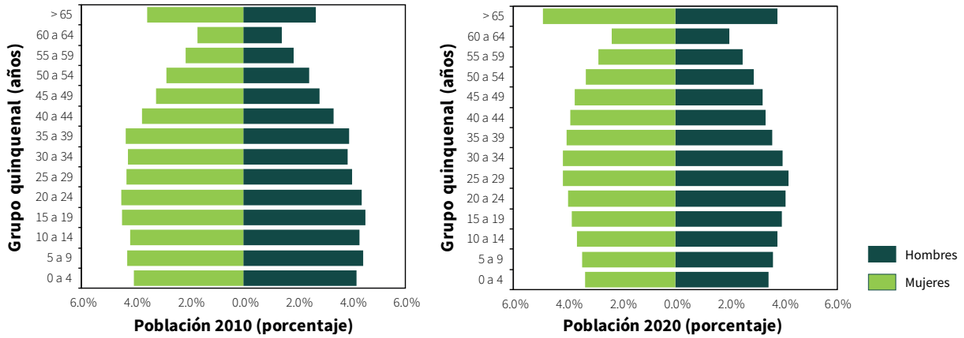


Figura 1.17 Pirámide poblacional de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2010 y proyección al 2020
Fuente: *Elaborado con datos del Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2013a) y proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).*

Existe también una relación positiva entre la población en edades dependientes (niñas, niños y personas adultas mayores de 65 años) y la población productiva. La relación de dependencia muestra que en 2010 habían 46.5 personas dependientes por cada 100 productivas. Si se analizan por separado la dependencia infantil contra la dependencia de la población mayor a 65 años, los valores que se obtienen son iguales a 37.3 y 9.1 personas dependientes por cada 100 individuos entre 15 y 64 años.

De acuerdo con los datos censales más recientes (2000 – 2010), el peso relativo de la población en edad laboral se mantuvo estable, con una reducción prevista hacia 2030, como indican las pirámides poblacionales. A su vez, la proporción de la población infantil y adolescente disminuyó, y el de la población por encima de los 65 años incrementó, patrón que se espera continúe en las siguientes décadas a medida que prosigue la transición demográfica (Almejo & Téllez, 2016), en la cual la esperanza de vida va en aumento mientras que la fecundidad tiende a valores bajos (CONAPO, 2017). Se concluye que existe una tendencia al envejecimiento de la población en la ZMVM, por lo que se incrementará el peso relativo de este grupo, el cual es más vulnerable a la mala calidad del aire (en el Capítulo 6 se detalla información sobre los impactos a la salud por la contaminación atmosférica).

Distribución de la población

En 2010, 97.3% de población de la ZMVM vivía en localidades urbanas[12]. Como sucede en la mayoría del país, gran parte del territorio de la zona metropolitana no está urbanizado, por lo que la mancha urbana constituía únicamente 29.3% (2302.8 km^2) de la superficie total durante el ejercicio censal respectivo. Estas localidades se concentran en la mitad septentrional de la Ciudad de México y los municipios aledaños en el Estado de México, donde la mancha urbana forma un continuo que, a medida que se acerca a las periferias de la ZMVM, comienza a fragmentarse hasta formar localidades individuales. Es así que los usos de suelo urbanos cubrían 55.2% de la Ciudad de México (825.6 km^2), 23.5% de los 59 municipios mexiquenses (1477.2 km^2) y 42.3% de Tizayuca, Hidalgo.

12 El INEGI define como localidades urbanas a aquellas con una población igual o mayor a 2500 habitantes y también a todas las cabeceras municipales, aunque no alcancen este umbral.

La densidad media urbana[13] de la ZMVM en 2010 era de 160.1 habitantes por hectárea (hab./ha), el valor más alto de todas las zonas metropolitanas del país y 47.8% por encima de la media nacional (CONAPO *et al.*, 2018). Este indicador da cuenta del grado en que se concentra espacialmente la población urbana de una ciudad, municipio o localidad.

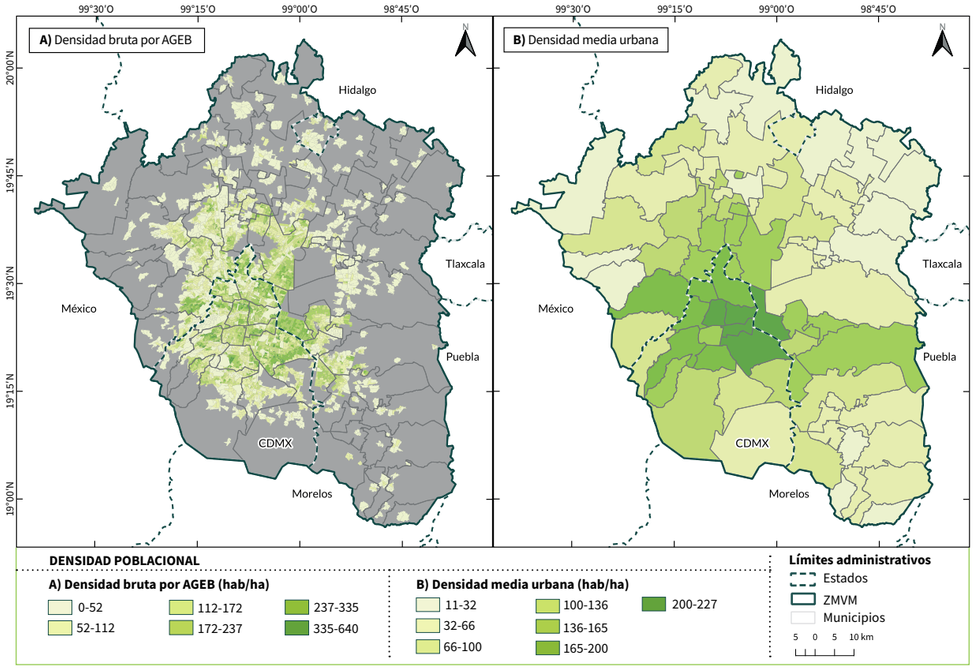


Figura 1.18 Densidad poblacional en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con datos del Censo de Población y Vivienda 2010 a nivel de AGEB (INEGI, 2013a) y la Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015 (CONAPO et al., 2018).*

Bajo el criterio de densidad media urbana, la demarcación político-administrativa más densa es el municipio de Nezahualcóyotl, con un valor de 226.8 hab./ha, siguiendo en orden de magnitud cuatro alcaldías de la Ciudad de México: Cuauhtémoc (215.6 hab./ha), Iztapalapa (215.4 hab./ha), Iztacalco (210.4 hab./ha) y Venustiano Carranza (209.5 hab./ha). En la Figura 1.18 se muestra gráficamente la densidad de población bruta a nivel de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) que integran la mancha urbana de la ZMVM, así como las demarcaciones de la metrópoli en función de su densidad media urbana.

En términos de densidad bruta, la ZMVM tiene aproximadamente 8500 habitantes por km^2. De acuerdo con las Naciones Unidas, una densidad bruta de al menos 15 000 habitantes por km^2 se considera apropiada para promover un crecimiento densificado, limitar la expansión urbana y maximizar el uso de suelo (UN-Habitat, 2016). En comparación, zonas metropolitanas como

13 La densidad media urbana se calcula a partir de la densidad bruta (población por unidad de superficie) de las AGEB que conforman una localidad, municipio o estado, ponderada por el tamaño de su población. De esta forma se toma en cuenta que en las demarcaciones habrán AGEB urbanas con una gran extensión territorial, pero con muy pocos habitantes, sobre todo en las periferias de las áreas urbanas, donde el crecimiento y la ocupación suele ser paulatino. La densidad media urbana de cada municipio de la ZMVM se reporta en el Anexo 1.1.

Mumbai, São Paulo, Shanghái y Nueva York, con poblaciones que rondan los 20 millones de habitantes, tienen densidades de 27 800, 9300, 5200 y 1900 habitantes por km^2, respectivamente. Tokio, la metrópoli más poblada con más de 35 millones de habitantes, tiene una densidad bruta de 5400 habitantes por km^2, en tanto que Dhaka, Bangladesh, es el área urbana más densa en el mundo, con 40 mil habitantes por km^2 y una población de 13.5 millones de personas (UN-Habitat & New York University, 2016).

Dinámica de la población

El crecimiento físico de la ZMVM es un factor que presiona y degrada el medio ambiente, e incide en la vulnerabilidad y el riesgo (Almejo & Téllez, 2016). Entre 2000 y 2010, la tasa media de crecimiento anual (TMCA) de la población de la región fue de 0.90%, evidenciando una reducción en la rapidez de crecimiento de la ZMVM en comparación con la década anterior, la cual presentó una TMCA de 1.69%. No obstante, el crecimiento fue equivalente a la adición de 1.72 millones de personas. CONAPO estima que esta desaceleración continuará en las décadas siguientes: entre 2010 y 2020, se estima que la TMCA será del 0.87%, y para el periodo 2020-2030 se reducirá a 0.40%. Para el 2030 la población de la ZMVM será de 22.83 millones de habitantes y continuará aumentando hasta alcanzar un pico cerca de 2040 (ver Figura 1.19). La desaceleración del crecimiento observada es resultado de la baja en la fecundidad, el aumento en la esperanza de vida y variaciones en la migración, que en conjunto determinan cómo es que crece la población (CONAPO, 2017).

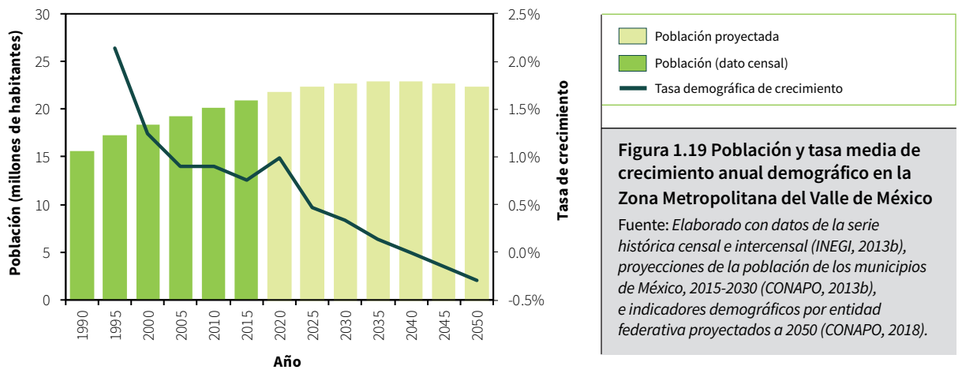


Figura 1.19 Población y tasa media de crecimiento anual demográfico en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Elaborado con datos de la serie histórica censal e intercensal (INEGI, 2013b), proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b), e indicadores demográficos por entidad federativa proyectados a 2050 (CONAPO, 2018).*

La distribución de los distintos grupos de población en la ZMVM es heterogénea, y también lo es su crecimiento. En las décadas pasadas, la población en las zonas periféricas creció más rápido que la del núcleo urbano. La vivienda y el crecimiento poblacional se ha extendido hacia la periferia de la Ciudad de México, a sitios donde la regulación del uso del suelo y su aplicación tienden a ser menos restrictivas y la vivienda suele ser más asequible. Sin embargo, en el núcleo metropolitano se siguen concentrando fuentes de empleo, comercios y servicios, incidiendo en las dinámicas de traslado de la población; por ejemplo, en la ZMVM más del 40% de la población cruza al menos una frontera municipal para llegar a su trabajo (OCDE, 2015). Del total de viajes originados en la zona conurbada de la ZMVM, 13.2% se dirigen hacia la Ciudad de México, mientras que 12.5% de los viajes originados en esta última tienen como destino alguno de los municipios del Estado de México o Tizayuca, Hidalgo (INEGI, 2017b). El creciente alejamiento entre los centros residenciales y los centros de empleo ha provocado un aumento en las distancias y, por lo tanto, en el uso de medios de transporte colectivos y privados, así como de los tiempos de traslado, los kilómetros recorridos por vehículo y las emisiones netas de contaminantes. Por ejemplo, la duración promedio de un viaje en la ZMVM, independientemente de su propósito (ir al hogar, trabajo, estudio otro), es de 43 minutos (INEGI, 2017b).

La TMCA en los municipios conurbados del Estado de México en el periodo 2000-2010 fue casi cinco veces mayor que la tasa en la Ciudad de México. El menor crecimiento de la ciudad central en favor de los municipios periféricos es evidente al comparar las TMCA por municipio durante el periodo citado, análisis representado gráficamente en la Figura 1.20. De las 20 demarcaciones con los más altos ritmos de crecimiento poblacional, 18 pertenecen al Estado de México, incluyendo los primeros cuatro lugares: Huehuetoca, Chicoloapan, Acolman y Tecámac, con tasas entre el 7 y 10%; destaca Tizayuca, Hidalgo, en la quinta posición, y la alcaldía Milpa Alta en el número 17 con una tasa alrededor del 3%.

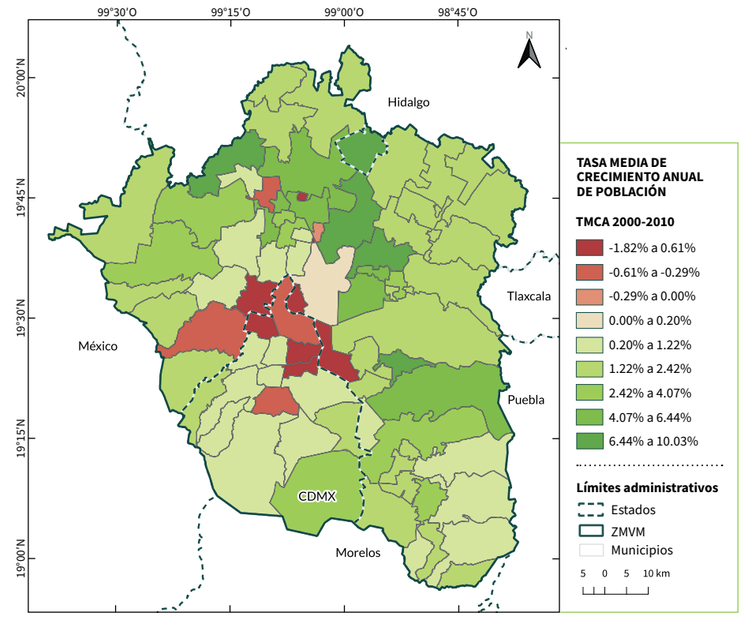


Figura 1.20 Tasa media de crecimiento anual demográfico por demarcación (2000-2010)

Fuente: *Elaborado con datos de la serie histórica censal e intercensal (INEGI, 2013b).*

Entre las 20 demarcaciones con menor crecimiento, 10 son alcaldías de la Ciudad de México y otros cinco son municipios del Estado de México conurbados con la Ciudad de México y que forman parte de un primer contorno urbano (Almejo & Téllez, 2016; Centro Mario Molina, 2012). Un total de 10 demarcaciones mostraron TMCA negativas, incluyendo cinco alcaldías de la Ciudad de México, que son, en orden de magnitud de la disminución de la población, Venustiano Carranza, Iztacalco, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero y Coyoacán. En esta misma situación se encuentran tres municipios del Estado de México con una población superior a 500 mil personas: Nezahualcóyotl, Tlalnepantla de Baz y Naucalpan de Juárez. Las proyecciones de población

indican que en el futuro estas tendencias se acrecentarán. A partir de 2025, la Ciudad de México tendrá una tasa de crecimiento demográfico negativa, mientras que en los municipios del Estado de México y Tizayuca continuarán siendo positiva, aunque con una aceleración cada vez más baja (ver Tabla 1.6).

El crecimiento poblacional y la expansión de las ciudades se asocia a la modificación o pérdida de usos de suelo agrícolas y/o ecosistemas naturales, lo cual pone en riesgo el equilibrio ecológico. De igual forma, se reduce el área de vegetación disponible para prevenir la erosión y capturar emisiones contaminantes y partículas presentes en el aire. Estos efectos se dan de forma primordial bajo un modelo de crecimiento urbano expansivo, en el que una ciudad crece más rápido en términos de superficie que de población.

Tabla 1.6 Crecimiento demográfico en la Zona Metropolitana del Valle de México

Año	Ciudad de México		Estado de México		Tizayuca, Hidalgo		ZMVM	
	Población	**TMCA**	**Población**	**TMCA**	**Población**	**TMCA**	**Población**	**TMCA**
1990	8 235 744	-	7 297 758	-	30 293	-	15 563 795	-
1995	8 489 007	**0.61%**	8 769 175	**3.74%**	39 357	**5.37%**	17 297 539	**2.13%**
2000	8 605 239	**0.27%**	9 745 094	**2.13%**	46 344	**3.32%**	18 396 677	**1.24%**
2005	8 720 916	**0.27%**	10 462 421	**1.43%**	56 573	**4.07%**	19 239 910	**0.90%**
2010	8 851 080	**0.30%**	11 168 301	**1.31%**	97 461	**11.49%**	20 116 842	**0.90%**
2015	8 918 653	**0.15%**	11 854 629	**1.20%**	119 442	**4.15%**	20 892 724	**0.76%**
2020	9 018 645	**0.22%**	12 786 856	**1.53%**	137 165	**2.81%**	21 942 666	**0.99%**
2025	8 922 674	**-0.21%**	13 386 916	**0.92%**	147 884	**1.52%**	22 457 474	**0.46%**
2030	8 773 420	**-0.34%**	13 915 013	**0.78%**	145 738	**-0.29%**	22 834 171	**0.33%**

Fuente: *Serie histórica censal e intercensal (INEGI, 2013b) y las proyecciones de población de los municipios de México, 2015-2030 (CONAPO, 2013b).*

En el año 2010 la superficie urbana era de 2302.8 km^2. Si esta continúa creciendo bajo un modelo tendencial[14], es decir que se repliquen los patrones de años anteriores, para el año 2030 su superficie será de 3285 km^2 (CAPSUS S.C., 2018a, 2018b). Esto equivale a un incremento en el área urbana del 42.6%, mientras que en el mismo periodo se estima que la población aumente únicamente en 9.3%. El crecimiento expansivo reduce la densidad poblacional y merma la proximidad a equipamiento urbano, servicios y empleo, al mismo tiempo que aumenta el gasto promedio y los tiempos de traslado de la población; a su vez, esto genera un incremento en las emisiones de contaminantes asociadas a la movilidad poblacional. La Figura 1.21 muestra gráficamente la expansión tendencial modelada.

14 La estimación del escenario tendencial utiliza modelos estadísticos y herramientas computacionales (aprendizaje de máquinas) para simular y predecir patrones de expansión urbana. Los datos de entrada son las capas de cobertura de uso de suelo del INEGI (Serie II, III y VI) y variables explicativas que conducen o inciden en cómo se transforma la cobertura de uso de suelo, incluyendo la topografía, la distancia hacia carreteras y la distancia entre áreas urbanas. Para la topografía se retoma el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0). La distancia hacia carreteras se genera a partir de la Red Nacional de Caminos del Instituto Mexicano del Transporte, en colaboración con el INEGI. La distancia entre áreas urbanas se extrae de los polígonos correspondientes a asentamientos humanos de la capa de coberturas del suelo.

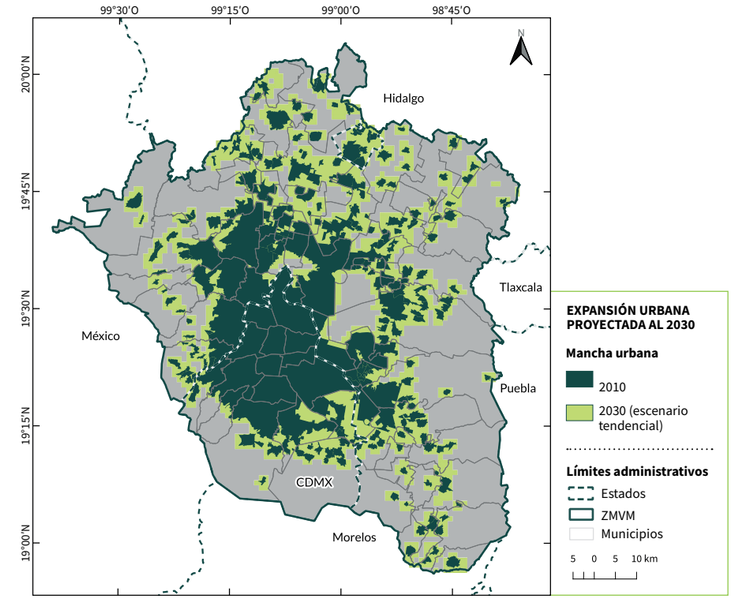
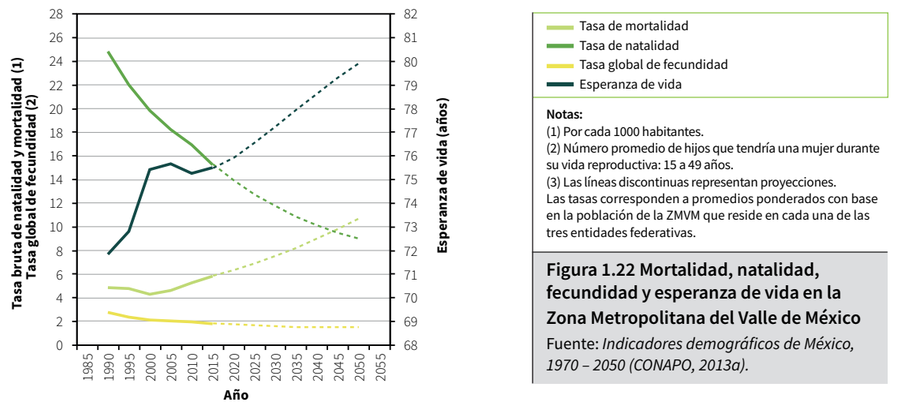


Figura 1.21 Expansión urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México proyectada a 2030

Fuente: *Escenarios de crecimiento tendencial en la ZMVM (CAPSUS S.C., 2018a, 2018b).*

Crecimiento natural de la población

Dentro de la ZMVM se prevé que la población continúe aumentando en las siguientes décadas (CONAPO, 2013b). Sin embargo, según proyecciones de CONAPO, el ritmo de crecimiento será cada vez menor, lo cual está asociado a la disminución de la tasa bruta de natalidad, al incremento en la esperanza de vida, la disminución de la fecundidad y cambios en la tasa bruta de mortalidad de la población (ver Figura 1.22). La interacción entre estos fenómenos incide en la tasa de crecimiento natural de la ZMVM, la cual toma en cuenta el número de nacimientos menos el número total de defunciones de la población en un periodo de tiempo específico.



Notas:
(1) Por cada 1000 habitantes.
(2) Número promedio de hijos que tendría una mujer durante su vida reproductiva: 15 a 49 años.
(3) Las líneas discontinuas representan proyecciones.
Las tasas corresponden a promedios ponderados con base en la población de la ZMVM que reside en cada una de las tres entidades federativas.

Figura 1.22 Mortalidad, natalidad, fecundidad y esperanza de vida en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Indicadores demográficos de México, 1970 – 2050 (CONAPO, 2013a).*

Los registros en Hidalgo, el Estado de México y la Ciudad de México indican que la tasa de crecimiento natural ha disminuido en las tres entidades, y se espera que continúe decreciendo en un futuro, según proyecciones de CONAPO. Como resultado, la población continuará incrementando a un ritmo cada vez menor, y para 2045 la tasa de crecimiento natural en la ZMVM llegará a ser negativa, dado que se tendrán un mayor número de defunciones que de nacimientos. En el Anexo 1.3 se describen a mayor detalle los fenómenos que inciden en la tasa de crecimiento natural de la población, tales como los cambios en la natalidad, la mortalidad, la fecundidad y la esperanza de vida.

Migración

El crecimiento total de una población está dado por la variación de nacimientos, defunciones y movimientos migratorios; esto es, la suma algebraica de la tasa de crecimiento natural y la tasa de migración. En la ZMVM los fenómenos migratorios tienen una magnitud comparable con las tasas netas de natalidad y mortalidad. Debido al tamaño demográfico y geográfico de la ZMVM, así como su alta intensidad económica, hay una elevada capacidad tanto de expulsión como de atracción de población, desde y hacia la zona metropolitana, sobre todo en términos de migración y movilidad laboral. La dinámica de la región central del país continúa mostrando que en la ZMVM existe una elevada interacción e integración socioeconómica con ciudades circundantes (Romo Viramontes & Velázquez Isidro, 2018).

Hay una ausencia generalizada sobre información de flujos migratorios recogida en los censos de población antes del año 2000. Además, se atiende principalmente la migración internacional y la interestatal, dejando de lado los desplazamientos intraestatales. Sin embargo, la Encuesta Nacional de Migración en Áreas Urbanas permite estimar la inmigración y emigración en la ZMVM desde 1965. En la Tabla 1.7 se muestra información del número de migrantes hacia y desde la ZMVM, para los quinquenios previos a los censos de población, de 1970 a 2010, así como los conteos intercensales de 2005 y 2015. En la última mitad del siglo pasado se muestra un importante decaimiento de la tasa de inmigrantes hacia la ZMVM (Partida-Bush, 2013). A partir de la década de los noventa, el saldo neto migratorio en la ZMVM es negativo, indicando que, desde entonces, han sido más los casos de emigrantes que de inmigrantes en esta zona metropolitana.

La migración intraestatal, o migración interna, también incide en la calidad del aire; los medios de transporte públicos y privados utilizados por la población migratoria para realizar viajes cotidianos incide en la emisión de contaminantes. De 2010 a 2015, más de 1.2 millones de residentes de la ZMVM reportaron un cambio de residencia entre demarcaciones que forman parte de la metrópoli; esto corresponde a una tasa de 11.5 migrantes intrametropolitanos al año por cada 1000 habitantes. Asimismo, 40.3% de la población ocupada en la zona de estudio reporta trabajar en otro municipio diferente al de su residencia, por lo que entran bajo la clasificación de *commuters* (Romo Viramontes & Velázquez Isidro, 2018) que se desplazan regularmente.

Tabla 1.7 Tasa de migración para la Zona Metropolitana del Valle de México, 1970-2015

	Tasa de migración por periodo quinquenal (migrantes por cada 1000 habitantes)						
Tasa	**1965-1970**	**1975-1980**	**1985-1990**	**1995-2000**	**2000-2005**	**2005-2010**	**2010-2015**
Inmigración	20.8	11.3	7.3	5.9	3.3	4.3	3.0
Emigración	3.2	7.3	11.1	7.4	4.7	7.1	3.9
Saldo neto migratorio	**17.6**	**4.0**	**-3.8**	**-1.5**	**-1.4**	**-2.8**	**-0.9**

Fuente: *Datos de Partida-Bush (2013) para el periodo 1970-2010 y de Romo Viramontes & Velázquez Isidro (2018) para el ejercicio 2010-2015.*

En cuanto a movilidad diaria entre zonas metropolitanas circundantes, en la ZMVM trabajan aproximadamente 317 mil personas que viven fuera de esta, mientras que 212 mil habitantes se trasladan a un municipio no metropolitano para laborar. Estos patrones de movilidad de población predominan en la ZMVM y la zona metropolitana de Toluca: poco menos de 42 mil personas se trasladan a trabajar a la ZMVM, mientras que 24 mil *commuters* que viven en la ZMVM y salen de esta, se dirigen a Toluca. Otros flujos importantes se detectan entre la ZMVM y las zonas metropolitanas de Pachuca, Cuernavaca, Puebla-Tlaxcala y Querétaro (Romo Viramontes & Velázquez Isidro, 2018). La Tabla 1.8 muestra el intercambio de *commuters* entre la ZMVM y seis zonas metropolitanas circundantes; los valores corresponden al número de personas que viven en un zona metropolitana y trabajan en otra, por lo que se desplazan con frecuencia entre ellas.

Tabla 1.8 Intercambio de commuters entre la Zona Metropolitana del Valle de México y otras zonas metropolitanas

	Número de *commuters* según zona metropolitana de origen/destino (2015)					
	Puebla-Tlaxcala	**Toluca**	**Querétaro**	**Cuernavaca**	**Pachuca**	**Tlaxcala-Apizaco**
Commuters que trabajan en la ZMVM y residen en otra zona metropolitana	7580	41 755	3244	8229	10 090	2300
Commuters que residen en la ZMVM y trabajan en otra zona metropolitana	4867	23 933	23 933	3712	4911	1180

Fuente: *Romo Viramontes & Velázquez Isidro (2018).*

Vivienda

En el Censo de Población y Vivienda 2010 se registraron un total de 5 311 593 viviendas habitadas en la ZMVM, de las cuales 5 310 552 correspondían a viviendas particulares, mientras que el resto eran viviendas colectivas[15]. Las viviendas particulares pueden ser de distintos tipos; se destacan las casas independientes, los departamentos en edificios y las viviendas en vecindad como las categorías predominantes. Otras tipologías son los cuartos en azoteas, locales no construidos para habitación, vivienda móvil y refugios. La Tabla 1.9 muestra la distribución del total de viviendas en la ZMVM por tipo y clase. El tipo de vivienda predominante son las casas independientes, con 74.9%, seguidas de departamentos en edificios, cuya distribución es mayor en la Ciudad de México. Respecto del número de habitantes por vivienda particular habitada, el promedio para toda la ZMVM fue de 3.8 según el ejercicio censal de 2010. En el Anexo 1.3 se detalla información sobre el número de viviendas habitadas y deshabitadas por municipio y alcaldía.

15 Una vivienda colectiva es aquella que proporciona alojamiento a personas que comparten o se someten a normas de convivencia y comportamiento por motivos de salud, educación, disciplina, religión, trabajo y asistencia social, entre otras razones, y que en el momento del levantamiento del censo tiene residentes habituales, pero que no es objeto de atención del ejercicio censal.

Tabla 1.9 Número de viviendas en la Zona Metropolitana del Valle de México por tipo y clase

		ZMVM	Ciudad de México	Estado de México	Tizayuca, Hidalgo
Número de viviendas habitadas		**5 311 593**	**2 453 770**	**2 832 494**	**25 329**
Número de viviendas particulares habitadas		**5 310 552**	**2 453 031**	**2 832 194**	**25 327**
% por clase de vivienda particular	Casas independientes	**74.91%**	**61.85%**	**86.07%**	**92.21%**
	Departamentos en edificios	**17.09%**	**28.73%**	**7.14%**	**1.25%**
	Viviendas en vecindad	**4.83%**	**5.69%**	**4.12%**	**1.61%**
	Otros	**0.23%**	**0.39%**	**0.10%**	**0.12%**
	No especificado	**2.93%**	**3.35%**	**2.56%**	**4.82%**
Número de viviendas colectivas habitadas		**1041**	**739**	**300**	**2**

Fuente: *Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2013a).*

1.4.2 Actividad Económica

La ZMVM produce aproximadamente un cuarto del Producto Interno Bruto (PIB) nacional (23%). Según la definición de zona metropolitana, comparable internacionalmente y utilizada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el Valle de México representa el 17% de la población total y el 18% de las empleadas y empleados del país (OCDE, 2015), quienes laboran en una variedad de actividades económicas.

De acuerdo con el INEGI, las actividades económicas se dividen en tres categorías: primarias, secundarias y terciarias (INEGI, 2012a). En 2018, estos sectores generaron dentro de la ZMVM un monto de 5.09 billones de pesos corrientes, siendo el sector terciario el de mayor aportación, con 86.4%. La Tabla 1.10 desagrega el PIB metropolitano por tipo de actividad y región, mientras que la Tabla 1.11 muestra la distribución de la población ocupada que reside dentro de los límites administrativos de la ZMVM, por sector económico.

Tabla 1.10 Producto Interno Bruto de la Zona Metropolitana del Valle de México

	Producto Interno Bruto 2018 (millones de pesos corrientes)			
Sector	**Nacional**	**ZMVM***	**Ciudad de México**	**Estado de México**
Primario	$795 383	$5358	$27	$5332
Secundario	$7 268 243	$686 266	$370 680	$315 585
Terciario	$14 127 538	$4 402 121	$3 263 461	$1 138 660
Total	**$22 191 164**	**$5 093 745**	**$3 634 168**	**$1 459 576**

*Se excluye al municipio de Tizayuca al no contar con información del PIB municipal desagregado por sector.

Fuente: *Elaborado con datos de PIB municipal (2018) para el Estado de México (IGECEM, 2019) y datos de PIB por entidad federativa del Banco de Información Económica (INEGI, 2016).*

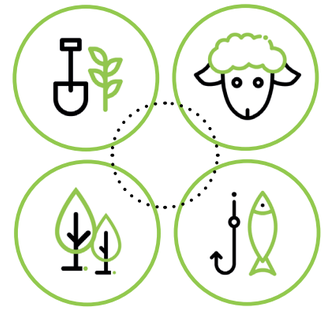
Tabla 1.11 Población ocupada por sector económico en la Zona Metropolitana del Valle de México

		Población ocupada			
Sector		**ZMVM**	**Ciudad de México**	**Estado de México**	**Tizayuca**
Primario		82 101	19 705	61 643	753
Secundario		1 723 999	599 381	1 110 369	14 249
Terciario	Comercios	1 907 336	811 971	1 085 776	9589
	Servicios	4 832 108	2 483 182	2 328 050	20 876
No especificado		250 438	119 034	130 495	909
Total		**8 795 982**	**4 033 273**	**4 716 333**	**46 376**

Fuente: *Encuesta Intercensal 2015 (INEGI, 2015).*

A continuación se describe la intensidad y distribución de las actividades económicas en la ZMVM, con base en información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), año base 2018 (INEGI, 2018).

Actividades primarias



Las actividades primarias se caracterizan por el aprovechamiento de recursos naturales que no han sufrido una transformación previa, como son la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza. Este sector representa 0.1% del PIB metropolitano y genera aproximadamente 82 101 empleos entre la población ocupada que reside dentro de la ZMVM, equivalente al 0.9%. Se destaca que más del 75.1% de la población ocupada en el sector reside en el Estado de México (INEGI, 2015).

De acuerdo con la Serie VI de uso de suelo y vegetación del INEGI (año 2014), 39.8% de la superficie de la ZMVM, esto es 3134.1 km^2, corresponde a tierras agrícolas. De esta superficie, aproximadamente una quinta parte es utilizada para agricultura de temporal y el resto para agricultura de riego. La Figura 1.23 muestra la distribución espacial de los usos de suelo agrícolas; se puede apreciar que estos se ubican en la periferia de la mancha urbana y que se concentran principalmente al norte y oriente del Estado de México. En la región también se registran actividades pecuarias, destacándose la avicultura y la producción bovina y porcina. Para mayor información sobre las características de las actividades primarias (agrícolas y pecuarias) en la ZMVM, consultar el Anexo 1.3.

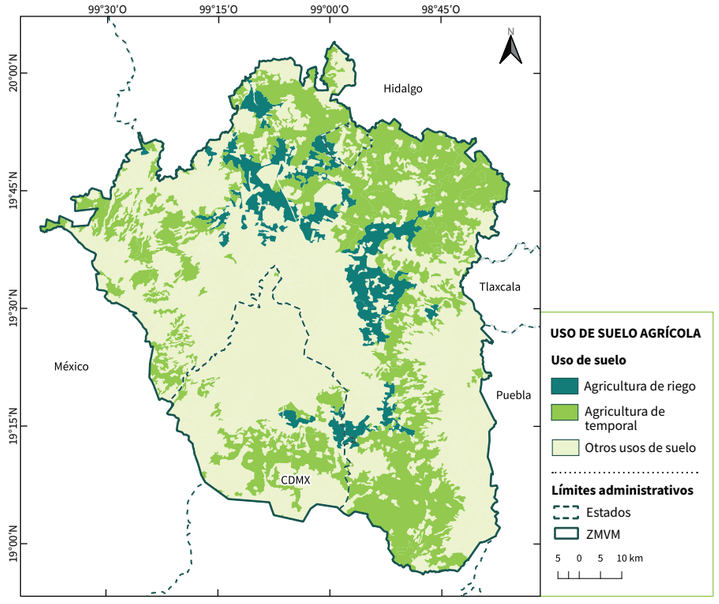


Figura 1.23 Usos de suelo agrícola en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con datos de las cartas de uso de suelo (Series VI), escala 1:250 000 (INEGI, 2020a).*

Las actividades del sector primario son una de las fuentes de emisiones contaminantes en la región. En primera instancia, los cambios de uso de suelo forestal a un uso agrícola inciden sobre la calidad del aire: se disminuye la cobertura vegetal que ofrece servicios ecosistémicos benéficos para la población y se crean condiciones favorables para la erosión del suelo, una fuente de partículas suspendidas. Las prácticas de roza y quema, los incendios accidentales, la aplicación de fertilizantes nitrogenados, el uso de combustibles fósiles en maquinaria agrícola y las emisiones de CH_4 (un COV) por fermentación entérica y el manejo del estiércol, son algunas otras actividades que emiten contaminantes atmosféricos dentro de la cuenca del Valle de México.

Actividades secundarias

El sector secundario engloba todas las actividades que permiten la transformación de materias primas en bienes manufacturados para su consumo. El insumo de estas actividades puede provenir de las actividades primarias o del mismo grupo. Dentro de las actividades secundarias se identifican cuatro grandes grupos: las industrias manufactureras, la minería, la construcción y la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, agua y gas. Este sector representa 13.5% del PIB metropolitano y, de acuerdo con los datos de la

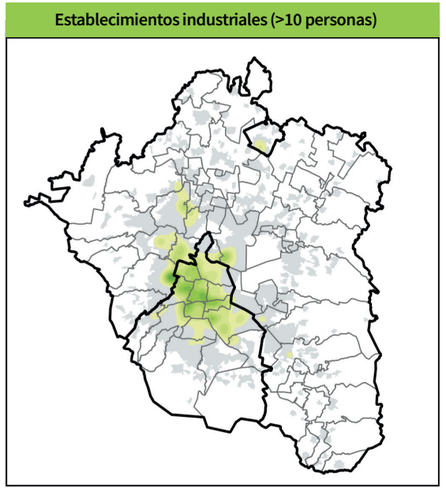


Encuesta Intercensal 2015, genera aproximadamente 1.72 millones de empleos entre la población ocupada que reside en la ZMVM (19.6% del total). Se destaca que, de la población ocupada que reside en el Estado de México, 23.5% labora en el sector; para Tizayuca este porcentaje es igual a 30.7%, mientras que para la Ciudad de México es del 14.9% (INEGI, 2015).

De acuerdo con los datos del DENUE 2018, se tiene un registro de 77 710 establecimientos pertenecientes al sector en la ZMVM, los cuales generan 9.44% del PIB nacional respectivo. La aportación de la Ciudad de México y el Estado de México es de magnitud similar, con 54.0% y 46.0% del PIB. La actividad predominante en términos del número de unidades económicas es la industria manufacturera (94.2%), destacando la aportación de la industria alimentaria, así como las industrias metálicas básicas y la fabricación de productos metálicos. Dentro de las industrias con más de 100 empleados (2.1% del total), la mayoría de los establecimientos corresponden a industrias del giro alimenticio, químico, del plástico y del hule, y del papel; de acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2017, las tres últimas se destacan por ser grandes consumidoras de combustibles fósiles y energía suministrada a través de la red eléctrica (SENER, 2018). Es importante mencionar que del total de establecimientos industriales, no todos tienen la obligación de reportar a las autoridades ambientales datos de consumo de combustibles y emisiones, ya que esto depende del número de personas empleadas, el tipo de actividad predominante, entre otras características.

El 89.4% del total de las actividades secundarias en la ZMVM son microempresas que emplean 10 o menos personas. Dentro de estas se distingue la microindustria dedicada a la elaboración de tortillas, la panificación, artes gráficas, herrería y purificación de agua; sin embargo, estas actividades, a pesar de ser consideradas industriales, producen bienes de consumo inmediato a un grupo de población reducido (de forma similar a un servicio), dificultando su regulación ambiental debido a su diversidad y tamaño. El desglose de actividades económicas secundarias en la ZMVM por tipo y tamaño de industria se reporta en el Anexo 1.3.

En cuanto a la distribución espacial de las actividades secundarias, se identifican zonas específicas dentro de la ZMVM con una elevada concentración de actividades industriales. Es importante destacar que la distribución varía en función del tamaño de los establecimientos y el tipo de actividad. Como se muestra en la Figura 1.24, los establecimientos industriales donde trabajan más de 10 personas, que ascienden a 8215 unidades, se concentran en la zona centro y norponiente de la Ciudad de México, así como en municipios conurbados del Estado de México, tales como Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz y Ecatepec de Morelos. También hay concentraciones significativas de actividad industrial en Cuautitlán Izcalli y Tultitlán, así como en las alcaldías de Azcapotzalco, Iztacalco e Iztapalapa en la Ciudad de México, y en Tizayuca, Hidalgo. En el Anexo 1.3 se pueden consultar mapas de calor que muestran las zonas de mayor acumulación de establecimientos individuales, por tipo de actividad industrial y tamaño de los establecimientos, así como un análisis de las tendencias en su distribución.



Nota: Las áreas de color verde oscuro representan una mayor concentración de establecimientos. La ausencia de color no indica que en la zona no hay establecimientos industriales.

Figura 1.24 Concentración de establecimientos industriales que emplean a más de 10 personas
Fuente: *Elaborado a partir del DENUE 2018 (INEGI, 2018).*

La centralización de la industria al norte de la Ciudad de México y en los municipios colindantes del Estado de México se asocia a la movilización diaria de una gran cantidad de población que necesita desplazarse para llegar a su fuente de empleo. Es así que el sector industrial no solo produce emisiones contaminantes por la quema de combustibles fósiles y el uso de productos químicos en sus procesos, sino que crea la necesidad de desplazamiento de recursos humanos, insumos materiales y mercancías hacia, desde y dentro de la zona metropolitana, incidiendo en las emisiones asociadas al transporte privado, público y de carga. Las emisiones y el consumo energético de estas fuentes se detallan en el inventario de emisiones del ProAire (Capítulo 5).

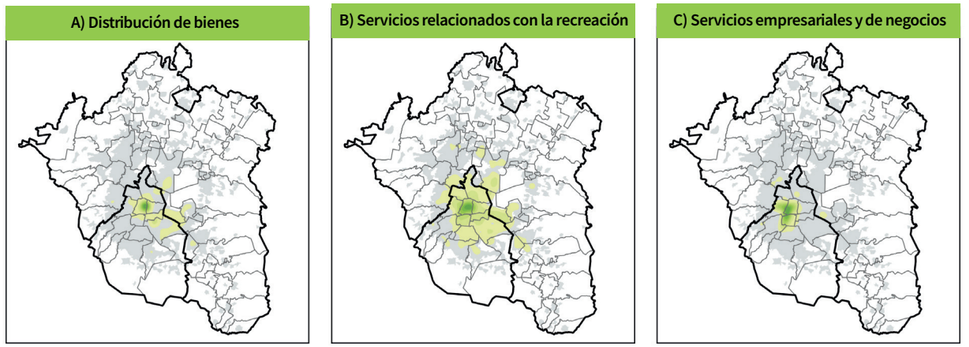
Actividades terciarias

Las actividades terciarias son las que predominan en la ZMVM. Estas consisten en la distribución de bienes, operaciones con activos e información, y otros tipos de servicios de negocios, recreativos, gubernamentales y sociales. Este sector agrega valor a los productos sin realizarles modificaciones físicas, ya que las actividades no elaboran bienes materiales, sino que brindan beneficios intangibles. El sector representa 86.4% del PIB metropolitano, 31.2% del total nacional para todas las actividades terciarias, y genera más de tres cuartos del total de empleos en la ZMVM. En el Anexo 1.3 se desglosa el número de establecimientos por tipo de actividad económica terciaria.



El sector terciario de la ZMVM concentra actividades con alto valor agregado, como los servicios financieros y de seguros; otros sub-grupos con porcentajes relativamente altos de empleo son las áreas de comunicaciones y transporte, bienes raíces y servicios empresariales (OCDE, 2015). La distribución de bienes, incluyendo el comercio al por mayor y al por menor, emplea a un total de 1 907 336 personas, de las cuales el 56.9% son residentes del Estado de México, 42.6% de la Ciudad de México y el 0.5% restante de Tizayuca, Hidalgo. Por su parte, el sector servicios es el que concentra la mayor cantidad de empleos dentro de la ZMVM, con un total de 4 832 108; 51.4% de la población ocupada vive en la Ciudad de México, 48.2% en alguno de los 59 municipios conurbados del Estado de México y 0.4% en el municipio de Tizayuca, Hidalgo (INEGI, 2015).

Si bien es conocido el impacto que genera el desarrollo industrial en la contaminación atmosférica, los comercios y servicios han tomado relevancia dado que son numerosos y diversos, y en su conjunto pueden ser causa de cantidades significativas de emisiones contaminantes. En la Figura 1.25 se puede observar la concentración de las actividades económicas terciarias dentro de la ZMVM; los mapas de calor representan las zonas de mayor acumulación de establecimientos individuales de comercios y servicios en la metrópoli. En general, la mayor parte de las actividades económicas terciarias en la ZMVM se concentran en la ciudad central, así como en algunos municipios del Estado de México que colindan con la capital. En el Anexo 1.3 se incluyen mapas de calor para actividades específicas, según la clasificación estándar del INEGI (2012a), así como descripciones más detalladas de su distribución espacial.



Nota: Las áreas de color verde oscuro representan una mayor concentración de establecimientos. La ausencia de color no indica que en la zona no hay establecimientos comerciales y de servicios. A) Incluye comercio al por mayor y al por menor, así como servicios de transporte, correos y almacenamiento. B) Incluye servicios de esparcimiento cultural y deportivo, servicios de alojamiento y servicios de preparación de alimentos y bebidas. C) Los servicios empresariales incluyen operaciones con información, operaciones con activos (servicios financieros, de seguros e inmobiliarios), y otros servicios cuyo insumo principal es el conocimiento y la experiencia del personal, tales como servicios técnicos, científicos y profesionales, así como corporativos; se excluyen servicios de educación y salud que, si bien comprenden actividades que requieren conocimientos y especialización por parte del personal, tienen un impacto primordialmente social; la distribución de estos últimos se aborda en el apartado de estructura urbana del presente capítulo.

Figura 1.25 Concentración de actividades económicas terciarias dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado a partir del DENUE 2018 (INEGI, 2018).*

La distribución de bienes se divide en comercio al por mayor, comercio al por menor y servicios de transporte, correos y almacenamiento; se concentra principalmente en la ciudad central y la región metropolitana-oriente. Estas unidades económicas se dedican a la compra-venta (sin transformación) de bienes, materias primas y otros suministros. Se destaca que en la alcaldía Iztapalapa se ubica la Central de Abastos de la Ciudad de México, considerada por la Unión Mundial de Mercados Mayoristas como el centro de suministro de alimentos más grande del mundo y la cual concentra las transacciones de mercancías perecederas en la ZMVM; alrededor de 500 mil personas la visitan diariamente (FICEDA, s/f).

Los servicios se concentran, al igual que las actividades comerciales, en la zona centro de la Ciudad de México; sin embargo, también se aprecia una contribución importante de la zona poniente y sur de la capital, así como de algunos municipios del Estado de México, dependiendo del tipo de actividad económica. Las operaciones con activos e información, así como corporativos y otros servicios cuyo insumo principal es el conocimiento y la experiencia del personal, se concentran en las alcaldías Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Benito Juárez, aunque también hay una densidad apreciable en las alcaldías Álvaro Obregón y Cuajimalpa, así como en algunos municipios conurbados como Tlalnepantla de Baz. Se destacan los centros financieros sobre Paseo de la Reforma, en Polanco-Lomas y en Santa Fe. Estas actividades, particularmente los servicios financieros y de seguros, tienen un valor agregado alto (OCDE, 2015). Entre 2003 y 2016, este tipo de servicios fue la actividad que más crecimiento tuvo, pasando del 4.75% al 13.13% en aportación del PIB terciario de la Ciudad de México (Secretaría de Desarrollo Económico, 2019); a su vez, esto representa más del 45% del PIB nacional para la actividad respectiva (INEGI & Gobierno de la Ciudad de México, 2017).

Los servicios recreativos incluyen unidades económicas que se dedican a los servicios artísticos, culturales y deportivos, así como a servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas. Estos servicios también se concentran en la Ciudad de México, aunque muestran una mayor dispersión que el resto de las actividades económicas terciarias. Tan solo en la Ciudad de México hay más de 838 centros y atractivos con potencial turístico, incluyendo más de 170 museos y galerías (SECTUR & Gobierno del Distrito Federal,

2013). El Centro Histórico y la colonia Cuauhtémoc forman el complejo cultural, de entretenimiento, hospedaje y turismo de negocios y vacacional más importante de la ZMVM; la derrama económica de la actividad turística en la Ciudad de México superó los 4800 millones de dólares en 2018, con más de la mitad asociada al turismo internacional (Secretaría de Turismo, 2019).

Todos los establecimientos comerciales y de servicios representan atractores de viaje, ya sea como fuente de empleo, para la adquisición de bienes o para la recreación de la población de la ZMVM. Es así que su ubicación incide en el transporte de mercancías para su comercialización, en los patrones de desplazamiento de la población del Valle de México y, en ausencia de medios de transporte eficientes y sustentables, puede propiciar la generación de contaminación por el uso de medios de transporte a base de combustibles fósiles.

Finalmente, las actividades relacionadas con el gobierno también muestran un patrón de centralización en la zona centro de la capital mexicana. La Ciudad de México es el centro administrativo del país, por lo que concentra las sedes de dependencias de la Administración Pública del Gobierno Federal, además de los entes administrativos locales, organismos internacionales, embajadas y consulados de otros países, entre otros. Estos establecimientos también incitan el desplazamiento de la población para la atención de trámites y la realización de otros procedimientos administrativos.

Índice de volumen físico

El índice de volumen físico es un indicador estadístico que mide la evolución real de los volúmenes de la producción física en los distintos niveles de agregación establecidos para cada sector económico, a partir de un año base. Este indicador refleja la tendencia o variación producida en el corto plazo en la producción económica, a partir de información de cantidades producidas, valores de producción y precios a nivel de producto, por lo que puede utilizarse para evaluar el comportamiento de los distintos sectores.

Dentro de los tres tipos de actividades y tomando como año base el 2013, las actividades terciarias tienen la mayor pendiente positiva (ver Figura 1.26); es decir, su producción ha crecido con mayor rapidez desde el siglo pasado. Las actividades secundarias muestran una tendencia similar a las actividades terciarias, pero con una pendiente menor, infiriendo que si bien su producción ha crecido, no lo ha hecho con el mismo ritmo que las actividades terciarias. Por otro lado, las actividades primarias tienen una pendiente ligeramente negativa a partir del año 2000, la cual indica una desaceleración en su producción.

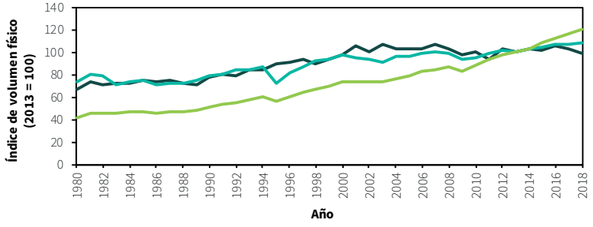


Figura 1.26 Actividad económica en la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo

Fuente: *Elaborado a partir del Indicador Trimestral de la Actividad Económica Estatal (INEGI, 2020b).*

1.5 Estructura urbana

La exposición a contaminantes atmosféricos es resultado de distintas fuerzas motrices que ejercen presión sobre el medio ambiente y que están estrechamente ligadas al desarrollo urbano (OMS, 2000). La estructura urbana de la ZMVM refleja los patrones en los usos e intensidad de uso del suelo, así como la distribución de densidades de población, hogares y empleo. Estas variables inciden en la demanda de transporte, la generación de viajes, los kilómetros recorridos por vehículo y, por lo tanto, en la generación de contaminantes atmosféricos.

La descripción de la estructura urbana de una ciudad busca evaluar el uso y distribución de las actividades en el espacio físico, así como la estratificación social y económica de la población, la zonificación de la ciudad y la evolución en el tiempo de fenómenos como la expansión y la densificación (Álvarez De la Torre & Ayala Macías, 2018). La estructura urbana impacta en el funcionamiento de la metrópoli y la satisfacción de necesidades de la población, tales como la demanda de vivienda, empleo y actividades económicas, el acceso a servicios urbanos y vialidades, comercios y áreas recreativas, entre otras. La satisfacción de estas necesidades deriva en una demanda de recursos, donde se destaca un componente energético para el sector transporte.

Las actividades urbanas generan la necesidad de desplazamiento de la población. La infraestructura del sistema de transporte público y la red vial son elementos que articulan la estructura urbana y permiten el movimiento al interior de la ZMVM. En este contexto, identificar y especificar las funciones que generan los viajes cotidianos de la población, desde los orígenes hacia los destinos dentro de la ZMVM, son aspectos clave de la descripción de la zona de estudio. Posteriormente, se deben identificar las áreas donde es necesario incidir para lograr una gestión integral de la calidad del aire, dado que los factores que establecen la distribución espacial y temporal de viajes y traslados son estrictamente urbanos.

1.5.1 Patrones de desarrollo y organización urbana

Desde el siglo pasado, la ZMVM ha crecido de manera constante tanto en población como superficie, aunque con variaciones temporales. Desde la mitad del siglo pasado, el crecimiento urbano superó los límites de las demarcaciones del entonces Distrito Federal y se extendió hacia al Estado de México, principalmente en los municipios de Tlalnepantla de Baz, Naucalpan de Juárez y Ecatepec de Morelos; con ello inició el proceso de metropolización del Valle de México (Cobos, 2016). Posteriormente, la construcción de vivienda de interés social en grandes conjuntos alejados del perímetro urbano favoreció la expansión al norte y noreste de la ZMVM, donde se propició el cambio de uso de suelo agrícola a urbano-residencial.

El crecimiento metropolitano ha continuado desde entonces bajo un modelo expansivo, extendiéndose a lo largo de las 76 demarcaciones que actualmente conforman la ZMVM. Es así que en el área de estudio se identifican los siguientes patrones de desarrollo urbano (OCDE, 2015):

- La población de la ZMVM aún está en crecimiento, sobre todo en las periferias. Aunque el crecimiento neto muestra una desaceleración, la población en las zonas periféricas está creciendo más rápido que la del núcleo urbano.
- En la ZMVM prevalecen condiciones de desigualdad económica y social. Por ejemplo, los servicios básicos en algunas colonias tanto del centro como de la periferia son precarios y la mayoría de la región muestra altos niveles de desigualdad por ingreso, impactando en la cohesión social.

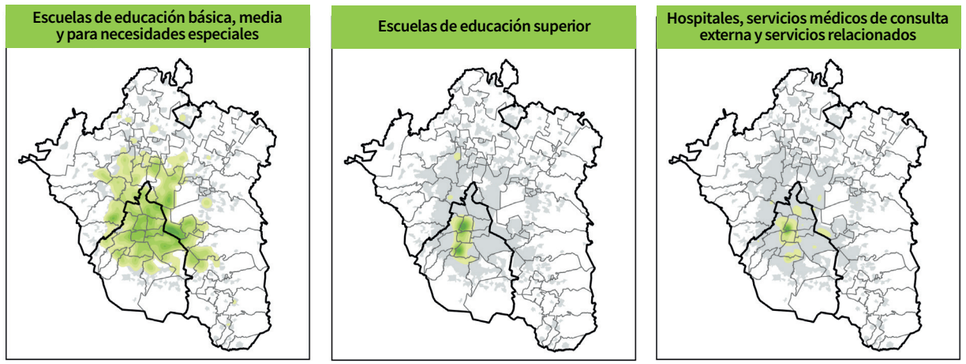
- En términos de vivienda, las zonas más asequibles se ubican en las periferias, aunque los empleos siguen concentrándose en el núcleo metropolitano. Como consecuencia, aumenta la distancia y tiempos de traslado entre los centros residenciales y las fuentes de empleo.
- El sistema de transporte no se ha desarrollado a la par del crecimiento urbano, particularmente en zonas periféricas donde predominan modos de baja capacidad y mala calidad. Por ejemplo, se estima que solo 25% de la población vive en un radio de 1 km de una estación o parada de autobús.

El desarrollo de la metrópoli se ha consolidado de manera dispersa, incidiendo en la calidad de vida de la población y la sustentabilidad de la región. La expansión de la huella urbana se relaciona con la dispersión de sus actividades económicas y de vivienda. Tomando como referencia el Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México (SEDESOL, Gobierno de la Ciudad de México, Gobierno del Estado de México, & Gobierno del Estado de Hidalgo, 2011), se pueden distinguir los siguientes patrones de localización de dichas actividades:

- Los sectores de especialización económica, incluyendo servicios vinculados a la economía global, servicios financieros y de seguros, corporativos y empresariales, entre otros, se localizan en las alcaldías y municipios del centro y poniente de la ZMVM. Estos comprenden las alcaldías de Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Benito Juárez y Cuajimalpa, y el municipio de Huixquilucan en el Estado de México.
- En el caso del comercio, las actividades se concentran en las alcaldías de Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Iztapalapa y Álvaro Obregón; se destaca también el municipio de Naucalpan en el Estado de México y las áreas de establecimientos comerciales como el Centro Histórico de la Ciudad de México y Polanco. Los corredores urbanos también concentran una importante actividad comercial, particularmente en el Paseo de la Reforma y en la Avenida Insurgentes, en la alcaldía Cuauhtémoc, y en el corredor de Periférico.
- Con respecto a la actividad industrial, la concentración de su producción se ubica en las alcaldías de Azcapotzalco, Miguel Hidalgo e Iztapalapa, y en los municipios de Tlalnepantla de Baz, Ecatepec de Morelos, Cuautitlán Izcalli, Naucalpan de Juárez y Tultitlán, en el Estado de México.
- En el caso de la vivienda, en la Ciudad de México predominan patrones de concentración, mientras que en el Estado de México e Hidalgo prevalece la dispersión de la vivienda. La Ciudad de México prácticamente ya no expande su huella urbana y ha iniciado un proceso de recuperación de áreas centrales; se identifican también procesos de consolidación periférica (áreas que ganan población sin crecer horizontalmente). El Estado de México e Hidalgo se caracterizan por una fuerte expansión periférica; solo en algunos municipios mexiquenses como Ecatepec, Valle de Chalco e Ixtapaluca, entre otros, se identifican procesos de consolidación periférica.
- La dispersión en la ZMVM se impulsó por la vivienda de interés social institucional, que se construyó en la periferia y dejó grandes vacíos entre los nuevos desarrollos y los territorios urbanos continuos (por ejemplo, en Tecámac, Zumpango y Huehuetoca).

Los patrones de desarrollo urbano metropolitano y la distribución espacial de las distintas actividades de la población dan una respuesta al comportamiento de la ciudad como generadora de viajes. Como consecuencia de la estructura urbana, se generan flujos masivos de fuerza laboral y costos de movilidad que impactan directamente en el medio ambiente, en específico por el uso de medios de transporte motorizados a base de combustibles fósiles.

Además del papel que juega la vivienda y las fuentes de empleo en los patrones de movilidad de la población, la ubicación y acceso a servicios de educación y salud es otro factor ligado a la necesidad de desplazamiento de las personas que viven en la ZMVM. La Figura 1.27 muestra mapas de calor generados a partir de los puntos de servicios de educación y salud dentro de la metrópoli. Las escuelas de educación básica, media y necesidades especiales muestran la distribución más homogénea, con puntos de mayor concentración que coinciden con los municipios y alcaldías más densamente poblados; tal es el caso de los municipios de Ecatepec de Morelos, Nezahualcóyotl y Naucalpan de Juárez, y las alcaldías Benito Juárez, Cuauhtémoc e Iztapalapa. Para las instituciones de educación superior, se observan dos polos dentro de la Ciudad de México: el primero al sur de la capital, en torno a Ciudad Universitaria, y otro al norte, en la alcaldía Cuauhtémoc.



Nota: Las áreas de color verde oscuro representan una mayor concentración de establecimientos. La ausencia de color no indica que en la zona no hay establecimientos de servicios de educación o salud.

Figura 1.27 Concentración de servicios de educación y salud en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado a partir del DENUE 2018 (INEGI, 2018).*

Los servicios de salud, si bien también se concentran en la región central de la ZMVM, muestran una densidad más homogénea a lo largo de toda la región, con concentraciones más elevadas en los municipios con mayor población y que, por lo tanto, requieren una mayor capacidad de este tipo de servicios, como sucede en los municipios de Ecatepec de Morelos, Nezahualcóyotl y Naucalpan de Juárez, en el Estado de México. En el caso específico de los hospitales, su distribución también se concentra en la Ciudad de México y los municipios conurbados más poblados. Cuando se trata de servicios especializados la centralización es más evidente, como es el caso de la zona de hospitales en Tlalpan.

1.5.2 Movilidad, transporte y vías de comunicación

Mejorar la movilidad coadyuva en la mitigación de emisiones asociadas al transporte de población y bienes dentro de la ZMVM. La gestión de la calidad del aire, desde una perspectiva de sustentabilidad, implica mejorar la eficiencia de los diferentes modos de transporte para incidir en un uso más eficiente de la energía. En esta sección se resumen los principales elementos de la infraestructura vial, al mismo tiempo que se analiza la demanda de movilidad de la región.

Sistema vial

El sistema vial de la ZMVM está integrado por el conjunto de elementos que permiten la circulación, el intercambio entre las funciones que se desarrollan en la región y la movilización de sus habitantes. Este sistema está conformado por dos subsistemas distintos (SEDESOL, 2012):

- Subsistema vial primario: estructura que conecta al conjunto de núcleos que forman la ZMVM. Está destinado a desplazamientos más largos y de mayor volumen; se conforma por vías de acceso controlado, ejes viales y arterias principales.
- Subsistema vial secundario: distribuye el tránsito hacia y desde el subsistema primario. Se caracteriza por desplazamientos cortos y volúmenes de menor importancia. Incluye calles colectoras, locales y peatonales, entre otras clasificaciones.

La red vial de la ZMVM tiene una longitud estimada de 10 182.21 km; esta red facilita el movimiento de la población, bienes y servicios, al mismo tiempo que determina y condiciona los patrones de desarrollo urbano (SEDESOL *et al.*, 2011). Su estructura responde a procesos de expansión, producto del crecimiento demográfico y la creación de nuevos poli-centros que concentran infraestructura urbana, población y actividades económicas. La Figura 1.28 muestra un mapa de las vías de comunicación principales en la región, incluyendo la red vial primaria (913.15 km) y secundaria (9269.06 km) de la ZMVM. Se observa que el sistema vial se caracteriza por tener una red de acceso que desemboca en el sistema vial primario de la Ciudad de México, además de contar con vías perimetrales que intercomunican la estructura vial en general. En la Tabla 1.12 se enlistan las vialidades principales en la ZMVM; para más información sobre la estructura vial, consultar el Anexo 1.4.

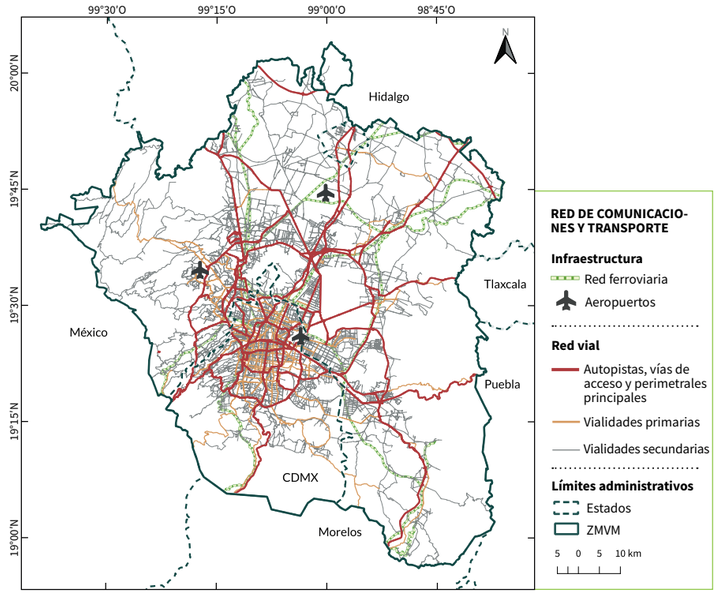


Figura 1.28 Red de vías de comunicación y transporte en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con datos de Open Street Maps y los Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) (Instituto de Geografía UNAM, 2017).*

Tabla 1.12 Principales Vialidades en la Zona Metropolitana del Valle de México

Principales vialidades de la Ciudad de México					
Ejes viales				Vías de acceso controlado	
Eje Central	Eje 2 y 2A Sur	Eje 10 Sur	Eje 1 Poniente	Circuito Bicentenario	Aquiles Serdán
Eje 1 Norte	Eje 3 Sur	Eje 1 Oriente	Eje 2 Poniente	Anillo Periférico	Miguel Alemán
Eje 2 Norte	Eje 4 Sur	Eje 2 Oriente	Eje 3 Poniente	Insurgentes Norte	Río de la Piedad
Eje 3 Norte	Eje 5 Sur	Eje 3 Oriente	Eje 4 y 4A Poniente	Ignacio Zaragoza	Río Becerra
Eje 4 Norte	Eje 6 Sur	Eje 4 Oriente	Eje 5 Poniente	San Antonio Abad	Carlos Luis Cabrera
Eje 5 Norte	Eje 7 y 7A Sur	Eje 5 Oriente	Eje 6 Poniente	Constituyentes	Tlalpan
Eje 6 Norte	Eje 8 Sur	Eje 6 Oriente	Eje 7 Poniente	Ejército Nacional	Autopista Urbana Norte y Sur
Eje 1 y 1A Sur	Eje 9 Sur	Eje 7 Oriente		Río San Joaquín	
Principales vialidades del Estado de México					
Río de los Remedios	Manuel Ávila Camacho		Naucalpan-Ecatepec		Quéretaro-México
Pantitlán	Vía Gustavo Baz		México-Puebla		México-Toluca
José López Portillo	Tlalnepantla-Atlacomulco		Pachuca-México		La Venta-Chamapa-Lechería
Primero de Mayo	Viaducto Elevado Bicentenario		Circuito Exterior Mexiquense		Peñón-Texcoco
Carlos Hank González	México-Texcoco				

Fuente: *Secretaría de Seguridad Ciudadana (SSP, 2015b, 2015a) y el estudio "Transporte Público Masivo en la Zona Metropolitana del Valle de México: Proyecciones de demanda y soluciones al 2024" (ITDP, 2015).*

En cuanto a la infraestructura ciclista, esta se concentra en la Ciudad de México, abarcando un total de 194 km de ciclovías. Esta red está desarticulada y se ubica principalmente en las alcaldías Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Benito Juárez. Si bien en Xochimilco, Tláhuac e Iztapalapa, así como en el Estado de México, hay significativa actividad ciclista, en estas zonas no se cuenta con la infraestructura para satisfacer de forma segura la demanda de movilidad (SEMOVI, 2019b).

Sistema de transporte público

La ZMVM tiene un sistema de transporte público complejo, integrado por un agregado de subsistemas y componentes administrados por distintos gestores de transporte. Las instituciones responsables de la operación del sistema son la Secretaría de Movilidad (SEMOVI) de la Ciudad de México y la Secretaría de Movilidad (SEMOV) del Estado de México, aunque la administración recae tanto en entes públicos y semipúblicos, como en concesionarios privados.

Diferentes estudios diagnóstico (Instituto de Investigaciones Parlamentarias, 2017; ITDP, 2015) concluyen que la desarticulación de los subsistemas de transporte entre el Estado de México y la Ciudad de México es una de las principales razones que empuja a la población a adquirir un automóvil particular. Problemas de coordinación institucional obstaculizan los esfuerzos por establecer una política de movilidad integral y resultan en una inadecuada planeación y gestión de las redes de transporte pú-

blico en sus distintas modalidades (SEMOVI, 2019b). A continuación se describen los principales sistemas y redes de transporte público que operan en la ZMVM (ITDP, 2015; SEMOVI, 2019a) mientras que la Figura 1.29 muestra un mapa de los mismos. La distribución del total de viajes diarios en los distintos modos de transporte se aborda más adelante, en la descripción de los resultados de la encuesta origen-destino para la ZMVM, año base 2017, realizada por el INEGI.

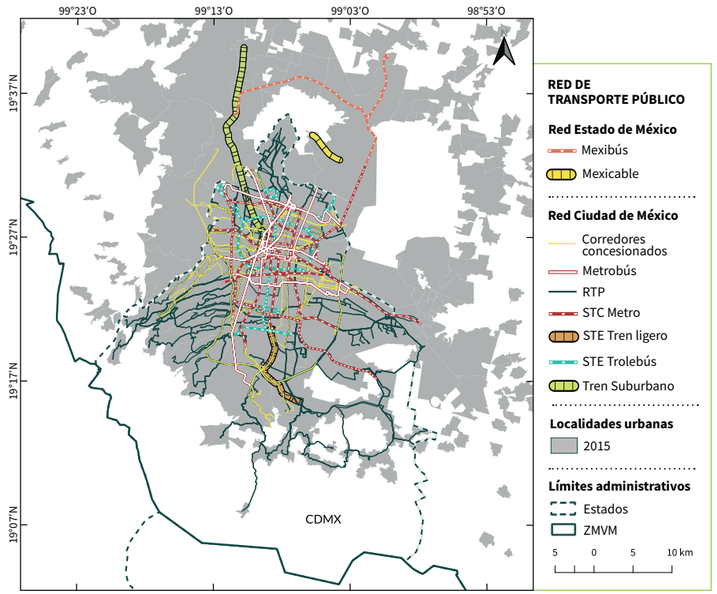


Figura 1.29 Red de transporte público en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaborado con información del GTFS estático (General Transit Feed Specifications) de la Ciudad de México (SEMOVI, 2020).*

El **Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro** es el principal modo de transporte estructurado por su capacidad y cobertura. El servicio se concentra en las alcaldías centrales de la Ciudad de México y cuenta con 12 líneas en operación, de las cuales dos (Líneas A y B) también atienden a municipios del Estado de México. En total cuenta con 226.5 km de longitud, 195 estaciones y más de 380 trenes que atienden a 2.39 millones de personas en un día entre semana.

La **Red de Transporte de Pasajeros (RTP)** opera en toda la Ciudad de México, principalmente en zonas de difícil acceso y de bajos recursos. Cuenta con una flota total disponible que oscila entre 1200 y 1300 unidades de autobuses públicos (con capacidad de 80 o más personas, dependiendo del tipo de unidad), más de 90 rutas en operación y una cobertura de 3300 km de longitud.

El **Servicio de Transportes Eléctricos (STE)** consta de 8 líneas de trolebús y un tren ligero. El tren ligero cubre 25.31 km al sur de la Ciudad de México. Por su parte, las 8 líneas de trolebús, las cuales reemplazaron gradualmente a la Red de Tranvías de la Ciudad de México, acumulan un parque vehicular total de 300 unidades que circulan en una red de 203.64 km.

El **Metrobús (MB)** es una red de BRT (*Bus Rapid Transit,* por sus siglas en inglés) que transita en la Ciudad de México. Está conformado por 7 líneas y 24 rutas en operación que cubren 140 km. Después del STC Metro, es el segundo sistema estructurado de mayor cobertura en la Ciudad de México.

ECOBICI es un sistema de bicicletas públicas que cuenta con 480 cicloestaciones y más de 6800 unidades; 28 de las estaciones y 340 bicicletas forman parte del nuevo sistema de bicicletas eléctricas de pedaleo asistido. Actualmente se tienen más de 170 000 usuarias y usuarios registrados; en un día entre semana el número de viajes puede sumar más de 30 mil.

El **Tren Suburbano** resultó de una cooperación entre el Estado de México y la Ciudad de México. Este conecta a municipios mexiquenses con la Ciudad de México, aprovechando infraestructura ferroviaria existente en la antigua ruta México-Querétaro. Consta de una única línea con una longitud de 27 km.

El **Mexibús** es otro sistema de BRT disponible en la ZMVM, pero administrado por el gobierno del Estado de México. Un total de tres líneas cubren 57.3 km y dan servicio principalmente a los municipios de Ecatepec de Morelos, Tecámac, Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Coacalco de Berriozábal, Tultitlán y Cuautitlán Izcalli, aunque las rutas también se adentran en la Ciudad de México.

El **Mexicable** es un sistema teleférico de 4.9 km de longitud y 7 estaciones que atiende a la región San Andrés de la Cañada, en Ecatepec de Morelos.

Los **concesionarios de transporte de baja capacidad** incluyen la flota de vagonetas y colectivos que conforman el modo de transporte con mayor cobertura y el más utilizado en toda la ZMVM. La situación particular de este sistema hace que sea el más irregular en términos de horas de servicio y frecuencia, aunque tanto la Ciudad de México como el Estado de México lideran esfuerzos para aumentar su regulación.

Se tiene proyectada también la construcción del sistema **Cablebús** de la Ciudad de México, un teleférico que prestará servicios de transporte público en zonas de difícil acceso y con conectividad al STC Metro. El proyecto incluye cuatro líneas, con una longitud total de 34 km, y la capacidad de atender 117 millones de viajes anuales. La Línea 1 se encuentra actualmente en construcción en la zona de Cuautepec, en la alcaldía Gustavo A. Madero; esta tendrá un eje troncal con capacidad de 4000 personas por hora, y un antena de 1.7 km con capacidad de 1000 personas por hora. Recientemente se inició la construcción de la Línea 2 Constitución de 1917 – Santa Marta (SEMOVI, 2019c).

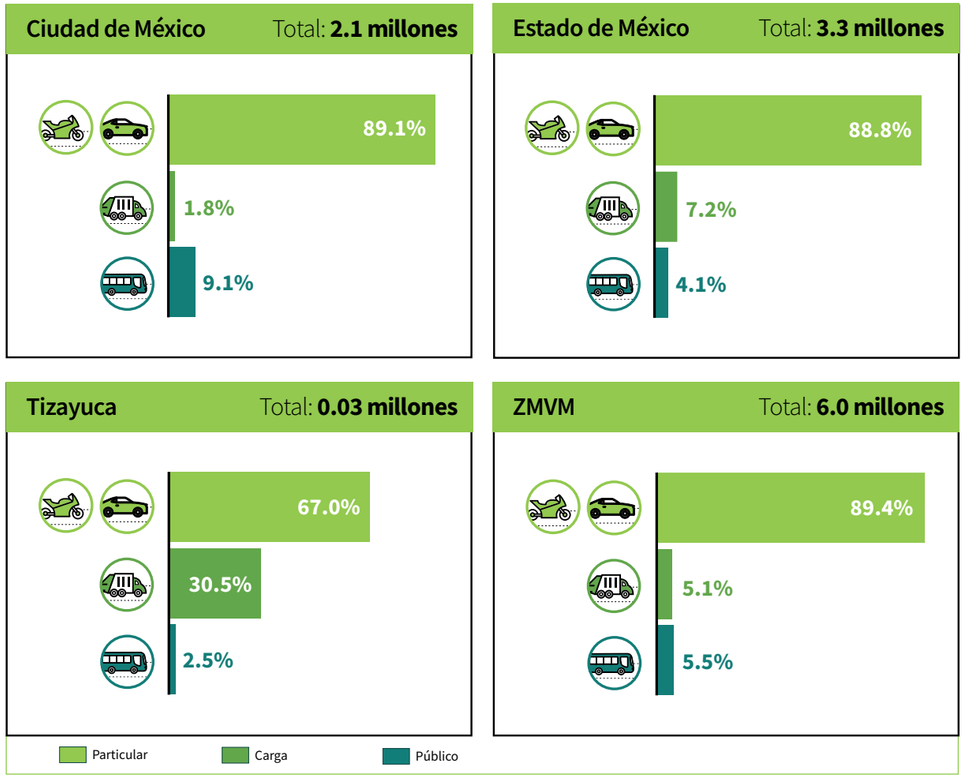
También se prevé la terminación de la obra y la operación del Tren Interurbano Toluca-Valle de México. Este tren dará servicio a 230 mil pasajeros al día y tendrá una longitud de 57.7 kilómetros con 6 estaciones (dos terminales y cuatro intermedias). Con el tren se espera disminuir los trayectos en automóviles particulares y disminuir el tráfico vehicular (SMAGEM, 2018b).

Los servicios de infraestructura vial y transporte están centralizados. En la Ciudad de México, el STC y MB dejan a amplias zonas del oriente y a zonas de serranías sin acceso directo a redes de transporte estructurado masivo (SEMOVI, 2019b). Las alcaldías Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza y Azcapotzalco son las mejor dotadas, mientras que las alcaldías con menos infraestructura son Milpa Alta, Xochimilco, la Magdalena Contreras, Tláhuac y Tlalpan; por otro lado, la infraestructura en la zona conurbada del Estado de México está desarticulada y desconectada de los sistemas de transporte masivo de la Ciudad de México.

Motorización

La flota vehicular de la ZMVM está integrada por vehículos particulares, transporte público de pasajeros y de carga locales, así como unidades de placa federal que incluyen autobuses de pasaje, turismo y vehículos de carga. El consumo de gasolina, diésel, gas natural y gas licuado de petróleo (gas L.P.) por la flota vehicular representa una de las principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera dentro de la zona de estudio.

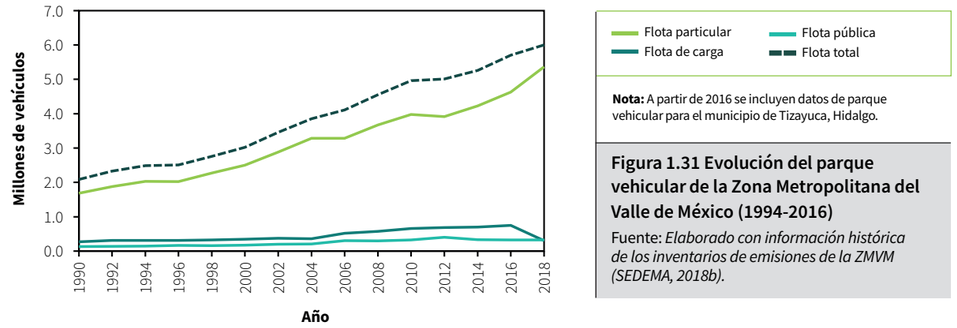
Para el año 2018, el total de vehículos que circulaban en la ZMVM se estimó en 6.0 millones (SEDEMA, 2020c). De estos, 89.4% son vehículos particulares (automóviles, camionetas tipo SUV y motocicletas), el 5.1% corresponde a transporte de carga (tractocamiones, vehículos tipo *pick up* y otros de carga, independientemente de su peso vehicular) y el 5.5% restante compone la flota pública (taxis, vagonetas, microbuses, autobuses y las unidades de BRT). Cuando se consideran únicamente los vehículos particulares, el índice de motorización de la ZMVM es igual a poco más de 270 unidades por cada 1000 habitantes. La Figura 1.30 muestra la distribución porcentual de los diferentes tipos de vehículos en cada una de las tres entidades que conforman la zona de estudio.



Nota: El total de vehículos de la ZMVM incluye un estimado de 600 mi unidades que no se encuentran registradas ante los gobiernos estatales y que circulan dentro de los límites territoriales de la zona de estudio, tales como vehículos emplacados en otras entidades, así como autobuses, tractocamiones y unidades de carga de más de 3.8 toneladas de placa federal, registradas a partir de aforos vehiculares de la SCT en las entradas a la ZMVM.

Figura 1.30 Flota vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2018
Fuente: *Inventario de emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2020c).*

El número de vehículos que circulan en la ZMVM ha crecido de manera constante y no se observan tendencias en cuanto a una desaceleración. El crecimiento más rápido se observa en la flota vehicular privada (ver Figura 1.31). Según la encuesta origen-destino de 2017, del total de hogares en la zona metropolitana (5.9 millones), 2.45 millones reportaron contar con al menos un automóvil particular o camioneta, lo que es igual a 41 de cada 100. Este valor incrementa ligeramente en la Ciudad de México, donde el 44% de los hogares cuenta con al menos una unidad, mientras que en los municipios conurbados desciende a 38% (INEGI, 2017b).



Nota: A partir de 2016 se incluyen datos de parque vehicular para el municipio de Tizayuca, Hidalgo.

Figura 1.31 Evolución del parque vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México (1994-2016)
Fuente: *Elaborado con información histórica de los inventarios de emisiones de la ZMVM (SEDEMA, 2018b).*

En la ZMVM, se tienen registrados poco más de 307 mil unidades de carga. La cantidad de vehículos pesados de jurisdicción federal es considerable (tractocamiones, autobuses y vehículos con peso bruto vehicular superior a 3.8 toneladas). Este sector ocasiona problemas de circulación vial, aumento del ruido y de emisiones, en específico de carbono negro (CN) y partículas finas. De ello deriva la importancia de la regulación de vehículos con placa federal para reducir emisiones contaminantes.

En términos de emisiones, existen indicadores del potencial de generación de contaminantes, como son el año modelo de la flota, el combustible que utiliza y el tipo de tecnología de control de emisiones con el que cuenta. Normalmente a mayor edad se presentan más emisiones debido al deterioro de los vehículos y al uso de tecnologías menos eficientes para el control de las emisiones.

En la ZMVM, 4.5% de los vehículos son año modelo 1992 o anterior. Se destaca que los programas vehiculares que se aplican en la Ciudad de México han favorecido la renovación de la flota, la cual actualmente se considera la más nueva del país; únicamente el 1.7% de los vehículos es modelo 1992 o anterior, en tanto que en el Estado de México la flota es más vieja, con una aportación del 6.6% para estos modelos. En términos del combustible utilizado, 97.1% son vehículos a gasolina y 2.1% a diésel, en tanto que el resto utiliza gas L.P., gas natural o tecnología híbrida o eléctrica. Para vehículos a gasolina, 4.2% son año 1992 o anterior, mientras que para vehículos a diésel el porcentaje de vehículos de edad avanzada es más significativo, grupo donde 11.2% son año modelo 1993 o anterior. Mayor información sobre las emisiones provenientes de fuentes móviles, desagregadas por tipo de vehículo y combustible, se encuentra en el Capítulo 5.

Encuesta origen-destino 2017

Los desplazamientos cotidianos en la ZMVM permiten la circulación de personas y facilitan intercambios entre diversas actividades. Los motivos, duración, medios de transporte y horarios de los desplazamientos, entre otros aspectos, producen patrones de movilidad complejos. Las encuestas origen-destino son una herramienta útil para caracterizar el reparto modal de los viajes, así como para identificar los principales flujos en términos de su volumen y dirección. A continuación se describen los resultados principales de la encuesta origen-destino, año 2017 (INEGI, 2017b).

Un total de 15.62 millones de personas de 6 años o más en la ZMVM realizan viajes en un día entre semana, de las cuales 44.4% residen en la Ciudad de México y el 55.6% en alguno de los municipios conurbados del Estado de México o Tizayuca. En total se realizan 34.56 millones de viajes[16] en un día entre semana, en tanto que en sábado hay menos personas viajeras y, en general, estas solamente hacen un viaje de ida a algún lugar específico y otro más de vuelta al hogar, dando un total de 21.34 millones de viajes y 10.35 millones de viajeros.

Reparto modal

De los 34.56 millones de viajes que se realizan en un día entre semana, casi la mitad (45.1%) se llevan a cabo utilizando transporte público, seguidos de viajes exclusivamente caminando (32.3%) y después por transporte privado (21.1%). Se destaca a los colectivos (microbús o combi) como el principal modo de transporte público, utilizado en 3 de cada 4 viajes. En cuanto a modos estructurados de transporte, el STC Metro reporta 4.47 millones de viajes al día, seguido de los sistemas de BRT con 1.11 millones de viajes. Cuando se desagrega por área geográfica, se observa que en la zona conurbada del Estado de México y Tizayuca el uso de colectivos es mayor; 4 de cada 5 viajes utilizan en alguno de sus tramos un colectivo. En cuanto al transporte privado, el 90.6% de los viajes son en automóvil privado, 5.1% en motocicleta y el resto en transporte escolar o de personal. La Tabla 1.13 desagrega los viajes por modo y tipo de transporte, así como por área geográfica.

Tabla 1.13 Viajes realizados en un día entre semana por la población de 6 años y más en la Zona Metropolitana del Valle de México, por tipo y modo de transporte

	Millones de viajes *(a)*		
Modo	**ZMVM**	**CDMX**	**Municipios conurbados**
Transporte público *(b)*	**15.57**	**8.62**	**6.88**
Colectivo (microbús o combi)	74.1%	67.8%	82.1%
Metro	28.7%	38.2%	16.8%
Taxi de sitio, calle o aplicación	10.5%	11.2%	9.7%
BRT (Metrobús o Mexibús)	7.1%	8.8%	5.1%
Autobús suburbano	5.8%	5.3%	6.3%
Autobús RTP o M1	2.6%	4.0%	0.9%
Mototaxi	1.8%	1.1%	2.6%
Otro tipo *(c)*	3.5%	4.1%	2.7%
Transporte privado	**7.29**	**4.06**	**3.17**
Automóvil o camioneta	90.6%	92.7%	87.9%
Motocicleta	5.1%	3.7%	6.9%
Transporte escolar y de personal	4.4%	3.6%	5.3%
Bicicleta	**0.72**	**0.24**	**0.48**
Exclusivamente caminando	**11.15**	**4.50**	**6.62**
Otro *(d)*	**0.04**	**0.02**	**0.02**
Total	**34.56**	**17.30**	**17.09**

(a) La suma por área geográfica puede ser menor que el total, debido a que se excluyen 154 mil viajes con origen no especificado.

(b) La suma de los porcentajes por modo de transporte puede ser mayor al 100%, porque en un viaje una persona puede emplear más de un modo de transporte para diferentes tramos.

(c) Considera al tren suburbano, trolebús, tren ligero, bicitaxi y Mexicable.

(d) Incluye trajinera, lancha, patineta, entre otros.

Fuente: *Encuesta Origen-Destino en Hogares de la ZMVM 2017 (INEGI, 2017b).*

16 Incluye 52 mil viajes con lugar de destino no especificado.

Motivo, duración y hora de inicio de los viajes

De los viajes realizados en un día entre semana, casi la mitad (el 47.4%) tienen como destino el hogar de la persona. El 18.9% de los viajes tienen como destino la escuela, 12.0% un centro comercial, tienda o mercado, y 8.1% una oficina; siguen en orden de magnitud los viajes cuyo destino es una fábrica o taller (3.9%), otra vivienda (3.0%), un hospital, clínica, consultorio o laboratorio (2.4%) u otro lugar (4.1%). El 0.2% restante corresponde a viajes cuyo destino no fue especificado. En cuanto al motivo de los viajes, 47.3% son para regresar al hogar, 22.0% para ir al trabajo, 11.9% para ir a estudiar, 6.6% para llevar o recoger a alguien, 6.5% para ir de compras, 2.9% tienen un fin social o de diversión, 0.8% son para hacer un trámite y el resto (2.0%) tiene otro propósito.

El tiempo promedio de todos los viajes realizados en un día entre semana es de 43 minutos. Los viajes para regresar al hogar duran en promedio menos que los viajes para ir al trabajo; los primeros tienen una duración promedio de 45 minutos, mientras que los segundos, de 57 minutos, en tanto que los viajes para ir a la escuela tienen una duración promedio de 33 minutos. En la Ciudad de México la gente tarda en promedio 20 minutos más en regresar a sus residencias, en comparación con la zona conurbada; por motivos de trabajo la tendencia se invierte y la población de la zona conurbada emplea 6 minutos más que su contraparte de la Ciudad de México. Se destaca que el 32.7% de los viajes para ir al trabajo toman más de una hora, mientras que para regresar al hogar este porcentaje se reduce al 21.9%.

En términos de la hora de inicio de los viajes, la hora pico es entre las 07:00 y 07:59, periodo en el que inician más de 4 millones de viajes. Otras olas significativas en cuanto al número de viajes iniciados ocurren a las 8:00, 13:00, 14:00 y 18:00 horas. Entre las 6:00 y las 8:59 se observa la mayor actividad de viajes hacia el trabajo y la escuela; entre las 18:00 y 18:59 los viajes iniciados tienen como principal motivo el retorno al hogar.

Como se ha expuesto anteriormente, la red vial de la ZMVM prioriza al automóvil y, por consiguiente, los gastos de mantenimiento que se destinan a la red vial son para la superficie de rodamiento (SEMOVI, 2016), aun cuando el reparto modal indica que la mayoría de las personas (65.9%) camina por la calle en alguno de sus trayectos. Este factor, aunado a la desarticulación y fragmentación del servicio de transporte público, genera una disparidad en los tiempos de traslado e incrementa el número de transbordos o “cambios de modo” en un mismo viaje, particularmente cuando este se origina en las periferias. En promedio, un viaje en metro toma 39% más tiempo que un viaje en automóvil particular; para transporte colectivo el efecto es aún más drástico, con un incremento del 54%; en autobús suburbano los viajes son 33% más largos y en RTP, 22% (SEMOVI, 2019b). La desigualdad en la movilidad tiene un patrón espacial definido entre el centro y la periferia urbana, derivado de la ubicación de los sistemas de transporte e infraestructura, y la desarticulación de las zonas que concentran el empleo y las zonas residenciales.

Movilidad entre áreas geográficas

Del total de viajes con origen en los municipios conurbados del Estado de México y Tizayuca, 85.9% son viajes internos y cerca del 13.2% tienen como destino alguna de las alcaldías de la Ciudad de México; el porcentaje restante son viajes con destino fuera de la metrópoli o con destino no especificado. De las alcaldías de la Ciudad de México, cinco son las principales “atractoras” de viajes provenientes de la zona conurbada: Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Iztapalapa y Azcapotzalco; esto se atribuye a la magnitud de las actividades económicas y de servicios en estas alcaldías. En cuanto a los viajes con origen en la Ciudad de México, 87.2% son internos y 12.5% tienen un destino en la zona conurbada, principalmente en Ecatepec de Morelos, Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz y Tecámac. La Figura 1.32 muestra en un mapa

los principales distritos atractores de viajes, según los resultados de la encuesta origen-destino 2017. Es importante mencionar que, si bien estos resultados son generales, se identifican parejas de demarcaciones con un alto índice de movilidad entre sí; tal es el caso de Ecatepec de Morelos y la alcaldía Gustavo A. Madero, con el número más grande de viajes entre un municipio de la zona conurbada y una alcaldía de la Ciudad de México.

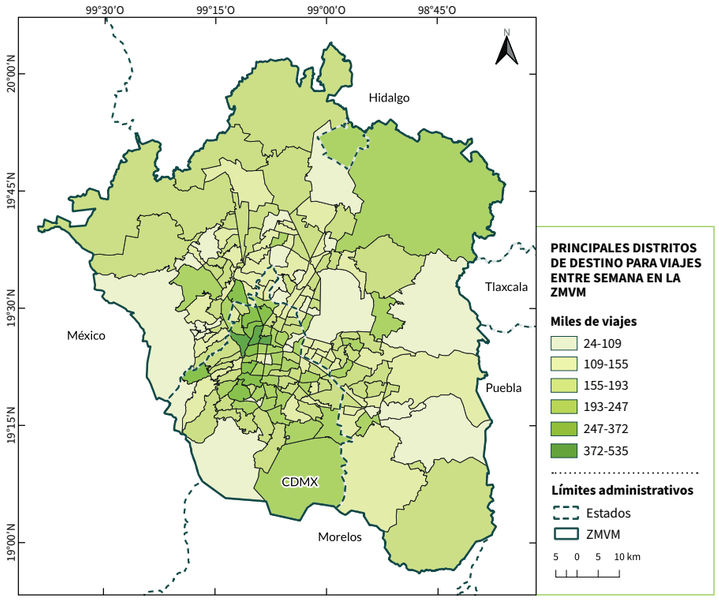


Figura 1.32 Principales distritos de destino para viajes entre semana en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Encuesta Origen-Destino en Hogares de la ZMVM 2017 (INEGI, 2017b).*

La falta de cobertura de transporte público genera que la población opte por adquirir un vehículo privado, sea automóvil, camioneta o motocicleta, en el momento en que su poder adquisitivo lo permite y al no existir alguna otra alternativa viable. Estos vehículos se utilizan de manera ineficiente al transportar, en promedio, 1.5 ocupantes por vehículo; la encuesta origen-destino 2017 reporta que 68.3% de los viajes realizados en automóvil particular dentro de la ZMVM transportan únicamente a un pasajero, el conductor (INEGI, 2017b).

La crisis del sistema de movilidad se refleja en los crecientes niveles de tráfico; la Ciudad de México fue catalogada como la de mayor congestión vehicular en el mundo en 2016 (SEMOVI, 2019b). La velocidad de circulación se ha reducido de manera sostenida y se estima en un promedio de 11 km/h en zonas centrales de la región (BID, 2018). El aumento de la motorización privada incrementa los tiempos de traslado, ejerce presión para invertir en infraestructura vial y agudiza los problemas ambientales asociados a modos de transporte motorizados y la quema de combustibles fósiles, una de las principales fuentes de contaminantes atmosféricos.

Reducir el uso del automóvil exige mejorar y ampliar la oferta de transporte público. Si se generan las condiciones apropiadas en la red vial, y se fomenta un desarrollo orientado al transporte público, se podrá inducir un incremento en su demanda. De lo contrario, se prevén efectos adversos como el aumento en los costos de traslado y el hacinamiento en el transporte público. El incremento de la oferta vial no es una solución a largo plazo, pues tiende a generar un aumento de los niveles de motorización, producto de la expansión de la superficie vial (tráfico inducido), además de fragmentar y deteriorar el espacio público. Cualquier estrategia debe tener como punto focal la mejora y fomento al uso del transporte público masivo y no motorizado en la ZMVM (SEMOVI, 2019b).

Vías ferroviarias

La ZMVM es un importante punto nodal dentro de los tres corredores ferroviarios del país, los cuales convergen en la región centro y tienen origen en los pasos fronterizos del norte (Nuevo Laredo y Piedras Negras), el litoral del Pacífico (Manzanillo, Colima) y el Puerto de Veracruz en el Atlántico. La metrópoli cuenta con un total de 571 km de vías férreas (ver Figura 1.28) y la Estación Intermodal Pántaco es el nodo ferroviario más importante en la región. En 2016, Pántaco ocupó el séptimo lugar a nivel nacional en volumen de tráfico local, moviendo más de 5.5 millones de toneladas de carga (García Ortega & Martner Peyrelongue, 2018), proceso para el cual se requiere del consumo de diésel ferroviario y que representa una fuente de emisión de contaminantes dentro de la región.

Aeropuertos

El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), también conocido como el Aeropuerto Internacional Benito Juárez, es el aeropuerto más importante a nivel nacional. Anualmente moviliza a casi 50 millones de viajantes comerciales nacionales e internacionales. En 2018, el AICM registró 412 mil vuelos comerciales, de los cuales 280 mil fueron nacionales y 132 mil internacionales, más 5 mil vuelos comerciales de carga (SCT, 2020). El AICM atrae viajes y moviliza a población no solo de la región, sino de todo el país, mientras que la quema de turbosina y gasavión representa otra fuente de emisiones dentro de la ZMVM.

Dada la saturación del AICM y la incapacidad de la infraestructura actual para satisfacer la demanda a largo plazo, desde 1990 se han evaluado distintos proyectos para un nuevo aeropuerto internacional en la ZMVM. Actualmente la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en conjunto con la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), dirigen la construcción de un nuevo aeropuerto internacional en la Base Aérea Militar no. 1 Santa Lucía, ubicada en el municipio de Zumpango en el Estado de México (SEDENA, s/f). Se prevé que las obras de la primera etapa del Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles concluyan en octubre de 2021 y que comience a operar en marzo de 2022 (SEDENA, 2019), con una capacidad para atender alrededor de 19 millones de personas al año.

Las necesidades de transporte aéreo de la ZMVM también son atendidas por otros dos aeropuertos en el Estado de México. En el municipio de Atizapán de Zaragoza se ubica el Aeropuerto Nacional Jorge Jiménez Cantú. Por su parte, el Aeropuerto Internacional Lic. Adolfo López Mateos en el municipio de Toluca de Lerdo, Estado de México, si bien se encuentra fuera de la ZMVM, forma junto con el AICM la red aeroportuaria principal de la ZMVM, al atender parte de la demanda de viajes nacionales e internacionales.

1.5.3 Disposición final de Residuos Sólidos Urbanos

La generación de residuos se relaciona directamente con el proceso de urbanización y desarrollo de una ciudad o zona metropolitana. El Estado de México y la Ciudad de México son las dos entidades federativas que generan mayor volumen de residuos sólidos urbanos (RSU) en todo el país; por ejemplo, en 2012 estas dos entidades generaron el 27.9% del total nacional (SEMARNAT, 2016). La elevada generación de residuos dentro de la ZMVM no solo se asocia a la cantidad de población, sino también a la actividad económica; en términos sencillos, la tendencia general es que a mayor PIB y nivel de consumo, mayor será el volumen de RSU generados.

En 2018, la Ciudad de México reportó una generación de más de 13 mil toneladas al día dentro de los límites de la ciudad (4.77 millones de toneladas al año), originadas en diversas fuentes como residencias, comercios, servicios, la central de abastos y otras fuentes que generan residuos de manejo especial y residuos peligrosos (SEDEMA, 2019c). Esto equivale a una generación per cápita de 1.4 kg de residuos al día, los cuales deben ser recolectados para después recibir tratamiento y/o ser trasladados a un sitio de disposición final.

La mayoría de los RSU generados dentro de la Ciudad de México se disponen en rellenos sanitarios localizados en municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM. Desde el cierre definitivo del relleno sanitario Bordo Poniente, IV Etapa, la Ciudad de México no cuenta con un espacio donde disponer sus residuos, por lo que a través de acuerdos con otros estados se usan cuatro rellenos ubicados en los municipios de Chicoloapan, Cuautitlán Izcalli (Bicentenario) e Ixtapaluca (Milagro y Cañada), en el Estado de México, así como un relleno en Cuautla, Morelos. A estos rellenos llegan más de 8000 toneladas al día provenientes de la Ciudad de México; la mayor parte, el 98%, se dispone en los rellenos sanitarios del Estado de México, siendo los rellenos Milagro y Cañada los que reciben la mayor cantidad de residuos: alrededor de 3400 y 2700 toneladas al día, respectivamente. De la generación total en la Ciudad de México, el resto del volumen es recolectado en actividades de prepena o recibe tratamiento para su recuperación, composta-je o uso como combustible alterno. En 2018 se recuperaron aproximadamente 180 toneladas de residuos valorizables al día, lo que equivale al 5% del total de RSU que llegan a plantas de selección. El volumen de RSU orgánicos que se procesaron en plantas de composta en 2018 superó las 1300 toneladas a día, de los cuales aproximadamente 98% se procesó en la planta de composta Bordo Poniente (SEDEMA, 2019c).

Por su parte, para los 59 municipios del Estado de México se estima una generación de 4.3 millones de toneladas al año, lo que equivale a una generación per cápita de 0.9 kg al día. En la entidad se tiene un registro de 48 sitios de disposición final, de los cuales únicamente 12 cuentan con disposición adecuada; es decir, infraestructura para el control de lixiviados y biogás (SMAGEM, 2019). Se reporta una recolección de más de 12 mil toneladas al día y se tienen 16 rellenos sanitarios (activos e inactivos), con una recepción de residuos promedio de más de 7 mil toneladas al día. Estos rellenos se localizan en los municipios de: Atizapán de Zaragoza, Ayapango-Juchitepec, Cuautitlán Izcalli, Chicoloapan, Ecatepec de Morelos, Ixtapaluca, Nicolás de Romero Rubio, Naucalpan y La Paz, Tecámac, Tepotzotlán, Tlalnepantla de Baz y Teoloyucan; además, se contabilizan otros 32 sitios de disposición, controlados y no controlados (SMAGEM, 2019).

En Tizayuca, Hidalgo, se recolectan aproximadamente 240 toneladas de residuos al día (INEGI, 2017a). Actualmente el municipio no cuenta con un relleno sanitario que cumpla con características para el manejo adecuado de RSU. Se reporta un tiradero donde se disponen RSU de forma irregular, en tanto que otra fracción de los residuos se traslada a sitios de disposición localizados en el Estado de México (H. Ayuntamiento de Tizayuca, 2018; SEMARNATH, 2014).

La disposición inadecuada de los residuos sólidos que se generan en una ciudad se asocia a distintas problemáticas ambientales y de salud, como malos olores, contaminación del suelo y del agua. En lo que concierne al tema de calidad del aire, en los rellenos sanitarios se genera biogás, compuesto principalmente por CH_4 y CO_2, ambos GEI. También se generan trazas de CO, un contaminante criterio, además de NH_3 y COV (INEGI, 2017a), los cuales son precursores de contaminantes secundarios. No obstante, el problema principal se suscita en sitios no controlados, donde las prácticas inadecuadas de disposición de residuos pueden derivar en problemáticas como (Köfalusi & Aguilar, 2006):

- Incendios provocados o repentinos en tiraderos a cielo abierto y sitios de disposición final sin infraestructura adecuada para la gestión y manejo de biogás. Como resultado, se emiten partículas suspendidas, CO, NO_x, SO_2 y COV. Estos contaminantes también se generan durante la quema a cielo abierto de residuos sólidos, práctica que responde a usos y costumbres para eliminar los residuos, especialmente en zonas donde los servicios de recolección son inadecuados, y en procesos de incineración donde las condiciones de combustión no son apropiadas.
- Suspensión y arrastre de partículas y microorganismos patógenos por efecto del viento, a falta de prácticas de compactación y recubrimiento diario de los residuos dispuestos en sitios no controlados y tiraderos a cielo abierto.

1.5.4 Gobernanza y planeación urbana

La gobernanza de la planeación urbana en la ZMVM está dividida y fragmentada en términos políticos (OCDE, 2015). Si bien los sistemas económicos, de uso de suelo y de transporte han evolucionado, las fronteras político-administrativas de la región, tanto estatales como municipales, generan barreras para la atención de las necesidades de la población, tanto en términos económicos como sociales. Es así que se crean marcadas diferencias entre la cobertura y la calidad de los servicios públicos entre las tres entidades federativas y las 76 demarcaciones de segundo nivel que conforman la ZMVM. Por ejemplo, muchas decisiones en materia de uso de suelo se toman a nivel municipal, generando contradicciones y conflictos que dificultan la cooperación entre las áreas que definen e implementan políticas públicas urbanas a nivel de gobierno central.

En los gobiernos de la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo, así como en el Gobierno Federal, se identifican múltiples actores, organismos, comisiones, comités y consejos de coordinación y planeación. El gran número de jurisdicciones –a veces administrativamente independientes– complica la planeación a nivel metropolitano. Además, pese a los esfuerzos de coordinación, el modo de operación de las instituciones presenta distintos obstáculos que impiden que se establezca una política integral de desarrollo urbano y movilidad para el total de la ZMVM, destacando los siguientes puntos:

- Organismos que atienden a un solo sector.
- Cultura reactiva en lugar de preventiva ante asuntos o problemas específicos.
- Falta de una visión metropolitana común que guíe las acciones a implementar.
- La estructura legislativa e institucional vigente no es vinculante en materia de coordinación metropolitana.

1.6 Estructura institucional

La gestión de la calidad del aire tiene como objetivo reducir la concentración de los contaminantes atmosféricos. Las políticas públicas en materia de calidad del aire se materializan a través de los Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire, también llamados ProAire, instrumentos en los que se establecen metas, medidas y acciones, a corto, mediano y largo plazo, para mejorar la calidad del aire en una región en específico. Un ProAire permite coordinar de manera transversal a los diferentes actores involucrados en la gestión de la calidad del aire, al interior de los ejecutivos estatales y municipales, y en cooperación con instituciones federales (SEMARNAT, 2017).

Para garantizar el derecho de la población de la ZMVM a un medio ambiente sano (Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2008) varias dependencias en los tres órdenes de gobierno requieren actuar de manera armoniosa y coordinada según sus responsabilidades y funciones, las cuales se detallan en el Capítulo 2. Por su cobertura geográfica, en la ZMVM, en materia de calidad del aire y asuntos relacionados a la misma, actúan Dependencias y Entidades de la Administración Pública del Gobierno Federal, los Gobiernos Estatales de tres entidades federativas (Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo) y autoridades de 76 Municipios y Alcaldías. Además, dentro de cada uno de los tres niveles actúan diferentes secretarías, direcciones y departamentos; si bien la gestión de la calidad del aire será responsabilidad principal de las dependencias en materia ambiental, por la naturaleza de las fuentes de emisión y el alcance de los impactos de la mala calidad del aire, se requiere la cooperación con autoridades en materia de comunicaciones y transportes, movilidad, tránsito, salud pública, desarrollo urbano, energía, desarrollo económico y fomento industrial, por poner algunos ejemplos.

A nivel nacional, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (DGGCARETC), coordina la política nacional de gestión de calidad del aire. La herramienta de planeación de mayor jerarquía en la materia es la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (ENCA), la cual orienta y coordina *"acciones entre diferentes instancias gubernamentales para controlar, mitigar y prevenir la emisión y concentración de contaminantes en la atmósfera en ambientes rurales y urbanos"* (SEMARNAT, 2017). Dichas acciones requieren de la colaboración con otras secretarías federales como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Salud (SS) y la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es un organismo público descentralizado y sectorizado en la SEMARNAT, el cual juega un papel importante en el ámbito federal, al tener como objeto *"realizar investigación científica o tecnológica en materia de… protección al ambiente y preservación y restauración del equilibrio ecológico"* (INECC, 2016). Es así que el INECC coordina varios esfuerzos relacionados con el diagnóstico de fuentes de emisión, el estado de la calidad del aire y su impactos en la población. El monitoreo y vigilancia del cumplimiento de la legislación ambiental requiere a su vez de la participación de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), por ejemplo, para monitorear y sancionar a fuentes fijas de jurisdicción federal.

Finalmente, a nivel nacional la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) funge como organismo de coordinación política en la materia, entre autoridades federales, estatales y municipales ambientales en el centro de México. Esta fue creada mediante un convenio de coordinación entre el Gobierno Federal, por conducto de la SEMARNAT, y los Gobiernos de la Ciudad de México y los estados de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala. La CAMe cuenta con un instrumento vigente para la gestión de la calidad del aire en los estados antes mencionados, tres de los cuales forman parte de la ZMVM; este instrumento es el Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis, ProAire de la Megalópolis 2017-2030.

Dentro de la ZMVM, tres autoridades estatales en materia de medio ambiente se encargan de instrumentar los ProAire:

- la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), a través de la Dirección General de Calidad del Aire;
- la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM), a través de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, y
- la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMARNATH), a través de la Dirección General de Gestión de Calidad del Aire.

El presente ProAire corresponde a la actualización del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. Sin embargo, en el área de estudio se encuentran vigentes el ProAire de la Megalópolis 2017 - 2030, y otros dos ProAire a nivel estatal que cubren parcialmente el territorio de la ZMVM, que son:

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México, ProAire 2018-2030

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo, ProAire 2016-2024

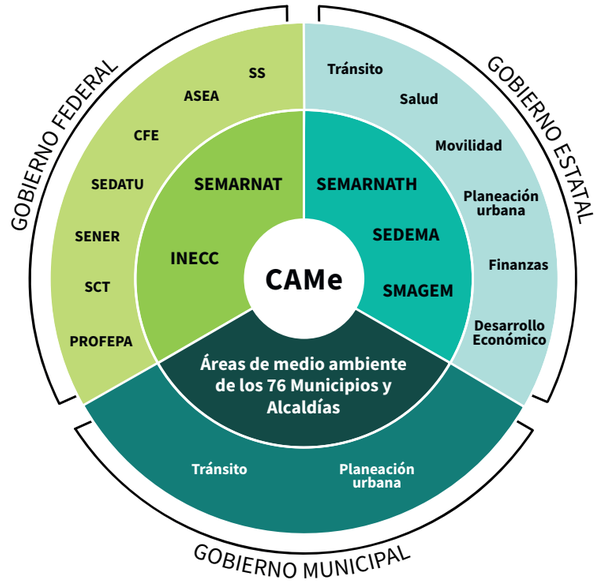


Figura 1.33 Ejemplo de instituciones gubernamentales en materia de calidad del aire dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaboración propia.*

Es así que la implementación de las medidas y acciones para mejorar la calidad del aire en la ZMVM implica un trabajo coordinado entre los tres gobiernos estatales y con las dependencias federales pertinentes. Además, las procuradurías ambientales estatales serán las encargadas de vigilar el cumplimiento de la legislación ambiental en materia de contaminación atmosférica; en la ZMVM actúan la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT) de la Ciudad de México, la Procuraduría de Protección al Ambiente (PROPAEM) del Estado de México y la Procuraduría Estatal de Protección al Ambiente (PROESPA) de Hidalgo. A nivel estatal también participan otros órganos descentralizados que promueven la investigación científica y tecnológica, como el Instituto Estatal de Energía y Cambio Climático del Estado de México (IEECC).

Los gobiernos locales también se deben involucrar en la gestión de la calidad del aire, al contar con atribuciones específicas para la protección, restauración y conservación del medio ambiente. Las áreas de medio ambiente dentro de los ayuntamientos y alcaldías deben ser partícipes de las acciones orientadas a la prevención de la contaminación atmosférica que dicte un ProAire. Cabe mencionar que la implementación de programas transversales también requiere la participación del sector privado, la academia, los medios de comunicación, las organizaciones no gubernamentales y la sociedad.

Un ejemplo del tipo de coordinación que exige un ProAire metropolitano es la operación de Programas de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO) homologados. El Gobierno Federal expide las Normas Oficiales Mexicanas[17] que establecen los límites máximos permisibles de gases contaminantes, en tanto que el Estado de México y la Ciudad de México implementan sus respectivos PVVO que se publican de manera semestral. La coordinación es necesaria para garantizar que la Ciudad de México reconozca los hologramas de verificación otorgados por el Gobierno del Estado de México y viceversa. Posteriormente, los hologramas emitidos a los vehículos se vinculan con otros programas y medidas para mejorar la calidad del aire, como el programa Hoy No Circula, y para implementar acciones específicas durante episodios de contaminación severos, como lo hace el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas. Finalmente, los agentes de tránsito estatales y municipales vigilan que los vehículos circulen en cumplimiento con el PVVO. Para que el programa funcione de manera adecuada en toda la ZMVM, se requiere el trabajo coordinado y consensuado de aproximadamente 80 autoridades diferentes.

Es evidente la necesidad de un órgano de coordinación que se encargue de la planeación y ejecución de acciones tendientes a proteger el medio ambiente, y preservar y restaurar el equilibrio ecológico en la zona. El papel de la CAMe cobra relevancia al facilitar la implementación de una visión metropolitana y regional que guíe las acciones encaminadas a revertir las tendencias de deterioro y mejorar la calidad del aire. Además de mecanismos adecuados de coordinación, la generación de recursos propios para el financiamiento de acciones ambientales es un factor determinante en la implementación de los ProAire. En ese sentido, el Fideicomiso no. 1490 “Fideicomiso para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis”, administrado por la CAMe, establece procedimientos para captar recursos financieros y después permite destinarlos al pago de gastos para contribuir a cumplir los fines del mismo fideicomiso.

Sin embargo, la división y fragmentación en términos políticos dentro de la ZMVM (OCDE, 2015), derivada del gran número de jurisdicciones independientes que actúan dentro de ella, es uno de los principales obstáculos para el tipo de coordinación que persigue la CAMe. Si bien la Comisión facilita la coordinación entre autoridades ambientales, pueden existir barreras en la gobernanza de otros sectores que deberían participar en la gestión integral de la calidad del aire. Esto genera marcadas diferencias entre la cobertura y la calidad de los servicios públicos –por ejemplo infraestructura para transporte no motorizado- y las políticas que se implementan en la ZMVM para mejorar la calidad del aire. La planeación a nivel metropolitano requiere de una visión común que integre a todos los sectores involucrados y no únicamente al sector ambiental.

Finalmente se destaca la existencia de entes administrativos a nivel estatal cuyo objetivo es coordinar relaciones inter-gubernamentales y contribuir a una planeación y seguimiento metropolitano. En específico, la Ciudad de México cuenta con una Subsecretaría de Coordinación Metropolitana y Enlace Gubernamental, en tanto que la Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano del Gobierno del Estado de México tiene entre sus funciones *“ampliar y fortalecer los mecanismos de coordinación con los gobiernos Federal, de la Ciudad México, de las entidades federativas vecinas y de los municipios conurbados, para atender de manera integral los asuntos de carácter metropolitano”.*

17 Estas normas son: NOM-041-SEMARNAT-2015, NOM-042-SEMARNAT-2003, NOM-045-SEMARNAT-2017, NOM-047-SEMARNAT-2014 y NOM-167-SEMARNAT-2017. Estas se describen en el Capítulo 2 del presente ProAire.

02

Fundamento jurídico y marco normativo

Un marco jurídico internacional y nacional sustenta y justifica la creación, elaboración e implementación del ProAire ZMVM 2021-2030.

02



El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM) 2021-2030 se sustenta legalmente en un marco jurídico internacional y nacional. El contenido de este capítulo identifica los ordenamientos jurídicos que justifican la creación e implementación del ProAire en todos los niveles de gobierno que tienen jurisdicción sobre la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Este capítulo describe las disposiciones aplicables en materia de calidad del aire, así como el marco de obligaciones del gobierno nacional, la Ciudad de México, el estado de Hidalgo y el Estado de México, las alcaldías y los municipios que los conforman, con relación a las fuentes fijas, móviles y de área que generan contaminantes atmosféricos. La reseña sigue la prioridad jurídica de México, de allí que arranca con la Constitución Política Nacional para posteriormente describir los instrumentos de derecho internacional celebrados por México y la legislación federal que guardan relación con la protección a la atmósfe-

ra. Tras enmarcar las principales obligaciones nacionales en la materia, la descripción se traslada a las entidades que conforman la ZMVM siguiendo el orden jerárquico legislativo. El capítulo fue elaborado en colaboración con la Comisión de Derechos Humanos de la Ciudad de México y se utilizó el ProAire del Estado de México 2018 - 2030 como fuente principal de información.

2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) establece los lineamientos que rigen la actuación de los actores públicos y privados que se encuentran de manera permanente o transitoria en el territorio nacional. En el artículo primero se dispone que todas las personas gozarán de los derechos humanos reconocidos en ella y en los tratados internacionales de los que el Estado Mexicano sea parte, señalando al gobierno en todos sus niveles como el protector de los mismos. Esta afirmación cobra relevancia en materia de calidad del aire y sus efectos en la salud de las personas y en el equilibrio ecológico.

En el artículo 4 de la CPEUM se expresa que:

> *"Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley".*

A efecto de materializar dicho derecho humano, el párrafo primero del artículo 25 de la CPEUM establece que el desarrollo nacional deberá ser integral y sustentable. En otras palabras, se debe mantener un equilibrio sustentable, e invertir en el mismo, de tal manera que el uso de los recursos naturales (incluido el aire) satisfaga las necesidades actuales sin comprometer las de generaciones futuras.

La CPEUM interpreta al aire del país como *"el espacio situado sobre el territorio nacional"* y establece que está sujeto al derecho nacional, a la soberanía de la Nación y, por lo tanto, a su régimen democrático y niveles de gobierno. El aire se reconoce como un recurso natural o bien nacional sujeto al régimen de dominio público cuya propiedad pertenece a la Nación, cuya explotación o aprovechamiento por actividades de origen antropogénico deberá de sujetarse a la regulación en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente, la cual establece, en la fracción XXIX-G del artículo 73, un marco de concurrencia entre la Federación, las Entidades Federativas y los Municipios.

En el 2005, los gobiernos del Distrito Federal y del Estado de México emitieron la Declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de México, la cual se integra a los programas que promuevan las adecuaciones que correspondan a los alcances territoriales previstos en los convenios, planes, programas y acciones institucionalizados por las Comisiones Metropolitanas.

Finalmente, reconociendo la conurbación imperante entre la Ciudad de México y diversos municipios de los estados de Hidalgo y de México, creando lo que se conoce como la Zona Metropolitana del Valle de México, el segundo párrafo del apartado C del artículo 122 de la CPEUM faculta al Gobierno Federal, los gobiernos de las entidades federativas citadas, los ayuntamientos

municipales y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, a que establezcan mecanismos de coordinación administrativa en diversas materias, tales como la de protección al ambiente y preservación y restauración del equilibrio ecológico; cabe destacar que, para dar cumplimiento a la disposición constitucional citada, se creó la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe), lo cual se aborda más adelante en la sección 2.3.4.

En este sentido, la ley prevé que el aire y la atmósfera se protegen tanto por ser recursos naturales, como elementos indispensables para garantizar el derecho a un medio ambiente sano.

2.2 Marco jurídico internacional

El marco jurídico internacional en materia de calidad del aire se basa primordialmente en una visión de protección a los derechos humanos, que se relaciona directamente con la protección a la salud pública y la calidad de vida de la población. En esta sección se mencionan los tratados vinculantes más representativos para el ProAire ZMVM 2021-2030.

2.2.1 Calidad del aire y derechos humanos[1]

El derecho a respirar aire puro es uno de los elementos del derecho a un medio ambiente saludable y sostenible. La mala calidad del aire tiene implicaciones en varios derechos humanos, como lo son el derecho a la vida, la salud, a un nivel de vida adecuado y a un medio ambiente sano.

La contaminación atmosférica afecta a todas las personas y es una violación generalizada al derecho a respirar aire puro. La carga que suponen las enfermedades asociadas a dicha contaminación repercute en varios grupos de población, sobre todo en aquellos con menores capacidades para proteger su salud. Entre los grupos de atención prioritaria se encuentran las mujeres, la niñez, las personas adultas mayores, las personas que viven en situación de pobreza y las personas con patologías preexistentes, como afecciones respiratorias o cardíacas. En el Capítulo 6 del documento se profundiza en las afectaciones de la contaminación del aire en la salud de la población.

Las obligaciones relacionadas con el aire limpio están implícitas en varios instrumentos internacionales de derechos humanos. Tal es el caso de la Declaración Universal de Derechos Humanos, que en su artículo 25 menciona el derecho a un nivel de vida adecuado; el Pacto Internacional de Derechos Civiles y Políticos, que en su artículo 6 señala que el derecho a la vida es inherente a la persona humana; y el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, que en su artículo 12 reconoce el derecho de toda persona al disfrute del más alto nivel posible de salud física y mental y las medidas que cada Estado debe realizar.

De hecho, tanto el Consejo de Derechos Humanos, como el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) han pedido a los países que formulen políticas nacionales con el objetivo de reducir y eliminar la contaminación atmosférica[2]. La Alta Comisionada para los Dere-

1 Elaborado en coordinación con la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos.
2 Observación general núm. 14 (2000) sobre el derecho al disfrute del más alto nivel posible de salud.

chos Humanos (A/HRC/19/34 y Corr.1) y el Consejo de Derechos Humanos (resolución 35/24) han subrayado la importancia de hacer frente a la contaminación atmosférica. Asimismo, la Nueva Agenda Urbana, elaborada en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III) y aprobada por la Asamblea General (resolución 71/256, anexo), refiere como un asunto prioritario la relación entre el respeto de los derechos humanos y la mejora de la calidad del aire exterior e interior.

Estas declaratorias y llamados a la acción por parte de la comunidad internacional han continuado en los últimos años. Recientemente, en un informe sobre los derechos de la infancia y el medio ambiente (A/HRC/37/58), se subrayó la necesidad de reducir los efectos de la contaminación atmosférica en la salud. Además, en 2016, el Relator Especial sobre las implicaciones para los derechos humanos de la gestión y eliminación ecológicamente racionales de las sustancias y los desechos peligrosos, denunció la "pandemia silenciosa" de enfermedades derivadas de la exposición a sustancias tóxicas, incluida la contaminación atmosférica, en la infancia (A/HRC/33/41). Otros relatores especiales también han elaborado informes de países en los que se destaca la importancia de hacer frente a la contaminación atmosférica (A/HRC/30/40/Add.1 y Corr.1, A/HRC/37/58/Add.2). Finalmente, en 2018, la Experta Independiente sobre el disfrute de todos los derechos humanos por las personas de edad, hizo un llamado a los Estados para que redujeran la contaminación atmosférica dado que *"afecta de manera desproporcionada a la salud de las personas mayores"* (A/HRC/39/50).

En el año 2019, el Relator Especial designado por el Consejo de Derechos Humanos presentó el informe sobre la cuestión de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el disfrute de un medio ambiente sin riesgos, limpio, saludable y sostenible (A/HRC/40/55).

El informe reconoce, en los párrafos 24 y 25, sobre el impacto a la salud humana que ***"la contaminación atmosférica por partículas finas es el mayor riesgo ambiental para la salud en todo el mundo".***

También, señala que ***"más del 90% de la población mundial vive en regiones, que superan las directrices de la OMS sobre la calidad del aire exterior saludable, en particular las partículas finas y las $PM_{2.5}$, México incluido".***

Además, en el párrafo 63 de dicho informe, se establece que ***"Los Estados deben establecer redes y programas para vigilar la calidad del aire y sus efectos sobre la salud, en particular en las zonas urbanas y otras regiones de conocida mala calidad del aire. Los datos de la vigilancia directa pueden complementarse con observaciones satelitales de la calidad del aire y con los resultados de modelos computacionales. La vigilancia es un requisito previo para cumplir la obligación del Estado de proporcionar información al público y también es esencial para la formulación de políticas con conocimiento de causa"*** (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2019).



Por ello, el relator recomienda a los países incluir las siguientes medidas en las políticas nacionales de gestión de la calidad del aire:

- Difundir información al público y al sector empresarial sobre las mejores tecnologías disponibles para evitar o controlar la emisión de contaminantes atmosféricos.
- Promover un diseño urbano compacto y de uso mixto, además de proteger y ampliar los espacios verdes urbanos; dar más prioridad a las inversiones en la seguridad peatonal, la seguridad de ciclistas y el transporte público rápido, que a la infraestructura para los vehículos privados.
- Exigir a la industria que reduzca y elimine las emisiones de contaminantes atmosféricos nocivos, con particular énfasis a las instalaciones industriales altamente contaminantes, como hornos de coque, fundiciones, refinerías, plantas cementeras y ladrilleras.
- Crear leyes, políticas y programas que desalienten o prohíban la quema de residuos de cultivo o desechos agrícolas y ayuden a la adopción de prácticas agrícolas menos contaminantes.
- Negar la expedición de permisos para nuevas instalaciones o actividades contaminantes en áreas críticas desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, hasta que la calidad del aire en esas zonas cumpla las normas nacionales y se determine que seguiría cumpliéndolas a pesar de la contaminación adicional.
- Impulsar la adopción de vehículos más limpios, reforzando para ello las normas de emisión y de consumo energético, además de acelerar al mismo tiempo la transición hacia vehículos de emisión cero.
- Hacer frente a la contaminación atmosférica y al cambio climático de manera integrada, a fin de maximizar los beneficios secundarios.

Los principios marco sobre los derechos humanos y el medio ambiente establecen tres categorías de obligaciones de los Estados: obligaciones procesales, obligaciones sustantivas y obligaciones especiales en pro de quienes se encuentran en situación de vulnerabilidad. Por lo tanto, los principios marco pueden aplicarse en el contexto de la contaminación atmosférica a fin de que se respeten, protejan y hagan efectivos los derechos humanos.

Las obligaciones procesales de los Estados en relación con el derecho a respirar aire puro incluyen deberes relacionados con la promoción de la educación y la concientización pública. Dentro de ellos también se encuentran: el acceso a la información, el fomento de la participación del público en la evaluación de los proyectos, políticas y decisiones ambientales que se propongan, y el establecimiento de vías de comunicación accesibles y sin demoras. Por ello, en la elaboración del presente Programa, se realizaron talleres y reuniones donde también participaron integrantes de la academia y de la sociedad civil organizada.

Con respecto a las obligaciones sustantivas, los países no deben violar el derecho a respirar aire puro con actos cometidos por ellos y deben proteger ese derecho frente a violaciones cometidas por terceros. Para ello, deben establecer, aplicar y hacer cumplir leyes, políticas y programas para garantizar estos derechos de manera efectiva. Para lograrlo, se recomienda que los países adopten las siguientes siete medidas:

1. Vigilar la calidad del aire y sus efectos en la salud humana.
2. Evaluar las fuentes de contaminación atmosférica.
3. Poner a disposición del público la información, incluidos los avisos de salud pública.
4. Establecer legislación, reglamentos, normas y políticas sobre la calidad del aire.
5. Elaborar planes de acción sobre la calidad del aire a nivel local, nacional y, de ser necesario, regional.
6. Aplicar un plan de acción sobre la calidad del aire y hacer cumplir las normas.
7. Evaluar los progresos realizados y, de ser necesario, fortalecer el plan para asegurar que se cumplan las normas.

En cuanto a obligaciones especiales en pro de quienes se encuentran en situación de vulnerabilidad, se recomienda que los países realicen esfuerzos adicionales para llegar a las mujeres, la niñez, así como a otras personas en situaciones de vulnerabilidad, a fin de asegurar que sus necesidades se tomen en cuenta en la formulación de las políticas ambientales.

Tratados Internacionales en materia de Derechos Humanos

Como se mencionó anteriormente, la CPEUM prevé que las personas gozarán de los derechos humanos previstos en ella y en los Tratados Internacionales. Se define en el articulado de la propia constitución y en las tesis del poder judicial que los tratados internacionales tienen un nivel jerárquico que los coloca por encima de las leyes nacionales, no así de los preceptos constitucionales.

Como se puede observar más adelante, en el derecho internacional, la calidad del aire está estrechamente vinculada con derechos humanos como el derecho a la vida, a la salud y a un ambiente sano para el bienestar de las personas. Derivado de ello, la comunidad internacional ha creado diferentes instrumentos vinculantes y no vinculantes que buscan proteger al ser humano mediante el cuidado al medio ambiente.

En el Sistema Universal de Derechos Humanos se encuentra el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC), el cual establece en su artículo 12 que los países miembros reconocen el derecho de toda persona al disfrute del más alto nivel posible de salud física y mental. El pacto establece que una de las medidas que deberán adoptar los países para proteger estos derechos es precisamente el cuidado ambiental. Además de ello, la Observación General número catorce del Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de las Naciones Unidas, el cual se encarga de supervisar el PIDESC, señala que la salud es un derecho humano fundamental e indispensable para el ejercicio de los demás derechos humanos. Por ello, el mantenimiento de una buena calidad del aire se convierte en una obligación para México y cualquier país que sea parte de esta comunidad internacional.

Asimismo, a escala regional, en el Sistema Interamericano de Derechos Humanos, del cual México forma parte, el Protocolo Adicional a la Convención Americana sobre Derechos Humanos en materia de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, conocida como “Protocolo de San Salvador”, establece en su artículo 11 que toda persona tiene derecho a vivir en un medio ambiente sano, señalando que las naciones parte promoverán la protección, preservación y mejoramiento del medio ambiente.

2.2.2 Instrumentos Internacionales relativos a la calidad del aire

Dentro de los tratados internacionales que son jurídicamente vinculantes para las instituciones mexicanas, existen declaraciones o acuerdos en donde México se ha comprometido a través de una visión homogénea a alcanzar ciertas metas reconocidas internacionalmente como buenas prácticas. Por ejemplo, el Protocolo de Kioto es un instrumento de carácter legalmente vinculante que fue adoptado en el año 1997 y del cual México forma parte; se destaca que en el año 2013 reanudó su vigencia hasta el 2020. El objeto principal de este Protocolo es reducir las emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero (CyGEI) que causan el calentamiento global, entre los que se encuentran el metano, un contaminante orgánico volátil precursor de contaminantes atmosféricos.

México es parte de acuerdos y tratados respecto a la protección del medio ambiente que, si bien no son jurídicamente vinculantes, no dejan de establecer una guía al actuar público. A continuación se describen algunos de los acuerdos y tratados más relevantes.

La Declaración de Estocolmo sobre el Medio Ambiente Humano Promulgada en el año 1972	Marca en su segundo principio, *que “Los recursos naturales de la tierra incluidos el aire, el agua, la tierra, la flora y la fauna y especialmente muestras representativas de los ecosistemas naturales, deben preservarse en beneficio de las generaciones presentes y futuras, mediante una cuidadosa planificación u ordenación, según convenga”* (ONU, 1992).
La Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo Del año 1992	Estableció entre sus principios que *“Para alcanzar el desarrollo sostenible y una mejor calidad de vida para todas las personas, los Estados deberían reducir y eliminar las modalidades de producción y consumo insostenibles y fomentar políticas demográficas apropiadas”* además de *“Promulgar leyes eficaces sobre el medio ambiente. Las normas, los objetivos de ordenación y las prioridades ambientales deberían reflejar el contexto ambiental y de desarrollo al que se aplican”* (ONU, 1992).
La Declaración de Johannesburgo sobre el Desarrollo Sostenible Del año 2002	Reconoce que “*el desarrollo sostenible exige una perspectiva a largo plazo y una amplia participación en la formulación de políticas, la adopción de decisiones y la ejecución de actividades a todos los niveles”* (ONU, 2002).

Además, la resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas 66/288[3] (El futuro que queremos), señala en la sección V, apartado A, numeral 135, que los Estados Miembro se comprometen a promover políticas que apoyen una buena calidad del aire. Asimismo, en materia de salud pública, el numeral 141 reconoce la amenaza que representan las enfermedades relacionadas a la contaminación del aire como uno de los principales obstáculos para el desarrollo sostenible. Por ello, establece la intención de reducir la contaminación de la atmósfera.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), la cual es el organismo de las Naciones Unidas encargado de gestionar políticas de prevención, promoción e intervención a nivel mundial en materia de salud, publicó en el año 2005 las Guías de la Calidad del Aire (GCA). Estas Guías ofrecen recomendaciones cuyo objetivo es guiar a la comunidad internacional en el establecimiento de límites permisibles de concentración en el aire ambiente para ciertos contaminantes atmosférico; en específico, se abordan partículas suspendidas de diámetro aerodinámico menor a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente), ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2), los cuales tienen impactos o efectos perjudiciales en la salud humana y de los ecosistemas. Por ello, los países miembros de la ONU, como México, deben reconocer y considerar estos parámetros en el desarrollo de sus normas, reglamentos y leyes relacionadas con la calidad del aire y la protección de la salud pública; así como los límites máximos permisibles de las emisiones de contaminantes a la atmósfera de las fuentes fijas y/o móviles (OMS, 2006). Estas guías son el instrumento internacional más relevante para regular la calidad del aire, pues definen niveles de contaminación atmosférica a los que deben de aspirar las ciudades para que su ambiente sea aceptable para el bienestar de la población y la protección de su salud. Estos niveles sirven de base para establecer los límites permisibles en las normas de salud ambiental federales, los niveles de activación de contingencias ambientales atmosféricas y el diseño de políticas públicas y programas en la materia, como es el caso del ProAire ZMVM 2021-2030. Además de los límites de las GCA, la OMS también define objetivos intermedios (OI) que los países pueden utilizar para definir el progreso en el proceso de reducir la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos. Más adelante, en el Capítulo 3 se realiza un diagnóstico de la calidad del aire en la ZMVM donde se analiza el cumplimiento de las normas de salud vigentes e incluye un comparativo con las GCA establecidas por la OMS. Por otro lado, el Capítulo 6 detalla los efectos nocivos que los contaminantes criterio tienen en la salud pública.

Otro instrumento internacional a mencionar es la Declaración y Plataforma de Acción de Beijing de 1995. Esta es una agenda que los gobiernos se comprometen a aplicar para lograr la igualdad de género y garantizar los derechos humanos de las mujeres y las niñas en todo el mundo. Entre las doce esferas de especial preocupación que abarca se encuentra la desigualdad basada en el género en la gestión de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. A su vez, en atención a esta preocupación, se establece que los gobiernos y otros agentes deberán propiciar la integración de la perspectiva de género en las políticas y programas, así como evaluar sus efectos en las mujeres y los hombres antes de su adopción.

2.2.3 Agenda 2030

La Asamblea General de la ONU adoptó la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible en 2015 (ONU, 2015). Esta agenda representa un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, dado que busca integrar y equilibrar las tres dimensiones del desarrollo sostenible –económica, social y ambiental– en una visión global e integral que incluye 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), 169 metas y 231 indicadores globales.

3 Septiembre de 2012.



Figura 2.1 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030
Fuente: *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015).*

Dentro de la Agenda, siete objetivos son particularmente relevantes para el ProAire. Estos son el 3, 5, 7, 11, 12, 13 y 15. El objetivo número tres se refiere a Salud y Bienestar, y busca garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todas las personas a cualquier edad. Específicamente, la meta 3.9 establece que, al 2030, se debe reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la contaminación del aire, el agua y el suelo.

El ODS 5, particularmente a través de sus metas 5.5, 5.a y 5.c, cobra importancia en la elaboración de este documento al buscarse la participación plena y efectiva de las mujeres en la toma de decisiones, así como el fortalecimiento de políticas acertadas y leyes aplicables que promuevan la igualdad de género.

Los derechos humanos son un elemento fundamental de los ODS y la mejora de la calidad del aire es esencial para alcanzar varias metas que forman parte de ellos. Algunas metas por destacar dentro del ODS 7, Energía Asequible y No Contaminante, son la meta 7.1 sobre el acceso universal a servicios energéticos modernos, así como la meta 7.2 sobre el aumento del uso de la energía renovable.

Por su lado, el ODS 11 se enfoca en las ciudades y comunidades sostenibles, menciona que las urbes enfrentan grandes problemas, como la contaminación, la falta de servicios básicos y el deterioro de la infraestructura. Dos de las metas del ODS 11 se relacionan directamente con la calidad del aire:

- La meta 11.6 plantea reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, lo que incluye prestar especial atención a la calidad del aire.

- La meta 11.7 implica proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres, la población infantil, personas adultas mayores y personas con discapacidad. Dado que el aire es un elemento que integra a estos espacios públicos, su calidad debe permitir que la población se desarrolle de manera segura.

En lo que respecta al ODS 12, Producción y Consumos Responsables, la meta 12.4 versa sobre la gestión ambientalmente racional de los productos químicos y los desechos. Por su parte, el ODS 13, Acción por el Clima, también se relaciona con la calidad del aire. La Agenda 2030 busca impulsar la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, de tal manera que estas sean adoptadas en políticas, estrategias y planes nacionales. Otra de las metas del ODS 13 es mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él y la reducción de sus efectos. Muchas de las medidas enfocadas a combatir el cambio climático inciden directamente sobre las emisiones de gases contaminantes, existiendo un vínculo entre el mejoramiento de la calidad del aire y las acciones a favor del clima.

Finalmente, el ODS 15 dirige su atención hacia la vida en los ecosistemas terrestres. A través de este objetivo, se promueve el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, con el fin de frenar la degradación de las tierras y la pérdida de diversidad biológica. Algunas de sus metas específicas son luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con efecto neutro en la degradación del suelo. Los suelos erosionados son una fuente natural de contaminación atmosférica, por lo que su rehabilitación conforme a lo estipulado en el ODS 15 contribuye al mejoramiento de la calidad del aire.

2.2.4 Acuerdos bilaterales y multilaterales celebrados por México en materia de calidad del aire

México también ha suscrito varios instrumentos internacionales de carácter bilateral y multilateral que influyen en las políticas de calidad del aire, pues buscan controlar emisiones atmosféricas asociadas a los contaminantes criterio que se regulan en este Programa. En este sentido, la intención principal de estos mecanismos es controlar la transferencia de contaminantes de un país a otro. A diferencia de los instrumentos mencionados anteriormente, estos acuerdos son vinculantes para los países que los suscriben y que se comprometen a un objetivo común, siendo su alcance regional en lugar de global.

El Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC), que entró en vigor el 1 de julio de 2020, señala en el Capítulo 24 sobre Medio Ambiente, apartado 24.11 referente a la Calidad del Aire, que las Partes reconocen que *"la contaminación del aire es una grave amenaza para la salud pública, la integridad de los ecosistemas y el desarrollo sostenible, y advierten que la reducción de los contaminantes del aire proporciona múltiples beneficios"*. Asimismo, el tratado indica que los tres países reconocen que *"la contaminación del aire puede trasladarse largas distancias e impactar la capacidad de cada Parte para lograr sus objetivos de calidad del aire"* (T-MEC, 2019). Por ello, las Partes reconocen la importancia de reducir la contaminación del aire dentro de su territorio nacional para evitar el transporte transfronterizo de contaminantes.

Respecto a la información pública y la transparencia en el desarrollo e implementación de medidas para prevenir la contaminación atmosférica y asegurar el acceso a datos sobre la calidad del aire, las Partes *"pondrán a disposición del público los datos y la información sobre la calidad del aire relativa a sus programas y actividades y procurarán garantizar que estos datos sean fácilmente accesibles y comprensibles para el público"*. Además, el párrafo cuarto señala que *"las Partes reconocen el valor de armonizar las metodologías de monitoreo de la calidad del aire"* (T-MEC, 2019).

El T-MEC reconoce la importancia de los acuerdos internacionales y otros esfuerzos para mejorar la calidad del aire y controlar los contaminantes atmosféricos, incluyendo aquellos que tienen el potencial de transportarse largas distancias. Asimismo, México, Estados Unidos y Canadá cooperaran para abordar asuntos de interés mutuo con respecto a la calidad del aire. El tratado señala que, como parte de la cooperación, se podrá incluir el intercambio de información y experiencia relacionada con los siguientes temas (T-MEC, 2019):



El acuerdo entre México y los Estados Unidos de América (EUA) sobre la Cooperación para la Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México entró en vigor en 1991 con el propósito de cooperar en la protección, mejoramiento y conservación del medio ambiente en la zona que hoy en día prácticamente se define como la ZMVM. Específicamente el artículo tercero señala la posibilidad de colaborar en el control de las fuentes de contaminación que tienen un efecto directo o indirecto sobre la calidad del aire ambiental en la zona metropolitana. En el mismo año, también entró en vigor el Acuerdo de Cooperación Ambiental entre el Gobierno Mexicano y el Gobierno de Canadá para establecer la cooperación bilateral para los aspectos relacionados con el ambiente atmosférico, incluyendo, entre otros, la contaminación del aire, así como también el monitoreo y los métodos de evaluación de la calidad ambiental.

El Acuerdo de Cooperación en Materia de Medio Ambiente entre el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y la República Federativa del Brasil tiene más de 20 años de vigencia y fue adoptado con el espíritu de establecer un marco de cooperación bilateral. No obstante que se aparta del objetivo transfronterizo, incluye aspectos relacionados con el ambiente atmosférico, la lluvia ácida, la capa de ozono, la calidad del aire, el monitoreo y métodos de evaluación de la calidad ambiental.

En 2019, México ratificó el Acuerdo de París, destacando los esfuerzos por *"transversalizar el tema del cambio climático en los Planes Sectoriales de la Administración Pública Federal"* (SEMARNAT, 2019). En seguimiento a este compromiso internacional, el ProAire de la ZMVM se elabora con una visión de integralidad con las políticas de acción climática regionales. Las acciones incluidas en el ProAire incluyen medidas y acciones que además de reducir los contaminantes locales, contribuyen a la mitigación de CyGEI. Por otro lado, además de las sinergias en materia de mitigación, este programa incorpora una visión de "adaptación" al cambio climático, ya que reconoce que la modificación de los patrones del clima regional tendrá un efecto en el comportamiento de la química atmosférica y por ende en las concentraciones de contaminantes a las que estará expuesta la población de la ZMVM. La relación entre cambio climático y calidad del aire se desarrolla más adelante en el Capítulo 4 de este Programa.

En 2020, el Senado de la República aprobó el Acuerdo en Materia de Cooperación Ambiental entre los Gobiernos de los Estados Unidos Mexicanos, de los Estados Unidos de América y de Ca-

nadá, en el marco del T-MEC, el cual reconoce el carácter global de los problemas ambientales. Así pues, como acciones a seguir, señala tecnologías que promuevan la calidad ambiental y mitiguen el daño ambiental, el monitoreo y métodos de evaluación de la calidad ambiental y la planeación de contingencias ambientales y respuesta a emergencias en materia de calidad del aire.

El ProAire comparte muchos de los objetivos que se plasman en estos acuerdos bilaterales y multilaterales, por lo que la implementación de las medidas descritas en este Programa permitiría coadyuvar al cumplimiento de los compromisos internacionales que México ha suscrito en estos acuerdos. Asimismo, estos acuerdos sientan la base para que en un futuro exista cooperación entre México y otros países para implementar las medidas del ProAire.

2.3 Legislación federal

2.3.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), tiene por objeto establecer las disposiciones referentes a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente en el territorio nacional. Específicamente, en lo referente a la calidad del aire, el artículo 110 indica como un objetivo nacional reducir y controlar las emisiones contaminantes, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población en todos los asentamientos humanos y regiones del país.

En adición a lo anterior, en la LGEEPA se establecen facultades en la materia tanto para la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) como para las Entidades Federativas. A nivel federal, se establece en el artículo 111 que será competencia de la SEMARNAT atender lo siguiente:

- Expedir Normas Oficiales Mexicanas (NOM) sobre calidad ambiental requerida, estableciendo los Límites Máximos Permisibles (LMP) correspondientes.
- Integrar y actualizar el inventario de fuentes de jurisdicción federal, y coordinarse con gobiernos locales para integrar inventarios nacionales o regionales.
- Expedir programas para reducción de emisiones.
- Promover y apoyar técnicamente a gobiernos locales en la formulación de programas de gestión de calidad del aire.
- Requerir cumplimiento de límites máximos permisibles a fuentes de jurisdicción federal.
- Aprobar los programas de gestión de calidad del aire de los gobiernos locales.
- Expedir, en coordinación con la Secretaría de Economía, las NOM que establezcan límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, provenientes de vehículos en planta y en circulación, considerando los valores de concentración máxima permisible de contaminantes para el ser humano determinados por la Secretaría de Salud.
- Sancionar administrativamente las violaciones a los preceptos de la ley y sus reglamentos.
- Definir las fuentes que son de jurisdicción federal, estatal y municipal.

Con respecto a las facultades establecidas desde la LGEEPA para las entidades federativas, municipios y demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, se dispone en el artículo 112 que los gobiernos locales deberán:

- Atender las fuentes fijas, dentro de las que también se consideran las de carácter de área, que funcionen como establecimientos industriales, comerciales y de servicios que no sean de competencia federal.
- Requerir el cumplimiento de los límites máximos permisibles a los responsables de la operación de fuentes fijas, móviles y de área de jurisdicción local.
- Definir medidas preventivas para evitar contingencias ambientales.
- Integrar y mantener actualizados los inventarios de fuentes de contaminación.
- Aplicar criterios generales para la protección a la atmósfera en los planes de desarrollo urbano de su competencia.
- Establecer sistemas de verificación de emisiones de automotores en circulación.
- Mantener sistemas de monitoreo de la calidad del aire y publicar su información, incluyendo el envío de reportes al Sistema Nacional de Información Ambiental[4].
- Regular emisiones del transporte público y de carga de su competencia.
- Imponer y sancionar infracciones a quienes afecten la calidad del aire.
- Formular y aplicar programas de gestión de calidad del aire.

Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera

Como su nombre lo indica, el Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (R-LGEEPA-PCCA) tiene como fin regir lo relacionado a la contaminación de la atmósfera, así como señalar las atribuciones en esta materia para las autoridades federales. Además de las competencias de la SEMARNAT que se mencionaron anteriormente, el gobierno federal tiene las siguientes facultades:

- Formular criterios ecológicos generales que deberán observarse en la prevención y control de la contaminación de la atmósfera.
- Vigilar el cumplimiento de la normatividad en las zonas y fuentes de jurisdicción federal.
- Emitir dictámenes técnicos sobre sistemas de monitoreo de calidad del aire a cargo de Estados y Municipios.
- Determinar, en coordinación con las Secretarías de Energía y Economía, la aplicación de métodos, procedimientos, partes, componentes y equipos que reduzcan emisiones de contaminantes a la atmósfera, generados por vehículos automotores.
- Establecer los procedimientos a los que deberá sujetarse el proceso de verificación obligatoria de vehículos destinados al transporte público federal autorizado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

4 A nivel federal se cuenta con el Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA).



En materia de fuentes fijas, aunque la obligación de no exceder los límites máximos permisibles establecidos en las NOM es una obligación general, el reglamento considera que los valores pueden ajustarse dependiendo de la antigüedad o ubicación de dichas fuentes de contaminantes. Este precepto abre la posibilidad a que las fuentes fijas puedan tener diferente desempeño en materia de emisiones, afectando la gestión de la calidad de aire a nivel local.

En cuanto a su rango de aplicación, el reglamento establece que la autoridad federal tendrá rectoría sobre las fuentes fijas en zonas de jurisdicción federal, o directamente en fuentes consideradas como de jurisdicción federal. Las zonas se refieren a sitios ocupados por instalaciones de terminales de transporte público federal, terrestre, aéreo y acuático y los parques industriales localizados en bienes del dominio público de la Federación. Las fuentes de jurisdicción federal corresponden a instalaciones, obras o actividades que realicen las dependencias de la administración pública federal, aquellas catalogadas en el reglamento, las que causen contaminación transfronteriza, los vehículos automotores en planta, el transporte público federal, y aquellas que por su naturaleza y complejidad requieran la intervención federal. En este sentido, el artículo 111 bis de la LGEEPA indica que las fuentes fijas de jurisdicción federal son establecimientos industriales de los siguientes giros: del petróleo y petroquímicos (hidrocarburos), químico, de pinturas y tintas, automotriz, de celulosa y papel, metalúrgico, de vidrio, de generación de energía eléctrica, de asbesto, cementera y calera, y de tratamiento de residuos peligrosos. Estas fuentes se detallan a profundidad en el artículo 17 bis del Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.

De lo anterior, se desprenden las siguientes facultades adicionales de la SEMARNAT:

A Promover ante las autoridades competentes la reubicación de fuente fijas cuando:

- Las condiciones topográficas y meteorológicas del sitio en el que se ubican dificulten la adecuada dispersión de contaminantes a la atmósfera.
- La calidad del aire así lo requiera.
- Las características de los contaminantes constituyan un riesgo inminente de desequilibrio ecológico.

B Promover ante autoridades federales o locales competentes, con base en los estudios que haga para ese efecto, la limitación o suspensión de la instalación o funcionamiento de industrias, comercios, servicios, desarrollos urbanos o cualquier actividad que afecte o pueda afectar el ambiente o causar desequilibrio ecológico.

Por otro lado, la legislación prevé que la gestión de la calidad del aire es una responsabilidad compartida, es decir, que no solo se prevén obligaciones para la autoridad competente, sino que también para quienes sean responsables de las fuentes fijas.

En lo que respecta al tema de fuentes móviles, el reglamento citado determina que el transporte público federal (tanto para carga como para personas) deberá ser sometido a una verificación periódica en los centros de verificación autorizados conforme al programa que formule la SCT. Otra esfera de regulación de las fuentes móviles es la obligación de las y los fabricantes de vehículos automotores de asegurar que las nuevas unidades que se comercializan en México no rebasen los niveles máximos permisibles de emisiones de contaminantes atmosféricos. Por ello, la ley instruye que la Secretaría de Economía únicamente autorizará la fabricación y ensamble de vehículos que no rebasen dichos niveles, mientras que la SEMARNAT podrá instaurar el procedimiento de verificación que valide lo anterior.

Por otro lado, el reglamento también prevé que la SEMARNAT mantendrá actualizado un *"Sistema de Información de la Calidad del Aire"*, el cual se integra con la información de las redes de monitoreo de las entidades federativas, incluyendo a las que se ubican en la ZMVM. Por ello, estos sistemas de monitoreo deben seguir las normas técnicas que expida la SEMARNAT, para evaluar el cumplimiento de las normas de salud ambiental que sean expedidas en coordinación con la Secretaría de Salud. Este sistema de información también incluye un Inventario de Fuentes de Jurisdicción Federal.

Reglamento de la LGEEPA en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes

En materia de información, la ley también destaca la importancia de la misma en el Reglamento de la LGEEPA en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (R-LGEEPA-RETC). Este reglamento indica la forma en la que se elaborará la base de datos del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), con los datos contenidos en las autorizaciones, cédulas, informes, reportes, licencias, permisos y concesiones que en materia ambiental se

tramiten ante la SEMARNAT o las autoridades estatales y municipales. Esta base de datos se nutre con la información de las Cédulas de Operación Anual (COA), que incluyen:

Características de la maquinaria, equipo o actividad que genere emisiones.	Descripción del punto de generación y el tipo de emisión.	Características de las chimeneas y ductos de descarga.	Resultados de los muestreos y análisis realizados.

2.3.2 Ley General de Cambio Climático

Si bien la Ley General de Cambio Climático (LGCC) tiene por objeto atender un problema global y no uno de calidad del aire local, algunos de sus preceptos jurídicos tienen sinergia con los referentes al control de las emisiones de contaminantes locales o criterio. Esta situación permite que la LGCC también pueda utilizarse para fundamentar o ejecutar políticas para controlar emisiones locales de precursores y contaminantes criterio, así como emisiones de CyGEI. Las facultades con que cuenta la Federación, que guardan relación con el tema de calidad del aire, son las siguientes:

- Regular e instrumentar las acciones para la mitigación al cambio climático en diversas materias.
- Establecer las bases e instrumentos para promover el fortalecimiento de capacidades institucionales y sectoriales en la mitigación.

En lo que respecta a las Entidades Federativas, se deben formular, regular, dirigir e instrumentar acciones de mitigación. Por su parte, los municipios tienen la obligación de formular e instrumentar políticas y acciones para enfrentar el cambio climático en congruencia con diversos instrumentos programáticos a través de las áreas de ordenamiento ecológico y desarrollo urbano, recursos naturales, protección al ambiente, manejo de residuos sólidos municipales, transporte público y privado, tanto de carga como de pasajeros, entre otras.

Con este fin, la LGCC establece la creación de instrumentos de política pública, como es el Registro Nacional de Emisiones (RENE) y su Reglamento. Este tiene como objetivo el integrar la información sobre la cantidad de emisiones de CyGEI de los diferentes sectores productivos del país. Por su parte, el Reglamento refiere a la creación de acuerdos para la definición de aspectos técnicos relativos a la operación del Registro.

2.3.3 Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos

La Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos (ASEA) le confiere a esta Agencia la facultad de proteger el medio ambiente del sector industrial que maneje hidrocarburos como una actividad principal, controlando, entre otras cosas, las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Asimismo, es competente para expedir, suspender, revocar o negar las licencias, autorizaciones, permisos y registros en materia ambiental, en particular las que se refieren a la emisión de olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera por las instalaciones del sector hidrocarburos.

Además, puede emitir regulaciones específicas relativas a las previsiones a las que deberá sujetarse la operación de fuentes fijas donde se desarrollen actividades del sector y que emitan contaminantes atmosféricos, en casos de contingencias o emergencias ambientales.

2.3.4 Convenio de Coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental de la Megalópolis

A nivel federal, en 1992, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el Acuerdo por el que se crea la Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México, antecedente de la hoy Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe). En sus inicios, en la Comisión participaron únicamente el Departamento del Distrito Federal y el Gobierno del Estado de México. Entre sus funciones se destacaba el establecer los criterios y lineamientos para la integración de programas, proyectos y acciones especiales para prevenir y controlar la contaminación ambiental en la ZMVM.

Derivado del alto crecimiento poblacional y, por ende, de las problemáticas ambientales persistentes en otras entidades colindantes con la Ciudad de México y el Estado de México, en 2013 se firmó el Convenio de Coordinación por el que se creó la CAMe, que celebraron la SEMARNAT, el Gobierno de la Ciudad de México y los gobiernos de las siguientes entidades federativas: Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala. Este Convenio tiene por objeto llevar a cabo acciones en materia de protección al ambiente, de preservación y restauración del equilibrio ecológico y mejoramiento de la calidad del aire en la demarcación geográfica que abarcan las entidades que suscriben el convenio. La justificación de la creación de la CAMe, que a su vez es una evolución de la extinta Comisión Ambiental Metropolitana (CAM), se fundamenta en el transporte de contaminantes entre cuencas, fenómeno que provoca que los contaminantes atmosféricos emitidos en una entidad o ciudad puedan migrar y afectar la calidad del aire en otras regiones.

Esto es particularmente cierto en la ZMVM y en la región que la rodea, llamada Megalópolis por su relación física y funcional con las principales áreas urbanas de las entidades que participan en el convenio. La principal razón de ser de la CAMe es la de facilitar la coordinación y toma de decisiones informadas en las entidades que integra, para conseguir una mejor calidad ambiental, principalmente en materia de calidad del aire.

El trabajo realizado por la Ciudad de México y el Estado de México, en coordinación con la CAMe y anteriormente por la CAM, ha permitido la mejora gradual de la calidad de aire en la ZMVM, mediante la implementación de acciones por parte de las Entidades Federativas involucradas y el Gobierno Federal; asimismo, destaca el presupuesto que se canaliza mediante el Fideicomiso 1490 para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis.

2.3.5 Reglamento Interior de la SEMARNAT

En el Reglamento Interior de la SEMARNAT se establece que esta dependencia, a través de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (DGGCARETC), es la autoridad federal designada en materia de Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire implementados en las Entidades Federales y a nivel local. Esta dirección valida los Programas de Calidad del Aire de los gobiernos locales y promueve que mantengan congruencia con los objetivos nacionales. Por ello, la DGGCARETC debe:

- Apoyar a los gobiernos locales en la elaboración de los programas de calidad del aire y en la gestión del monitoreo ambiental.

- Realizar el seguimiento y evaluación de los avances en el abatimiento de emisiones de contaminantes a la atmósfera, con la colaboración de las autoridades federales, estatales y municipales competentes.
- Coordinar el diseño e instrumentación de estrategias de gestión de la calidad del aire y su relación con otros sectores.



2.3.6 Normas Oficiales Mexicanas

Los programas de gestión de la calidad del aire elaborados por los gobiernos locales deben apegarse también a las disposiciones establecidas en las NOM aplicables. Estos instrumentos jurídicos marcan el detalle técnico que debe seguirse para la implementación de políticas, programas y regulaciones en (este caso) materia de calidad del aire. Ejemplo de ello son las NOM que contemplan los límites permisibles de contaminantes criterio en el aire ambiente y las características de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire. En el Anexo 2.1 se enlistan las principales Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con la gestión de la calidad del aire.

2.3.7 Estrategia Nacional de Calidad del Aire y programas de gestión federales

Además de la legislación y normatividad nacional mencionada anteriormente, la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (ENCA) se creó para fungir como la base de planeación que deberán seguir las diferentes instancias gubernamentales de los tres niveles de gobierno para controlar y mitigar la emisión de contaminantes a la atmósfera. Esta estrategia tiene una visión al año 2030, por lo que coincide con el periodo de vigencia del ProAire ZMVM 2021-2030.

La estrategia establece objetivos y lineamientos para mejorar la calidad del aire en el territorio nacional con el objetivo principal de proteger la salud de la población. El documento contiene cinco ejes estratégicos, 21 estrategias y 69 líneas de acción que promueven la convergencia de responsabilidades con la finalidad de fomentar una gestión coordinada para atender la calidad del aire. La ENCA está vinculada con la Agenda 2030 de la ONU mencionada previamente. Particularmente, el primer eje versa sobre la gestión integral de la calidad del aire, en tanto que los siguientes cuarto sobre políticas para mejorar la calidad del aire con base científica, con el objeto de *"fomentar la coordinación entre los tres órdenes de gobierno para reducir la concentración de contaminantes atmosféricos"* así como *"consolidar los instrumentos y la investigación científica y técnica que generan información sobre la calidad del aire para articularlos con las políticas y programas que la gestionan"*.

A nivel federal, el Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis (ProAire de la Megalópolis 2017-2030) es un instrumento que se diseñó para promover las sinergias entre los tres órdenes de gobierno, la industria, la academia, y la sociedad civil en la implementación de acciones estratégicas con el objeto de disminuir el deterioro de la calidad del aire de la Megalópolis.

El Programa presenta las siguientes seis líneas de acción: 1) Sustentabilidad de los ecosistemas megalopolitanos; 2) Disminuir las emisiones de las instalaciones industriales; 3) Vehículos y movilidad; 4) Promover el desarrollo urbano y eficiencia energética; 5) Fuentes dispersas; y 6) Mejora de las capacidades de gestión de la calidad del aire. Además, incluye 38 medidas para mejorar la calidad del aire en la región.

2.4 Legislación estatal

2.4.1 Ciudad de México

La Constitución Política de la Ciudad de México (CPCDMX) tiene varias referencias a la protección ambiental y en específico al control de los contaminantes atmosféricos que deterioran la calidad del aire e impactan en la salud pública. Desde su primer artículo, en el párrafo séptimo se expresa que *"La sustentabilidad de la ciudad exige eficiencia en el uso del territorio, así como en la gestión de bienes públicos, infraestructura, servicios y equipamiento. De ello depende su competitividad, productividad y prosperidad"*. Asimismo, el artículo 13, sobre el Derecho a un Medio Ambiente Sano, señala que "*Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. Las autoridades adoptarán las medidas necesarias, en el ámbito de sus competencias, para la protección del medio ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico, con el objetivo de satisfacer las necesidades ambientales para el desarrollo de las generaciones presentes y futuras"* (DOF, 2017).

Además, el artículo 15, inciso A, párrafo primero expresa que "*Esta Constitución garantiza el derecho a la ciudad a través de instrumentos de planeación, jurídicos, administrativos, financieros, fiscales y de participación ciudadana para hacer efectivas las funciones social, económica, cultural, territorial y ambiental de la ciudad*". Asimismo, el párrafo sexto puntualiza que *"La Ciudad de México será una ciudad con baja huella ecológica, territorialmente eficiente, incluyente, compacta y diversa, ambientalmente sustentable, con espacios y servicios públicos de calidad para todos"* (DOF, 2017).

En lo que respecta al impacto ambiental, el artículo 16, inciso A, párrafo segundo determina que "*La Ciudad de México minimizará su huella ecológica, en los términos de emisión de gases de efecto invernadero, a través de una estructura urbana compacta y vertical, nuevas tecnologías, uso de energía renovable, una estructura modal del transporte orientada hacia la movilidad colectiva y no motorizada, vehículos de cero emisiones de servicio público y privado, medidas y políticas de eficiencia energética, políticas de recuperación y conservación de ecosistemas y políticas de aprovechamiento energético del metano generado por residuos orgánicos"*. Si bien este artículo tiene como principal objetivo el impulsar políticas de acción climática, las medidas relativas a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) también tienen un efecto en la reducción de contaminantes locales. Además, indica que *"las autoridades competentes adoptarán medidas para garantizar la protección de la atmósfera y se impedirá la contaminación del aire"*.

Igualmente, el párrafo cuarto señala que *"Las autoridades garantizarán el derecho a un medio ambiente sano. Aplicarán las medidas necesarias para reducir las causas, prevenir, mitigar y revertir las consecuencias del cambio climático. Se crearán políticas públicas y un sistema eficiente con la mejor tecnología disponible de prevención, medición y monitoreo ambiental de emisiones de gases de efecto invernadero, agua, suelo, biodiversidad y contaminantes, así como de la huella ecológica de la ciudad"*. Asimismo, *"establecerán las medidas necesarias y los calendarios para la transición*

energética acelerada del uso de combustibles fósiles al de energías limpias" (DOF, 2017).

La Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal establece en el artículo 2.º, párrafo primero que se aplicará *"la prevención y control de la contaminación atmosférica proveniente de las fuentes fijas o móviles que de conformidad con la misma estén sujetas a la jurisdicción local"*. Además, el artículo 3.º, párrafo octavo, señala que *"es de utilidad pública la elaboración y aplicación de planes y programas que contengan políticas de desarrollo integral de la entidad bajo criterios ambientales"* (Gobierno del Distrito Federal, 2000). La combinación de estos dos artículos justifica legalmente la responsabilidad del Gobierno de la Ciudad de México de contar con un instrumento local o regional para dirigir la gestión de la calidad del aire dentro de su jurisdicción.

Asimismo, la Ley reconoce en el artículo 6.º como autoridades en materia ambiental de la Ciudad de México a la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) y a la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT) de la Ciudad de México. En este sentido, la Ley señala que entre las competencias de la SEDEMA se encuentra el poner en marcha los instrumentos de política ambiental que prevé la ley para preservar el balance ecológico y proteger al ambiente, además de expedir la normatividad en materia ambiental de competencia local para la Ciudad de México y, junto con la PAOT, facilitar la creación de estándares e indicadores de calidad ambiental. De igual forma, la Ley puntualiza que *"la Secretaría promoverá el uso de fuentes de energías alternas, así como sistemas y equipos para prevenir o minimizar las emisiones contaminantes provenientes de los vehículos en los que se preste el servicio público local de transporte de pasajeros o carga en la Ciudad de México, así como fomentar su uso en los demás automotores"*.

Por su lado, la Ley Ambiental dedica un capítulo completo al cuidado de la calidad del aire. En el capítulo sobre la prevención y control de la contaminación atmosférica, artículo 131, se definen los siguientes criterios a considerar:

- El diseño y ejecución de las políticas y programas de las autoridades ambientales *"deberán estar dirigidas a garantizar que la calidad del aire sea satisfactoria en el Distrito Federal, con base en los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, establecidos en las normas oficiales mexicanas y demás normativa aplicable"*.
- Respecto a las emisiones de todo tipo de contaminantes a la atmósfera, sean de fuentes fijas o móviles, estas deben ser *"prevenidas, reguladas, reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para la salud y bienestar de la población y el mantenimiento del equilibrio ecológico"*.

Por otro lado, para *"regular, prevenir, controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera"* (Gobierno del Distrito Federal, 2000), el artículo 133 señala que la Secretaría tendrá las siguientes facultades:

- Favorecer la coordinación con *"la Federación, entidades federativas y municipios de la zona conurbada para la planeación y ejecución de acciones coordinadas en materia de gestión de la calidad del aire"*.
- *"Elaborar un programa local de gestión de calidad del aire, sujeto a revisión y ajuste periódico, con base en los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, establecidos en las normas oficiales mexicanas y demás normativa aplicable"*.
- *"Requerir a los responsables de fuentes emisoras de su competencia, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, las normas oficiales mexicanas y las normas ambientales para el Distrito Federal"*.
- *"Promover ante los responsables de la operación de fuentes contaminantes, la aplicación de la mejor tecnología disponible, con el propósito de reducir sus emisiones a la atmósfera"*.
- *"Integrar y mantener actualizado el inventario de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera de su competencia"*.
- *"Establecer y operar sistemas de monitoreo de la calidad del aire en el Distrito Federal"*.
- *"Expedir normas ambientales del Distrito Federal para regular las emisiones provenientes de fuentes fijas y móviles que no sean de jurisdicción federal"*.
- *"Implementar medidas de tránsito y la suspensión de circulación, en casos graves de contaminación"*.
- *"Elaborar y emitir un Pronóstico de la Calidad del Aire, en forma diaria, en función de los sistemas meteorológicos"*.
- *"Tomar las medidas necesarias para prevenir, regular y controlar las contingencias ambientales por contaminación atmosférica"*.
- *"Establecer y operar sistemas de verificación de emisiones de automotores en circulación"*.
- *"Aplicar las normas oficiales mexicanas y normas ambientales del Distrito Federal para la protección de la atmósfera en las materias y supuestos de su competencia"*.

El Reglamento Interior del Poder Ejecutivo y de la Administración Pública de la Ciudad de México tiene por objeto reglamentar, así como adscribir y señalar atribuciones que den seguimiento a los principios estratégicos que rigen la organización administrativa de la Ciudad de México. En este sentido, en el capítulo segundo sobre la adscripción de unidades administrativas, y órganos



desconcentrados a la Jefatura de Gobierno y sus dependencias, se incluye a la SEDEMA, que a su vez cuenta con una Dirección General de Calidad del Aire, a la cual le corresponden las siguientes facultades de conformidad con el artículo 183 del mencionado Reglamento:

- Formular las estrategias de prevención y control de la contaminación atmosférica generada por las fuentes móviles y fijas de la competencia de la Ciudad de México.
- Dar seguimiento permanente y evaluar los resultados de las acciones derivadas de los programas de control de la contaminación atmosférica de la Ciudad de México.
- Proporcionar los fundamentos técnicos para el diseño y aplicación de leyes, reglamentos y normas en materia de contaminación atmosférica.
- Establecer y operar los sistemas de monitoreo de contaminantes atmosféricos.
- Elaborar, aprobar, publicar y aplicar, en el ámbito de su competencia, en coordinación y con la participación que corresponda a las demás autoridades competentes, programas y medidas para prevenir, atender y controlar contingencias atmosféricas.
- Establecer y mantener actualizado el registro obligatorio de las fuentes fijas de la competencia de la Ciudad de México.
- Establecer y mantener actualizado el inventario de emisiones generadas por las fuentes emisoras de competencia de la Ciudad de México.
- Establecer criterios técnicos y coadyuvar con la Dirección General de Inspección y Vigilancia Ambiental en la operación de los sistemas de verificación de fuentes fijas de la jurisdicción de la Ciudad de México, así como en los programas de reducción de emisiones contaminantes y de combustibles alternos.
- Establecer y operar por sí misma o a través de personas que autorice para ello, los sistemas de verificación del parque vehicular en circulación, matriculados en la Ciudad de México.
- Establecer en coordinación con las autoridades competentes de la administración pública, la aplicación de medidas de tránsito y vialidad, para reducir las emisiones contaminantes de los automotores.
- Definir y establecer las restricciones a la circulación de los vehículos que circulan en la Ciudad de México.
- Evaluar y promover la aplicación de tecnologías tendientes a reducir las emisiones de las fuentes generadoras de contaminación atmosférica.
- Elaborar diagnósticos y tendencias de calidad del aire en la Ciudad de México.
- Elaborar y coordinar la instrumentación, seguimiento y evaluación de los programas metropolitanos de calidad del aire, juntamente con las autoridades y grupos sociales involucrados.
- Llevar a cabo estudios para incrementar el conocimiento de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México.
- Promover el intercambio científico con la comunidad nacional e internacional en materia de contaminación atmosférica.
- Realizar las visitas relacionadas con las solicitudes de autorización o revalidación en el ámbito de su competencia.
- Colaborar con las autoridades de transporte federal y local, centros de investigación, organizaciones no gubernamentales, el sector privado y organismos de financiamiento y cooperación internacional en la promoción de medios de transporte sustentable y en la formulación y ejecución de programas y medidas relacionadas al transporte en la Ciudad de México.
- Establecer y aplicar mecanismos de difusión de la información de calidad del aire en la Ciudad de México.

En cuanto a la normatividad local, se destaca la Norma Ambiental del Distrito Federal NA-DF-009-AIRE-2017, la cual se aplicaba en el territorio de la Ciudad de México y señalaba *"los requisitos para elaborar el Índice de Calidad del Aire en la Ciudad de México"*. Esta norma tenía por *objeto "establecer los lineamientos para la obtención, el uso y la comunicación de riesgos a la salud a través del Índice de Calidad del Aire"*. Dado que el objeto de la norma era el de comunicar los riesgos a la población, el Índice de Calidad del Aire identificaba el estado del aire ambiente respecto de los niveles de contaminantes criterio por medio de un color y un calificativo, de acuerdo con el grado de riesgo que representa para la salud humana, y se representaba por medio de una escala de números y colores (Gobierno de la Ciudad de México, 2018). Con la entrada en vigor de la NOM-172-SEMARNAT-2019 para la difusión del Índice Aire y Salud a nivel nacional, el Índice de Calidad del Aire dejó de estar vigente; la implementación de ambos índices se aborda a mayor detalle en el Capítulo 3. En el Anexo 2.2 se enlistan el resto de las Normas Ambientales emitidas por el Gobierno de la Ciudad de México en materia de calidad del aire.

El Programa de Gobierno 2019-2024 de la Ciudad de México destaca en su capítulo segundo sobre el Desarrollo Urbano Sustentable e Incluyente que *"se debe diseñar, en colaboración con científicos nacionales e internacionales, el Programa de Mejora de Calidad del Aire que considere potenciar el uso del transporte público, la integración acelerada de nuevas tecnologías, el control de las fugas de gas LP y la disminución de las quemas agrícolas y ganaderas"*. Además, menciona que *"la contaminación del aire sigue ocasionando impactos negativos en la salud pública, causando un costo social y económico alto"* (Gobierno de la Ciudad de México, 2019).

Igualmente, tanto el Programa de Gobierno, como la Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal, señalan que las políticas de calidad del aire local deberán contribuir a la mitigación de GEI. Esta ley tiene como objeto "*El establecimiento de políticas públicas que permitan propiciar la mitigación de Gases de Efecto Invernadero, la adaptación al cambio climático, así como el coadyuvar al desarrollo sustentable*" (Gobierno del Distrito Federal, 2011). De conformidad con esta ley, es responsabilidad de la Secretaría el integrar, operar y publicar el Inventario de GEI del Distrito Federal, ahora denominado como Ciudad de México, así como generar y plantear planes de reducción de estos gases.

Esta línea estratégica de la actual administración pública de la Ciudad de México se complementa con la entrada en vigor del presente ProAire, pues el mismo incluye las medidas comprometidas en el Programa de Gobierno.

2.4.2 Estado de México

La Constitución Política del Estado Libre y Soberano de México, en su artículo 18, señala que *"Las autoridades ejecutarán programas para conservar, proteger y mejorar los recursos naturales del Estado y evitar su deterioro y extinción, así como para prevenir y combatir la contaminación ambiental"*. Además, recupera preceptos de la Constitución Nacional, al señalar en su artículo 18 párrafo 4° que "*Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar"*. Este ordenamiento jurídico establece la base de la cual se desprende el presente ProAire, el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México 2018-2030 y el resto de la legislación estatal en la materia.

La Ley de Planeación del Estado de México y Municipios, en su artículo 5.° establece que la planeación democrática tiene por objeto el desarrollo del

Estado de México y los municipios que lo integran, respetando la soberanía estatal y la autonomía municipal, en concordancia con fines sociales, económicos, ambientales y políticos que se establecen en la CPEUM y la Constitución Política del Estado Libre y Soberano de México. En el Proceso de Planeación para el Desarrollo, se establecen directrices, estrategias y se seleccionan alternativas y cursos de acción en función de objetivos y metas generales, económicas, ambientales, sociales y políticas, tomando en consideración la disponibilidad de recursos reales y potenciales.

El Sistema de Planeación para el Desarrollo del Estado de México y sus Municipios, lo conforman el conjunto de articulados, procesos, planes, programas, proyectos, acciones e instrumentos de carácter social, político, económico, ambiental, legal y técnico, así como mecanismos de concertación, coordinación y cooperación entre los tres órdenes de gobierno, grupos y organizaciones sociales y privados, que se interrelacionan entre sí, para ejecutar acciones de planeación para el desarrollo integral de la Entidad.

La Ley Orgánica de la Administración Pública del Estado de México, en su artículo 32 bis, establece que la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM) es el órgano encargado de la formulación, ejecución y evaluación de la política estatal en materia de conservación ecológica, biodiversidad y protección al medio ambiente para el desarrollo sostenible.

El Código para la Biodiversidad del Estado de México (CBEM) es el compendio estatal de la legislación ambiental; en él se establecen las responsabilidades, derechos y obligaciones que tanto la autoridad estatal como las municipales y el sector privado tienen en materia ambiental. El Libro Segundo del Código se aboca al equilibrio ecológico, la protección al ambiente y el fomento al desarrollo sostenible. En lo referente al tema de calidad del aire, se establece que uno de los objetivos específicos del CBEM es *"Establecer criterios ambientales. […] para la prevención y control de la contaminación del agua, aire y suelo logrando ordenar ecológicamente el territorio de la Entidad […]"* En el mismo tenor, considera que la prevención y control de la contaminación del aire es un tema de orden público e interés social, por lo cual es necesario que los instrumentos de política ambiental integren principios para el mejoramiento de la calidad del aire del Estado de México.

Por su lado, el segundo capítulo del Título Quinto del CBEM define los principios para la prevención y control de la contaminación atmosférica en un marco de protección ambiental; en él se destaca que es fundamental regular la emis ón de contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar daños al ambiente. Por ello, el Código establece que las emisiones a la atmósfera deberán cumplir lo dispuesto por las NOM, las normas técnicas estatales y demás disposiciones. Específicamente, este apartado prohíbe la emisión de humos, polvos, gases, vapores y olores en niveles que rebasen los límites establecidos en la normatividad estatal y federal.

El marco jurídico mexiquense considera que la calidad del aire debe ser satisfactoria en los asentamientos humanos y que las emisiones de contaminantes, independientemente de su fuente (natural o antropogénica, puntual, móvil o de área), deberán ser controladas y reducidas para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico. Es así que es facultad de la SMAGEM establecer y aplicar medidas de prevención y control de la contaminación atmosférica que pueda causar daños al medio ambiente o a la salud de la población. Respecto de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas, la Secretaría, además de las responsabilidades arriba mencionadas, deberá:

- Aplicar las NOM, así como los criterios y normas técnicas estatales para la protección de la atmósfera.
- En casos necesarios, requerir la instalación de equipos o sistemas de control de emisiones.
- Vigilar el cumplimiento de los criterios ecológicos en los Planes de Desarrollo Urbano Estatal y Municipales para mejorar la calidad del aire.

En materia de fuentes móviles, la SMAGEM tiene las siguientes responsabilidades, las cuales podrá cumplir directamente o mediante acuerdos celebrados con las autoridades municipales:

- Establecer medidas preventivas y correctivas para reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera.
- Regular el establecimiento y operación de sistemas de verificación de emisiones de vehículos automotores en circulación.
- Exigir a las personas propietarias o poseedoras de vehículos automotores el cumplimiento de las medidas que así disponga la SMAGEM, y retirar de circulación a aquellas unidades que no acaten la normatividad o que sean ostensiblemente contaminantes.
- Implementar medidas para mejorar la vialidad y el transporte colectivo; en caso necesario para lograr esto, coordinarse con otras dependencias y entidades federales, estatales y municipales.
- Promover el mejoramiento de los sistemas de transporte y solicitar toda clase de medidas en sus vialidades que permitan disminuir las emisiones contaminantes.

Además de las facultades descritas con anterioridad, tanto la SMAGEM como los Ayuntamientos del Estado, en el ámbito de sus respectivas competencias, deberán:

- Prevenir y controlar la contaminación del aire en los bienes y zonas o fuentes emisoras, tanto fijas como móviles, de su jurisdicción.
- Establecer y operar sistemas de monitoreo de la calidad del aire, así como remitir la información de los sistemas a la dependencia pertinente para integrarlos al Sistema Nacional de Información Ambiental. Todo esto con el apoyo técnico de la Secretaría del ramo a nivel federal.
- Aplicar criterios para la protección de la atmósfera en declaratorias y planes de desarrollo urbano de su competencia, definiendo las zonas en las cuales se permite la instalación de industrias contaminantes.
- Requerir que la operación de las fuentes fijas se haga en cumplimiento con los límites máximos permisibles de contaminantes según las disposiciones aplicables.
- Convenir con quienes realicen actividades contaminantes la instalación y operación de equipos de control que permitan controlar, reducir o evitar emisiones a la atmósfera.
- Integrar y mantener actualizados los inventarios de las diferentes fuentes de contaminación del aire.
- Establecer y operar sistemas de verificación de emisiones de vehículos automotores en circulación y sancionar a quienes no cumplan con las medidas de control dispuestas; retirar de la vía pública a los vehículos que rebasen los límites máximos permisibles definidos en las NOM y otras disposiciones aplicables.
- Definir requisitos y procedimientos para regular las emisiones de transporte público, así como las medidas de tránsito respectivas y la suspensión de la circulación de vehículos automotores en casos de contingencia ambiental durante episodios de contaminación severa.
- Realizar campañas para racionalizar el uso del automóvil, así como para su afinación y mantenimiento.
- Elaborar informes sobre el estado de la calidad del aire en su ámbito jurisdiccional según se convenga con dependencias del ramo a nivel federal.



- Promover el mejoramiento de los sistemas de transporte urbano y suburbano y la modernización de las unidades.
- Emitir disposiciones y establecer medidas tendientes a evitar la quema de cualquier tipo de residuo sólido o líquido.
- Aplicar las medidas preventivas necesarias para evitar contingencias ambientales por contaminación atmosférica.
- Imponer sanciones y medidas correctivas de su competencia por infracciones a la normatividad aplicable.
- Formular y aplicar los programas de gestión de calidad del aire.

Respecto de la aplicación de Programas para la Reducción de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera, la legislación local indica que se deberá utilizar un enfoque de Cuencas Atmosféricas que se determine por cada área, zona o región del territorio estatal. Dichos Programas deberán prever los objetivos que se pretende alcanzar, los plazos correspondientes y los mecanismos para su implementación.

Para efectos del ejercicio de las facultades que corresponden a los Ayuntamientos del Estado de México, en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, el CBEM define las fuentes fijas y móviles que se consideran de jurisdicción municipal en su Artículo 2.148.

Considerando que la gestión de la contaminación atmosférica sigue un esquema de responsabilidad compartida, el CBEM no solo define las facultades de las autoridades estatales y municipales, sino que también describe las responsabilidades que ciertos actores privados tienen respecto de la calidad del aire, incluyendo las siguientes:

- Quienes realicen actividades contaminantes deberán proporcionar toda la información que les sea requerida por las autoridades competentes para la elaboración de inventarios de emisiones de contaminantes.
- Requieren de permiso de la Secretaría quienes realicen quema de materiales a cielo abierto.



Las personas físicas o jurídicas colectivas que operen sistemas de producción industrial, comercial, agropecuario o de servicios que tengan fuentes emisoras de contaminantes deberán:

- Instalar equipos o sistemas de control de emisiones para cumplir con los niveles permisibles de contaminantes.
- Realizar la medición periódica de sus emisiones a la atmósfera e informar a la Secretaría los resultados de la medición a través del registro de estos.
- Sujetarse a la verificación de la Secretaría o realizar su autorregulación o auditoría ambiental periódicamente en forma voluntaria.



Asimismo, se establece que las personas propietarias de los vehículos automotores de uso privado o de servicio público tendrán que:

- Realizar el mantenimiento de sus unidades y observar los límites permitidos de emisiones señalados en la normatividad aplicable.
- Verificar periódicamente las emisiones de contaminantes a la atmósfera de acuerdo con los programas, mecanismos y disposiciones establecidas.
- Observar las medidas y restricciones que las autoridades competentes dicten para prevenir y controlar emergencias y contingencias ambientales.

Considerando que las emisiones de contaminantes atmosféricos no provienen únicamente de fuentes fijas y móviles, sino que existen otros tipos de fuentes que contribuyen al deterioro de la calidad del aire, el CBEM, en el tercer capítulo de su Título Quinto, establece lo siguiente:

- Las emisiones a la atmósfera provocadas por erupciones volcánicas, incendios forestales, tolvaneras y otros siniestros serán objeto de programas de emergencia y contingencias ambientales que establezcan las autoridades federales y estatales en materia de protección civil.
- Las personas propietarias o poseedoras de terrenos erosionados, en proceso de erosión o desprovistos de vegetación, en concertación con las autoridades competentes, ejecutarán las medidas de protección, remediación, rehabilitación, recuperación o restauración de estos, según corresponda para su preservación y conservación.

El Reglamento Interior de la SMAGEM establece que esta contará con una o un Secretario, quien deberá dirigir, coordinar, controlar y evaluar las funciones, programas y proyectos en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica. La o el Secretario tiene la facultad de establecer sistemas de verificación de contaminación atmosférica y se auxiliará de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica (DGPCCA), la cual, de acuerdo con el Capítulo IV Artículo 10 del Reglamento, tiene las siguientes atribuciones específicas, entre otras:

- Autorizar el establecimiento y operación de centros de verificación de emisiones de vehículos automotores, talleres para la aplicación del Programa Integral de Reducción de Emisiones Contaminantes y de quienes proveen el equipo de cómputo especializado en control ambiental, así como vigilar su organización y funcionamiento.
- Expedir licencias de funcionamiento a fuentes fijas generadoras de emisiones de con-

taminantes a la atmósfera, así como realizar visitas técnicas y de seguimiento a las mismas.

- Establecer y operar, con la participación que corresponda a los municipios, sistemas de monitoreo de la calidad del aire.
- Formular programas y estrategias para la conservación, protección y restauración de la calidad del aire y la mitigación del cambio climático.
- Establecer y operar sistemas de muestreo, medición y análisis de emisiones contaminantes a la atmósfera.
- Implementar y mantener los mecanismos de supervisión y control del Programa de Verificación Vehicular Obligatoria en el Estado.
- Efectuar la revisión de documentación, papelería, bases de datos, videos y demás información que entregan los verificentros.
- Autorizar el diseño, instalación, operación, mantenimiento, verificación técnica y suministro de equipos y mejoras tecnológicas a los sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo ubicadas en la Entidad.

Al igual que a nivel nacional, y en otras entidades, en el Estado de México existen Normas Técnicas Ambientales en material de calidad del aire, las cuales se enlistan en el Anexo 2.3.

Finalmente, el Plan de Desarrollo Estatal 2017-2023 es el instrumento rector de las políticas públicas que aplica el Gobierno del Estado de México, incluyendo las políticas públicas en materia ambiental. En este documento se establece que la política ambiental respalda el manejo sustentable del territorio y sus recursos naturales, reconociendo que esto debe lograrse con la participación decidida de la ciudadanía, así como de los diferentes órdenes de gobierno, a través de cuatro vertientes. Es la segunda vertiente aquella que vela por acciones encaminadas a la mitigación y adaptación al cambio climático y a mejorar la calidad del aire. La cuarta vertiente responde a los retos que representan los asentamientos humanos y la concentración espacial de las actividades productivas; esto es de especial atención, ya que el tamaño de la población y la extensión urbana del Estado de México representa un enorme reto para lograr un sistema de producción y consumo de bienes y servicios que sea sustentable.

2.4.3 Estado de Hidalgo

El Estado de Hidalgo tiene entre sus objetivos prevenir y garantizar la disminución de la contaminación atmosférica proveniente de diversas fuentes de emisión, así como mejorar la calidad del aire y en consecuencia la salud de la población. En este sentido, la Constitución Política del Estado de Hidalgo señala desde el artículo quinto *"que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar"*. Además, indica que *"las autoridades estatales y municipales instrumentarán y aplicarán en el ámbito de su competencia planes, programas y acciones destinados a la preservación, aprovechamiento racional, protección y resarcimiento de los recursos naturales en su territorio"* (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2016). Es así que de este artículo se desprende la Ley para la Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo (LPAEH), con la finalidad de propiciar el desarrollo sustentable.

Dicha Ley establece las bases para garantizar el derecho de toda persona a vivir en un ambiente adecuado para su desarrollo, entre los que se encuentra el prevenir y controlar la contaminación del aire producida por fuentes de jurisdicción local (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2015). Asimismo, reconoce a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Hidalgo (SEMARNATH) como la autoridad competente para establecer requisitos y procedimientos para la prevención y control de la contaminación ambiental en aire, agua y suelo derivada de las fuentes fijas de jurisdicción local y toda clase de fuentes móviles que circulen en su territorio.

En materia de calidad del aire, el Reglamento Interno de la SEMARNATH establece que *"la Secretaría cuenta con la competencia de emitir opiniones técnicas y establecer procedimientos para la prevención y control de la contaminación del aire generada en la entidad"*. Además, *"tiene la facultad para la expedición de la licencia ambiental estatal y la cédula de operación anual para fuentes fijas de emisiones y descargas de contaminantes de jurisdicción estatal, y regula el registro de emisiones y transferencia de contaminantes al aire"*. Asimismo, *"la Secretaría cuenta con facultades en materia de Cambio Climático y regulación de las emisiones contaminantes del aire provenientes de fuentes móviles"*. Adicionalmente la SEMARNATH *"establece mecanismos de coordinación de acciones con los distintos órganos y órdenes de gobierno, para aplicar el marco normativo para la prevención y control de la contaminación en materia de aire"*.

El artículo 23 del Reglamento Interno indica que *"corresponde a la Dirección General de Gestión de Calidad del Aire (DGGCA) llevar a cabo acciones con los distintos órganos en la aplicación y actualización del marco normativo para la prevención, control de la contaminación y la calidad del aire, además del monitoreo atmosférico con apego y supervisión del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas y las normas técnicas ecológicas estatales, así como el desarrollo de programas para prevenir y mejorar la calidad del aire en el Estado"*. El Reglamento Interno también señala que *"la Procuraduría Estatal de Protección al Ambiente, es la facultada para realizar las labores de inspección, vigilancia y sanción en materia de normatividad ambiental, incluyendo las relacionadas al control de contaminantes atmosféricos de competencia estatal"*.

El Plan de Desarrollo Estatal 2016-2022 define que *"el Estado de Hidalgo requiere adoptar nuevas formas y patrones de aprovechamiento sostenible de recursos a fin de promover las condiciones necesarias para el desarrollo de la población y la preservación de un medio ambiente sano y equilibrado"*. El quinto eje de acción, Hidalgo con Desarrollo Sostenible, específica que, como consecuencia del crecimiento poblacional e industrial, la calidad del aire en el estado de Hidalgo se ha visto seriamente deteriorada en las últimas décadas. En materia de contaminación del aire, se ha determinado que las principales fuentes de emisión son las industriales y los vehículos. El plan estatal indica que *"el sector industrial es la fuente principal de generación de dióxidos de azufre (SO_2), contribuyendo con el 99% de las emisiones, y el sector transporte el primordial en cuanto a las emisiones del monóxido de carbono (CO), aportando un 90% del total"* (Hidalgo, 2016). Por otro lado, en el plan se propone que se amplíe el sistema de monitoreo atmosférico de la ZMVM al municipio de Tizayuca, de forma que se genere información oportuna y certera que ayude a implementar el ProAire de la ZMVM. En este sentido, la SEMARNATH opera una estación de monitoreo en Tizayuca.

Esta Entidad Federativa cuenta con el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) del Estado de Hidalgo 2016-2024. Este ProAire es la guía para la gestión de la calidad del aire a nivel local. El Programa tiene por objeto integrar estrategias para reducir las emisiones atmosféricas, por medio de acuerdos, compromisos y programas con las y los responsables de las principales fuentes de emisión en la Entidad. El Programa cuenta con cuatro estrategias para el cumplimiento de los objetivos en materia de calidad del aire, que son: 1) Reducir las emisiones de las fuentes móviles, 2) Disminuir las emisiones de fuentes fijas, 3) Mitigar las emisiones de fuentes de área, y 4) Promover el fortalecimiento de sus instituciones.

03

Diagnóstico de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México

Cuando las concentraciones de ciertos compuestos o sustancias superan los niveles presentes de forma natural en el aire, **estos pueden perjudicar la salud humana y producir efectos nocivos sobre el medio ambiente.**

03



El presente capítulo se elaboró con las aportaciones y revisiones de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, en específico de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire, la cual validó los indicadores de calidad del aire que se presentan.

La calidad del aire define la condición del aire que se respira en un lugar y tiempo específico. Una buena calidad del aire corresponde a un estado del aire claro y libre de contaminantes. En cambio, una mala calidad del aire indica la presencia de compuestos o sustancias que, en función de su concentración y tiempo de permanencia en la atmósfera, superan la concentración de los compuestos presentes de forma natural y pueden perjudicar a la salud humana y/o producir efectos nocivos sobre el medio ambiente. La contaminación atmosférica incluye humo, polvo, el *smog fotoquímico*, entre otras impurezas gaseosas que se originan por varios procesos naturales como erupciones volcánicas, relámpagos, incendios forestales y procesos biológicos de la vegetación y los microorganismos en el suelo. A estas fuentes se suman procesos an-

tropogénicos relacionados con el uso y generación de energía, el transporte, actividades industriales, el uso de productos químicos, actividades agropecuarias y la disposición de residuos.

La industrialización, el crecimiento poblacional, los procesos de urbanización y la densificación de las ciudades son factores que reúnen a una gran cantidad de personas en áreas relativamente pequeñas; de esta forma, la contaminación de origen antropogénico es emitida con mayor frecuencia cerca de los lugares donde vive y trabaja una cantidad significativa de población. La contaminación atmosférica aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardiovasculares (OMS, 2018), además de que puede generar impactos económicos negativos asociados con la disminución en la productividad de personas con problemas de salud y el incremento de los recursos económicos que necesitan destinarse para atender los problemas que la contaminación atmosférica genera (Harvard T.H. Chan School of Public Health & SEDEMA, 2018; Trejo-González *et al.*, 2019).

La gestión de la calidad del aire requiere determinar el estado de la contaminación atmosférica usando una serie de indicadores estadísticos que permiten evaluar las características del aire en un lugar y tiempo determinados. Estos indicadores se comparan con límites de concentración preestablecidos en la normatividad mexicana, por encima de los cuales existe un nivel de riesgo específico para la salud de la población. En el Valle de México, el comportamiento temporal y espacial de los contaminantes depende directamente de las fuentes de emisión, las características orográficas de la zona y los fenómenos meteorológicos a escala local, regional y sinóptica, por lo que para preservar la salud de la población y evitar el deterioro ambiental, también es necesario entender cómo estos fenómenos inciden en la formación y los niveles de concentración de los contaminantes, a favor o en detrimento de la calidad del aire, y así lograr controlar las emisiones de diversos compuestos hacia la atmósfera.

En este capítulo se analizan las herramientas disponibles para la evaluación y seguimiento de los niveles de contaminación, así como la problemática de la calidad del aire en la ZMVM, a través de sus tendencias históricas y los niveles de contaminación presentes durante el 2018.

3.1 Características de los contaminantes atmosféricos

Los contaminantes y sustancias químicas en la atmósfera no se comportan de manera independiente; existen interacciones entre las diferentes especies, las cuales pueden reaccionar entre sí para formar nuevos contaminantes. El ciclo de vida y la transformación de los contaminantes atmosféricos depende a su vez de las condiciones meteorológicas, tales como la radiación solar, la temperatura y la humedad. Es así que una perturbación en los niveles de las emisiones o de una variable meteorológica puede derivar en cambios significativos y no-lineales en el comportamiento de los contaminantes en el aire ambiente, con mecanismos de retroalimentación y respuesta que amplifican o amortiguan las perturbaciones iniciales (Seinfeld & Pandis, 2006). A los contaminantes que son emitidos directamente por alguna fuente de emisión se les denomina **contaminantes primarios**, en tanto que a aquellos que se generan como resultado de transformaciones físicas y químicas en la atmósfera se les denomina **contaminantes secundarios.**

A los principales contaminantes que afectan a la salud humana y a los ecosistemas, cuyos niveles de concentración en la atmósfera están regulados por la normatividad mexicana, se les denomina **contaminantes criterio**; estos son: dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), plomo (Pb), ozono (O_3) y partículas suspendidas de diámetro aerodinámico menor a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$ respectivamente). La Tabla 3.1 resume las características físicas y químicas de estos contaminantes en términos de su comportamiento, reactividad, formación y mecanismos de remoción en la atmósfera. Con el fin de complementar la descripción del NO_2 y las partículas suspendidas, se incluyen al óxido nítrico (NO) y las partículas ultrafinas (<0.1 µm) en el análisis. Se describen también otros tres tipos de contaminantes que si bien no se clasifican como criterio, inciden en la calidad del aire dentro de la ZMVM: los compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales participan en reacciones de formación de contaminantes secundarios, el carbono negro (CN), un tipo específico de partículas suspendidas que por sus características afecta a la visibilidad y el clima, además de poder ocasionar efectos adversos sobre la salud, y el amoniaco (NH_3), un importante precursor de partículas suspendidas.





Tabla 3.1 Características principales de los contaminantes atmosféricos

Contaminante	Criterio	Fórmula química / abreviación	Características físicas y químicas	Reactividad atmosférica	Mecanismos de remoción	Fuente principal de emisión	Concentración de fondo
Dióxido de azufre	Sí	SO_2 Origen: Predominantemente primario	Gas incoloro e irritante, perceptible a partir de una concentración de 300 ppb y con un olor fuerte por encima de las 500 ppb. Es soluble en agua.	En presencia de humedad forma ácido sulfúrico (H_2SO_4), precursor de aerosoles secundarios ultrafinos (<0.1 µm). Se oxida para formar sulfatos (SO_4^{2-}), componente mayoritario de las partículas suspendidas.	Oxidación química y deposición ácida húmeda y seca sobre el suelo, la vegetación, los cuerpos de agua o la infraestructura gris en la ciudad.	La refinería y termoeléctrica de Tula y el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, donde se quema combustóleo (Alcántar González & Cruz Gómez, 2011), las emisiones volcánicas, la combustión de combustibles fósiles con contenido de azufre (como la gasolina, el diésel y el carbón) y la manufactura química (SEDEMA, 2018e).	10 ppt a 1 ppb; en aire contaminado los niveles pueden superar las 30 ppb (Jacobson, 2012).
Óxido nítrico[1]	No	NO Origen: Predominantemente primario	Gas incoloro, poco soluble en agua y un radical libre.	En la atmósfera se oxida para formar NO_2. Es precursor del ácido nítrico (HNO_3)[2] y nitratos (NO_3^-). Participa en reacciones de formación de O_3. Puede formarse por reacciones de fotólisis de otros óxidos de nitrógeno (NO_X).	Oxidación química, donde el producto principal es el NO_2. También puede removerse por disolución en agua y deposición sobre superficies.	Producto principal de procesos de combustión a alta temperatura, por la oxidación del nitrógeno en los combustibles y la reacción entre el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos. Principales fuentes: autos particulares, tractocamiones y autobuses (SEDEMA, 2018e) y fuentes naturales como la actividad volcánica, incendios forestales, descargas eléctricas atmosféricas y la actividad de plantas y microorganismos en el suelo.	5 ppt en aire limpio; en zonas urbanas puede llegar a 100 ppb durante las primeras horas de la mañana (Jacobson, 2012).
Dióxido de nitrógeno[1]	Sí	NO_2 Origen: Predominantemente secundario	Gas tóxico e irritante de color marrón-amarillento, soluble en agua.	Se oxida para formar ácido nítrico (HNO_3) y nitratos (NO_3^-), componentes y precursores de partículas suspendidas. Es intermediario entre la formación de O_3 a partir de NO.	Oxidación química, disolución en agua, reacciones atmosféricas, fotólisis, deposición ácida húmeda y seca sobre el suelo, la vegetación, los cuerpos de agua o la infraestructura gris en la ciudad.	Oxidación atmosférica de NO. En menor magnitud el uso de combustibles fósiles y la quema de biomasa; solo entre el 5 y 15% de las emisiones totales directas de NO_X corresponden a NO_2, aunque el NO emitido se oxida rápidamente para formar NO_2 (Jacobson, 2012).	10 a 50 ppt; en zonas contaminadas se registran niveles de 50 a más de 250 ppb (Jacobson, 2012).
Ozono	Sí	O_3 Origen: Secundario	Gas oxidante e irritante que se caracteriza por un olor fuerte (metálico y picante) cuando excede 20 ppb. También es un contaminante climático de vida corta.	Se forma a partir de reacciones fotoquímicas entre los NO_X y compuestos orgánicos volátiles (COV), en presencia de radiación solar, que tienen como resultado la formación del *smog fotoquímico*[3].	Fotólisis, reacciones atmosféricas en fase gaseosa y sobre superficies, disolución en agua, así como procesos de deposición en la vegetación, la cual puede absorber parte del O_3 (Heald & Spracklen, 2015).	Oxidación de COV iniciada por radicales libres en presencia de NO_X y radiación solar (Jaimes, 2017). La formación depende no solamente de la concentración absoluta de COV y NO_X, sino también de su relación[4]. Para una descripción detallada de las reacciones de formación de O_3, consultar el Anexo 3.1.	En la tropósfera la concentración de O_3 incrementa con la altitud: entre 20 y 40 ppb a nivel del mar, y entre 30 y 70 ppb a altitudes mayores (Jacobson, 2012). Para el caso de la ZMVM, se estima que la concentración de fondo oscila entre las 10 y 45 ppb (SEDEMA, 2018a, 2020a).
Compuestos orgánicos volátiles	No	COV Origen: Primario	Compuestos orgánicos con una alta volatilidad a temperatura y presión ambiente. Se clasifican como COV a aquellos con un punto de ebullición menor a 250°C a una presión de 101.3 kPa (US EPA, 2017).	Participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas para formar contaminantes secundarios como O_3 y aerosoles orgánicos. Los COV reaccionan a diferentes tasas y con mecanismos de reacción distintos, en función de su estructura química.	Oxidación por reacciones en la atmósfera y deposición sobre superficies y vegetación. Su compleja reactividad y la gran variedad de compuestos hace que el monitoreo y regulación sea más difícil.	Fuentes antropogénicas que incluyen una gran variedad de actividades de la población. Se destacan las fugas en instalaciones de gas L.P., uso y fabricación de solventes, artículos de limpieza, pinturas y barnices. La vegetación, la descomposición de residuos orgánicos y las aguas residuales son otras fuentes de COV. El metano (CH_4) es el COV que más se emite; otros ejemplos son el propano, butano, etanol, tolueno, benceno, entre muchos otros.	Para metano (CH_4), la concentración de fondo es de alrededor de 1.85 ppm. Otros COV están presentes de forma natural en concentraciones por debajo de decenas de ppb (Williams, 2004).
Monóxido de cárbono	Sí	CO Origen: Predominantemente primario	Gas inodoro, incoloro e insípido, altamente tóxico, cuyo monitoreo es relevante por sus efectos a corto plazo sobre la salud de las personas.	No tiene una contribución significativa en la formación de contaminantes secundarios. En la atmósfera se oxida a dióxido de carbono (CO_2).	Oxidación química. En menor magnitud por disolución en agua o deposición sobre superficies y vegetación.	Después del dióxido de carbono (CO_2) y el agua, es el segundo gas que más se emite a la atmósfera, aunque con mayor variabilidad espacial y temporal. Su principal fuente son los procesos de combustión incompleta de combustibles fósiles, como gas natural, gas propano, gasolina, petróleo, queroseno, carbón y materia orgánica (madera, biomasa). La principal fuente es el transporte con vehículos motorizados que utilizan combustibles fósiles.	50 a 150 ppb; en aire contaminado, entre 2 y 10 ppm; >100 ppm en túneles y vialidades primarias con niveles significativos de tránsito vehicular (Jacobson, 2012).

1 Los óxidos de nitrógeno (NO_X) son un grupo de compuestos formados por oxígeno y nitrógeno. Por sus efectos a la salud y reactividad, el NO y el NO_2 son importantes en la evaluación de la calidad del aire, aunque al grupo pertenecen también otras especies como el óxido nitroso (N_2O) y el pentóxido de nitrógeno (NO_5). En temas de calidad del aire, el término NO_X hace referencia a la suma de las concentraciones de NO y NO_2. Actualmente los niveles de NO en la atmósfera no son regulados en el país, en tanto que las acciones de monitoreo y regulación se centran en el NO_2.

2 El carácter ácido del H_2SO_4 y el HNO_3, así como de los aerosoles secundarios que se forman a partir de ellos, juega un papel importante en los procesos de deposición ácida húmeda y seca. La deposición ácida ocurre cuando sustancias ácidas en la atmósfera se depositan sobre el suelo, la vegetación, los cuerpos de agua o la infraestructura gris en la ciudad, lo que puede tener efectos negativos como la lixiviación de nutrientes en el suelo, afectaciones sobre el crecimiento vegetal, mala calidad del agua y costos asociados al mantenimiento de infraestructura. Cuando el proceso es directo, se le conoce como deposición ácida seca, mientras que la deposición ácida húmeda ocurre cuando las partículas y gases ácidos se disuelven en las gotas de agua que forman las nubes o que se encuentran suspendidas en la atmósfera (niebla, neblina), con su subsecuente remoción cuando llueve o cuando las gotas se depositan sobre una superficie (Jacobson, 2012).

3 Una mezcla de ozono, aerosoles y otros oxidantes como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el peroxiacetil nitrato (PAN) que, entre otras características, limitan la visibilidad y tienen efectos perjudiciales sobre la salud de la población (Wang, Pereira, & Hung, 2004). En el Anexo 3.1 se puede consultar una descripción más detallada de las reacciones de formación de ozono.

4 La formación de ozono puede estar limitada por COV o NO_X. En una atmósfera limitada por NO_X ($COV/NO_X >> 10$) la concentración de O_3 se reduce de manera efectiva cuando se disminuye la concentración de NO_X. Caso contrario, cuando los NO_X son relativamente más abundantes ($COV/NO_X << 10$) la formación de O_3 está limitada por la concentración de COV, por lo que es más efectivo reducir las emisiones de contaminantes orgánicos para disminuir la concentración de O_3. Entre ambos extremos hay una región donde la producción de O_3 es igualmente sensible a ambos precursores (US EPA, 2008). La formulación de políticas públicas medioambientales efectivas requiere entender la relación COV/NO_X en el área de estudio específica (Garzón *et al.*, 2015). Investigaciones recientes muestran que en el área urbana de la ZMVM la producción de O_3 actualmente está limitada por COV (Lei, de Foy, Zavala, Volkamer, & Molina, 2007; Lei, Zavala, de Foy, Volkamer, & Molina, 2008; Song *et al.*, 2010; Tie *et al.*, 2007; Zhang & Dubey, 2009).

Tabla 3.1 Características principales de los contaminantes atmosféricos *[continuación]*

Contaminante	Criterio	Fórmula química / abreviación	Características físicas y químicas	Reactividad atmosférica	Mecanismos de remoción	Fuente principal de emisión	Concentración de fondo
Partículas ultrafinas (<0.1 µm)[5]	No. Sin embargo, forman parte de las $PM_{2.5}$.	$PM_{0.1}$ Origen: Primario y secundario	Diámetro aerodinámico menor a 0.1 µm. Se componen principalmente de sulfatos, carbono elemental, metales y compuestos orgánicos.	Formación por nucleación de gases atmosféricos (H_2SO_4, NH_3 y algunos COV). Crecimiento por coagulación, por condensación de gases o por reacciones químicas.	Tiempo de residencia corto (minutos u horas). Crecen en tamaño para pasar a formar parte de las partículas finas. Remoción por procesos de difusión en gotas de lluvia o deposición sobre superficies.	Formación en la atmósfera a partir de precursores. Origen primario por quema de combustibles fósiles; los motores a diésel son una de las principales fuentes de partículas ultrafinas primarias (Health Effects Institute, 2013).	No aplica. La concentración de fondo de partículas $PM_{2.5}$ contempla la contribución de las partículas ultrafinas.
Partículas finas (0.1-2.5 µm)[5]	Sí. La suma de las partículas finas y ultrafinas se conoce como $PM_{2.5}$.	$PM_{2.5-0.1}$ Origen: Primario y secundario	Diámetro aerodinámico entre 0.1 y 2.5 µm. Solubles en agua. Se componen principalmente de iones inorgánicos como nitrato, sulfato y amonio; carbono elemental y compuestos orgánicos, metales pesados, agua y agentes patógenos como bacterias y virus.	Se forman por la oxidación atmosférica del SO_2, los NO_X y COV. Se originan por diversos procesos como la condensación de gases y coagulación de partículas ultrafinas, reacción de gases en fase líquida y por la disolución de gases en gotas de agua suspendidas en la atmósfera.	Tiempo de vida en la atmósfera de días a semanas; al ser muy solubles en agua, forman fácilmente gotas de lluvia en la atmósfera y son removidas principalmente por precipitación pluvial, aunque también participan en procesos de deposición seca. Pueden ser transportadas de cientos a miles de kilómetros antes de ser removidas.	El sector transporte es el principal emisor de este contaminante; destaca la contribución de tractocamiones y autobuses. Otras emisiones primarias provienen de fuentes industriales como la fabricación de productos a base de minerales no metálicos, la industria alimentaria y la fabricación de fibra de vidrio (SEDEMA, 2018e). También se forman en la atmósfera a partir de compuestos precursores.	Para $PM_{2.5}$ la concentración de fondo se estima entre 3-5 µg/m³ en América del Norte y Europa Occidental (OMS, 2006).
Partículas gruesas (2.5-10 µm)[5]	Sí. La suma de las partículas gruesas, finas y ultrafinas se conoce como PM_{10}.	$PM_{10-2.5}$ Origen: Predominantemente primario	Diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 µm. Relativamente insolubles. Se componen principalmente de nitratos, cloruros y sulfatos, óxidos de la corteza terrestre (Si, Al, Fe), carbonatos, bacterias, polvo, polen, moho, esporas de hongos y detritos de animales y plantas.	Procesos mecánicos como la abrasión, el rompimiento de sólidos o gotas líquidas y la suspensión de polvos por acción del viento, aunque también pueden formarse por reacciones atmosféricas y el crecimiento de partículas de la fracción fina.	Tiempo de vida corto en la atmósfera (minutos a horas). Por su tamaño presentan menores distancias de transporte en comparación con las partículas más finas. Remoción por procesos de precipitación seca o por gotas de lluvia.	Algunas fuentes primarias son el transporte de carga y los autobuses que utilizan diésel como combustible, la suspensión de partículas de suelo (por ejemplo, por erosión en campos agrícolas, calles no pavimentadas) y la suspensión de polvo en calles pavimentadas (SEDEMA, 2018e). Otras fuentes son las actividades de construcción y demolición, la fabricación y comercio de concreto y grava, y las cenizas que provienen de procesos de combustión.	Aproximadamente 10 µg/m³ (Ostro, Prüss-Üstün, Campbell-Lendrum, Corvalán, & Woodward, 2004).
Plomo	Sí	Pb Origen: Primario	Metal pesado altamente tóxico. Al ser ingerido, puede llegar al torrente sanguíneo y causar efectos a la salud que incluyen daños al sistema nervioso central, al sistema cardiovascular y a las células de la sangre (SEDEMA, 2018a).	Forma parte de las partículas suspendidas en la atmósfera.	Deposición sobre superficies (suelo, agua, infraestructura gris) y vegetación. Inhalación e ingesta de seres vivos; se destaca que es bioacumulable, lo que implica que las concentraciones en seres vivos incrementan a medida que se avanza en el nivel trófico de la cadena alimenticia.	El Pb y sus compuestos se han utilizado en productos como pinturas, cerámica, tuberías y materiales de plomería, soldaduras, aditivos en gasolina, baterías, municiones y cosméticos (US EPA, 2018). Su principal fuente es la resuspensión de material remanente en el suelo, aunque la fabricación de acumuladores y baterías de plomo, las incineradoras de residuos, actividades mineras y el uso de algunas pinturas y pigmentos (Jacobson, 2012) también contribuyen.	No aplica. En México el Pb era emitido por la combustión de gasolinas con aditivos a base del metal. Sin embargo, desde la década de los noventa se retiró este aditivo de las gasolinas en el país, lo cual disminuyó considerablemente las emisiones por debajo de los límites normados.
Carbono negro	No	CN Origen: Primario	Partículas de carbono elemental con propiedades ópticas específicas, como la absorción de luz solar, que después se transforma a calor. Se cataloga como un contaminante climático de vida corta.	Es un componente importante de las partículas finas (Janssen *et al.*, 2012). Tiene impactos sobre la salud de la población, reduce la productividad agrícola y causa daños sobre la vegetación y los ecosistemas cuando se deposita sobre estos.	Deposición directa sobre superficies o lavado por acción de la lluvia.	Combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. Se destaca la contribución de los motores a diésel y la quema de combustibles pesados y carbón como fuentes de carbono negro u hollín (Cruz Núñez, 2019; US EPA, 2012).	Estudios específicos en la ZMVM determinaron una concentración de fondo de 0.70 µg/m³ (Peralta *et al.*, 2019).
Amoniaco	No	NH_3 Origen: Predominantemente primario	Gas incoloro con un característico olor irritante. Es muy soluble y reactivo.	El NH_3 es el compuesto básico principal en la atmósfera; reacciona con compuestos ácidos para formar sales de amonio (NH_4^+) que son un constituyente mayoritario de las partículas suspendidas.	Reacciones químicas atmosféricas, disolución en agua y deposición sobre superficies y vegetación.	Fuentes agrícolas; incluye el manejo de estiércol y la aplicación de fertilizantes. Otras fuentes son los procesos biogénicos por microorganismos en el suelo, la disposición de residuos, fuentes industriales y la quema de biomasa.	De 0.1 a 5 ppb en aire limpio; en zonas agrícolas puede alcanzar niveles de 100 ppb (Pogány *et al.*, 2015).

5 En el Anexo 3.1 se puede consultar una descripción más detallada de las distintas clases de partículas suspendidas de acuerdo con diferentes criterios como su origen, tamaño, composición y efectos a la salud humana.

3.2 Sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT)

Un sistema de monitoreo atmosférico es una herramienta que se utiliza para evaluar el estado de la calidad del aire y asociar los datos recabados con impactos que la contaminación atmosférica tiene sobre la salud pública y los ecosistemas. La información generada por estos sistemas es indispensable para proteger a la población, ya que los datos pueden ser utilizados para el diseño, evaluación e implementación de políticas públicas para mejorar la calidad del aire; también pueden usarse para emitir alertas sobre niveles de contaminación peligrosos a la salud y así tomar medidas inmediatas para reducir las fuentes de emisión en episodios de emergencia. En México, los sistemas de monitoreo atmosférico están regidos por la NOM-156-SEMARNAT-2012, donde se establecen los lineamientos para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

La ZMVM cuenta con el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) desde hace 35 años, el cual es operado y administrado por el gobierno de la Ciudad de México para recopilar información sobre el estado de la calidad del aire en la ZMVM en diferentes escalas de tiempo. El SIMAT trabaja de forma ininterrumpida para evaluar la calidad del aire a través de la medición de la concentración de la mayoría de los contaminantes criterio: SO_2, NO_2, CO, O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como parámetros meteorológicos (SEDEMA, 2018b). Los equipos automáticos del SIMAT registran los valores de concentración horaria de manera continua, los 365 días del año, lo que permite detectar cuáles son los contaminantes que predominan en la ZMVM, la ubicación de las zonas que presentan las máximas concentraciones, así como identificar los patrones de comportamiento de cada contaminante a través del tiempo, de forma horaria, semanal y anual, y así alertar a la población sobre los riesgos asociados. Los patrones en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos permiten establecer relaciones con los parámetros meteorológicos y las fuentes de emisión en la región, evaluar tendencias históricas y analizar el impacto que ha tenido la implementación de diferentes programas para el control de la contaminación atmosférica.

El SIMAT cuenta con un total de 44 sitios de monitoreo en operación, distribuidos en cuatro subsistemas, y su cobertura comprende la mancha urbana de la ZMVM (SEDEMA, 2018b); 15 de los sitios del sistema se ubican en el Estado de México, 14 de ellos en municipios conurbados que forman parte de la ZMVM y uno adicional en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), mientras que el resto de las estaciones se ubica dentro de la Ciudad de México. El SIMAT tiene la capacidad técnica e infraestructura para realizar la reparación, mantenimiento, operación y verificación de toda la instrumentación con la que cuenta, así como un área especializada para difundir oportunamente los niveles de contaminación horaria a la población a través de diferentes medios electrónicos y redes sociales.

En términos operativos, el SIMAT mide continuamente las concentraciones atmosféricas de los contaminantes criterio a través de 34 estaciones automáticas de monitoreo atmosférico que conforman el subsistema de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). Esta red opera continuamente y reporta en tiempo real los niveles de contaminación, para que se tomen las medidas necesarias y oportunas en caso de que los valores de concentración presenten niveles elevados y sea necesario reducir el nivel de exposición de la población. Nueve estaciones conforman la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA), cuyo objetivo es determinar los valores de concentración en muestras de partículas de diferentes tamaños: suspendidas totales (PST), que van de 10 hasta 100 micrómetros (µm); menores o igual a 10 µm, también conocidas como partículas gruesas (PM_{10}); y menores o igual a 2.5 µm, conocidas como partículas finas ($PM_{2.5}$). La REDMA también permite evaluar la composición de las partículas muestreadas, el contenido de plomo (Pb) en 5 sitios con monitoreo de PST, y el carbono negro en muestras de $PM_{2.5}$.

Además de la RAMA y la REDMA, otros dos subsistemas forman parte del SIMAT (SEDEMA, 2018b), la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA). La REDMET cuenta con 28 estaciones que miden continuamente los parámetros meteorológicos de temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica; además, cuenta con un radar perfilador de viento. La REDDA cuenta con 16 sitios de muestreo que operan durante la temporada de lluvia para caracterizar el depósito húmedo; es la única red de su tipo en el país y sirve para identificar el impacto de la contaminación atmosférica en el patrimonio cultural y en el suelo de conservación de la Ciudad de México.

La Tabla 3.2 resume los objetivos específicos, el número de estaciones y los parámetros que miden cada uno de los subsistemas que integran al SIMAT. En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de las estaciones que conforman a cada una de las redes. Para conocer a detalle los objetivos particulares de cada una de las redes, así como la descripción de la configuración actual del sistema y los recursos con los que opera el SIMAT, se puede consultar el Anexo 3.2, el cual también incluye el listado de estaciones de cada red, la fecha de inicio de su operación y los parámetros que miden.

Tabla 3.2 Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México

Subsistema	Objetivo	Número de estaciones	Parámetros medidos
RAMA	Registrar la calidad del aire ambiente en la ZMVM con métodos de medición automáticos. Informar de manera oportuna a la población sobre los niveles de contaminación registrados.	**34**	**O_3, PM_{10}, $PM_{2.5}$, CO, SO_2, NO_X**
REDMA	Registrar partículas suspendidas totales con métodos de medición manuales y complementar el registro de la RAMA. Determinar la variabilidad espacial y temporal de la deposición húmeda y seca, caracterizar el fenómeno de la lluvia ácida y validar los modelos de transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos.	**9**	**PST, PM_{10}, $PM_{2.5}$, Pb**
REDDA	Utilizar equipos semiautomáticos para la recolección de muestras de depósito seco (polvo sedimentable) y depósito húmedo (lluvia, granizo, nieve, rocío) en los sitios de muestreo. En las muestras de depósito húmedo se realiza un análisis fisicoquímico para conocer las características físicas de la precipitación, su composición iónica y acidez.	**16**	**Aniones, cationes, pH, nitratos, sulfatos y conductividad eléctrica**
REDMET	Medir los parámetros meteorológicos que influyen en la dispersión, transporte y transformación de los contaminantes en la atmósfera. Medir la radiación solar para la investigación de procesos fotoquímicos.	**28**	**Temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento, radiación solar (UV-A y UV-B), presión barométrica**

Fuente: *Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2018c, 2018d).*

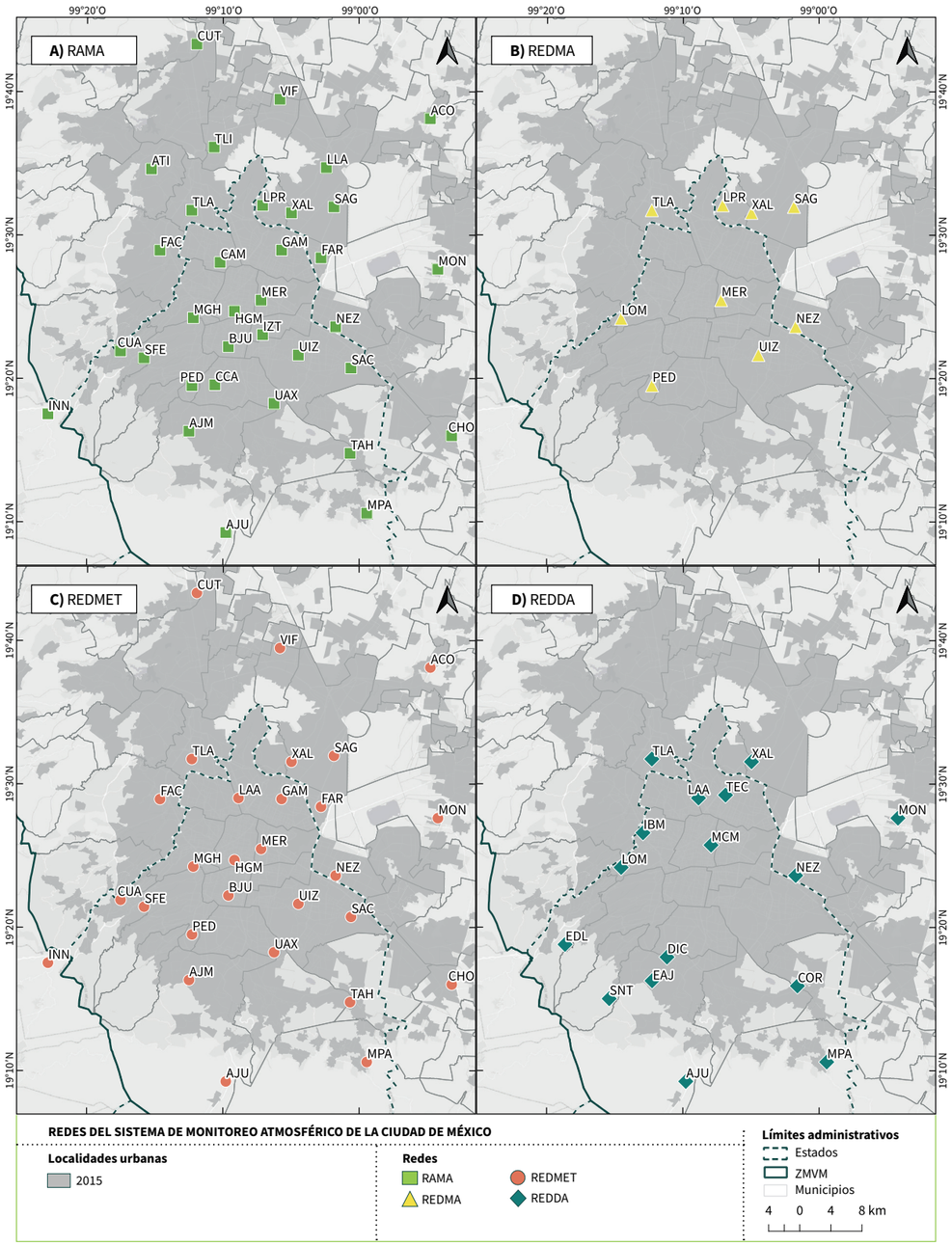


Figura 3.1 Ubicación de las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico
Fuente: *Catálogo de estaciones de monitoreo del SIMAT (SEDEMA, 2020a).*

El Laboratorio para el Análisis Ambiental (LAA) del SIMAT cuenta con un área para la atención de los equipos de monitoreo y muestreo, un área para el acondicionamiento de muestras de partículas y del depósito atmosférico, así como espacios de oficinas y para el control de calidad. Asimismo, cuenta con equipo para las campañas de medición de aerosoles, equipo para realizar análisis elementales e identificar algunas especies químicas o compuestos, a través de cromatógrafos de gases-masa, líquidos, entre otros métodos de análisis. También cuenta con un cuarto para análisis gravimétrico y analizadores especiales para estudios de aerosoles atmosféricos y COV; adicionalmente, se tiene un área de procesamiento de datos para la difusión oportuna de la información recopilada por parte del Centro de Información de Calidad del Aire (CICA). El CICA es el repositorio de los datos generados por el SIMAT, responsable de la validación, procesamiento y difusión de la información generada por el programa de monitoreo. Finalmente, el SIMAT también cuenta con una unidad móvil para el monitoreo en zonas fuera de la cobertura de las estaciones fijas.

El Laboratorio de Estándares es el lugar en donde inicia el control de calidad de la RAMA. Este cuenta con un centro de datos responsable de la comunicación de las estaciones hacia el CICA, así como de la operación de la nube y del supercómputo para el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Ciudad de México (AQFS-Mex), además de estar a cargo de los servicios de almacenamiento de otras páginas de la SEDEMA. El SIMAT mantiene alianzas con algunos laboratorios del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, por medio de un convenio de coordinación para realizar estudios específicos con técnicas novedosas.

3.2.1 La calidad de los datos que genera el SIMAT

Auditorías y cumplimiento de la NOM-156-SEMARNAT-2012

La NOM-156-SEMARNAT-2012 tiene como principal objetivo especificar las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire (DOF, 2012). La calidad de los datos que genera el sistema de monitoreo se verifica mediante auditorías que evalúan la efectividad del sistema y sus elementos, que buscan identificar fallas en el programa de aseguramiento de calidad. Las evaluaciones son aplicadas por personal calificado ajeno a la operación del sistema. Además, el SIMAT debe cumplir con el Procedimiento Federal para la Auditoría a los Sistemas de Medición de la Calidad del Aire. Para garantizar la generación de información confiable y precisa, a través de un proceso controlado bajo estándares de calidad, durante 2017 y 2018 se realizaron auditorías de desempeño a los analizadores de las estaciones de la RAMA. Estas auditorías fueron llevadas a cabo por "EPA Systems", un organismo independiente externo a la SEDEMA. Los resultados de las auditorías practicadas al SIMAT desde 2005 muestran una mejora importante en la operación del sistema (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Resultados de las evaluaciones de desempeño a la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

	Diferencia absoluta de la media en la desviación de las mediciones		
Parámetro	**Auditoría 2005**	**Auditoría 2012**	**Auditoría 2018**
O_3	2.4 – 11.8 %	0.5 – 5.4%	0.5 – 3.7%
NO_2	6.3 – 28.1 %	NA	NA
NO_X	NA	0.1 – 6.8%	0.3 – 4.6 %
SO_2	0.5 – 26.7%	0.9 – 6.0%	0.1– 4.6 %
CO	2.3 - 11.4 %	0 – 4.3%	3.6 – 7.2 %

Fuente: *Evaluaciones de desempeño (EPA Systems, 2012, 2018; US EPA & Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS), 2005).*

El valor límite de cumplimiento para una auditoría es de ±15%; mientras más cercano sea el valor de respuesta del instrumento a cero, la precisión en la medición es mejor. Cuando se presenta una desviación mayor a 15% significa que se debe aplicar una acción correctiva a todo el sistema.

La auditoría más reciente del SIMAT (2018) concluyó que, en general, el sistema está bien administrado y opera de manera efectiva (EPA Systems, 2018). Las capacidades técnicas que tiene para rastrear datos, capacitar al personal de operaciones, administrar grandes conjuntos de datos, realizar actividades básicas de mantenimiento y calibración, así como rastrear y mantener datos de aseguramiento y control de calidad, son ejemplares. Cabe señalar que al 2018, el SIMAT contaba con seis operadores para 32 sitios automatizados, o un operador por cada 5.3 sitios, a pesar de que la "regla de oro" normal es que una red debe tener aproximadamente un operador por cada tres sitios. Los resultados de la auditoría demuestran que, pese a la falta de personal, la administración de la red cumplió con los estándares establecidos. Dentro de las sugerencias para el mejoramiento de la RAMA están cambiar las tomas de muestra para evaluar todo el sistema de muestreo en las verificaciones automáticas, lo que permitiría simplificar la operación de los sitios de monitoreo y generar datos de mejor calidad (EPA Systems, 2018).

3.2.2 Sistema de pronóstico de la calidad del aire

El Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Ciudad de México (AQFS-Mex) es una herramienta útil para la toma de decisiones y para informar a la población, de manera anticipada, sobre la posible concentración de los contaminantes atmosféricos durante el día actual y el siguiente. Con esta información la población puede tomar acciones de prevención con el fin de disminuir el riesgo a su salud. Esta herramienta fue desarrollada por la SEDEMA en colaboración con el Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (BSC, por sus siglas en inglés) y su objetivo principal es elaborar un pronóstico meteorológico y de contaminantes para las siguientes 24 y 48 horas, utilizando el conocimiento actual sobre la química y dinámica atmosféricas de la región (Guevara *et al*., 2017; SEDEMA, 2018g). El sistema tiene como productos un pronóstico de la calidad del aire para ambos días, el cual presenta el máximo de O_3 por estación, junto con el color correspondiente de la escala del Índice Aire y Salud, un pronóstico meteorológico y, finalmente, un pronóstico por contaminante, para el cual se presenta el mapa con la distribución espacial de la concentración y su comportamiento horario durante ambos días. La descripción del conjunto de modelos que conforman el AQFS-Mex se presenta en la Tabla 3.4.

El desempeño de todo pronóstico de calidad del aire depende directamente del inventario de emisiones y de la simulación de las variables meteorológicas. Sin embargo, cualquier pronóstico conlleva una cantidad de procesos que se basan en estimaciones, por lo que sus salidas también deberán ser interpretadas como una estimación que guía la toma de decisiones y no como un valor exacto o determinante. El desempeño del sistema AQFS-Mex de la Ciudad de México es razonable, ya que en términos generales, el rendimiento del modelo, definido como el porcentaje de pronósticos categorizados como buenos y regulares, fue de 80% para el pronóstico de 24 horas y de 72% para el de 48 horas (SEDEMA, 2018a).

Para el O_3 el pronóstico reproduce correctamente el perfil horario general y por estación; además, la tasa de aciertos (probabilidad de detección) fue cercana a 100 en ambos modelos (24 y 48 horas) lo que indica que el pronóstico para valores horarios superiores a 95 ppb fue bueno. En algunos casos presenta dificultades para pronosticar los episodios denominados de O_3-norte (SEDEMA, 2018a), aunque la mayoría de las veces reproduce correctamente el patrón de O_3. Actualmente el sistema no genera públicamente un pronóstico para PM_{10}, debido a que su evaluación y mejora aún se encuentran en proceso. En cuanto a $PM_{2.5}$, en ocasiones se presenta una subestimación de la concentración debido a que las emisiones de partículas tienen un origen diverso; además, existen fuentes que no son contempladas en el modelo, como los incendios repentinos, ya que no son predecibles y afectan la calidad del aire temporalmente. El modelo se evalúa diariamente y se realiza un ajuste con el filtro de Kalman. Actualmente se están desarrollando actualizaciones del sistema para mejorar su desempeño.

Tabla 3.4 Sistema de Pronóstico de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México

Tipo de modelo	Descripción
Modelo meteorológico	Se utiliza el modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model) para la predicción de las condiciones meteorológicas en la región, con el uso de la información del modelo global GFS (Global Forecast System). Se ejecuta en cuatro dominios anidados (27, 9, 3 y 1 km^2) para generar el pronóstico de temperatura, campo de viento a 10 m y a diferentes niveles de presión, precipitación, radiación solar y altura de capa de mezcla.
Modelo de emisiones	Se utiliza un modelo de emisiones adaptado especialmente para la ZMVM. Los datos de entrada del modelo son el inventario de emisiones desarrollado por la SEDEMA y el Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM), elaborado por la SEMARNAT. Este modelo desagrega espacial y temporalmente las emisiones antropogénicas y biogénicas de NO_x, COV, CO, SO_2, NH_3 y partículas suspendidas, entre otros contaminantes. El modelo se ejecuta en dos dominios anidados (3 y 1 km^2) y genera la información necesaria para correr el modelo fotoquímico (de transporte químico)
Modelo de transporte químico	Se usa el modelo CMAQ (Community Multi-scale Air Quality), que fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) y el cual es soportado y distribuido por el Community Modeling and Analysis System (CMAS). El modelo fotoquímico utiliza las salidas del modelo meteorológico y de emisiones, y se ejecuta en dos dominios anidados (3 y 1 km^2). Cuenta con un conjunto de mecanismos de reacción, que simulan las transformaciones químicas que ocurren en la atmósfera considerando las variables meteorológicas, para determinar la influencia de la dinámica atmosférica en los procesos químicos y de dispersión de contaminantes.

Fuente: *Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire de la Ciudad de México (Guevara et al., 2017; SEDEMA, 2018f).*

Además del pronóstico de calidad del aire que se realiza de manera operativa, el AQFS-Mex permite ejecutar escenarios de disminución de emisiones y, con esto, analizar y evaluar políticas públicas actuales o futuras, encaminadas a la mejora de la calidad del aire a mediano y largo plazo. El modelo también sirve para evaluar episodios críticos, como es el caso de los incendios forestales; analizar la contribución de partículas; determinar fuentes externas de emisión, como es el caso de la contaminación de SO_2; y estudiar episodios de contingencias.

3.3 Indicadores de calidad del aire

En México, el estado de la contaminación atmosférica se evalúa a través de indicadores de la calidad del aire, calculados tanto por estación de monitoreo, como a nivel de ciudad o zona metropolitana. Los indicadores permiten comparar las concentraciones de los contaminantes en el aire ambiente, registradas por el SIMAT, contra los límites permisibles de concentración establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental para los distintos contaminantes criterio. Los indicadores se calculan con diferentes tipos de datos en función del fenómeno que se quiera representar (INECC, 2010). Algunos de los indicadores de calidad del aire más comunes son los siguientes:

INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE

- Promedio horario: el promedio de datos minutales dentro de una hora.
- Promedio móvil de 8 o 24 horas: a partir de los datos horarios de concentración, se promedia el dato de la hora seleccionada con los datos registrados en las 7 o 23 horas previas, respectivamente.
- Percentil: es la medida estadística que indica el valor por debajo del cual se encuentra un porcentaje de observaciones ordenadas de menor a mayor. Por ejemplo, el percentil 90 representa el 90% de los datos, dejando arriba de este el 10% restante. Este indicador se puede obtener de un conjunto de promedios diarios u horarios.
- Concentración diaria: se calcula a partir de datos horarios. Se reportan los siguientes indicadores:
  - Máximo diario: es el valor más alto registrado dentro de los 24 valores horarios o bien del promedio móvil.
  - Promedio diario: media aritmética de los 24 datos horarios registrados en un mismo día, de la hora 1 a 24, o bien, de 0 a 23 horas.
- Concentración anual: su cálculo depende del contaminante y se obtiene a partir de datos horarios o promedios diarios. Comúnmente se reportan los siguientes valores:
  - Máximo anual: es el valor más alto registrado de un determinado indicador (promedio horario, promedio móvil de 8 horas o los promedios diarios registrados en un año). De manera análoga, el 2.º máximo representa el segundo valor más alto, del mismo conjunto de datos.
  - Promedio anual: es la media aritmética de los datos de concentración en un mismo año; su cálculo depende del contaminante analizado y se obtiene a partir los promedios diarios o datos horarios.

Para el cálculo de estos indicadores es fundamental que la información cumpla con criterios de suficiencia de datos establecidos en las NOM de salud ambiental de cada contaminante. En el presente documento, la obtención de los indicadores de calidad del aire cumple con estos criterios de suficiencia por hora, día, mes, trimestre y año. Se considera como válido a un indicador cuando cuenta con una suficiencia mayor o igual al 75% (esto es, al menos 75% de los minutos, horas, días o trimestres, respectivamente).

3.3.1 Límites permisibles y normas de salud ambiental

Los estándares para la protección de la salud pública por los efectos de la contaminación atmosférica están publicados en las NOM de salud ambiental, de observancia obligatoria en todo el país. Las NOM de salud vigentes establecen los límites permisibles para cada uno de los contaminantes criterio, así como las metodologías de cálculo de los indicadores. La Tabla 3.5 resume los indicadores utilizados para evaluar el cumplimiento de las NOM de salud ambiental vigentes.

Tabla 3.5 Especificaciones técnicas y criterios de evaluación de las NOM de salud ambiental vigentes

Contaminante	NOM	Límite	Indicador y dato base	Forma de evaluación	Criterios de suficiencia[a]
Ozono (O_3)	NOM-020-SSA1-2014	0.095 ppm	Máximo de los datos horarios (1 h)	No deben rebasarse durante el año.	Al menos 75% de los datos horarios o los promedios móviles de 8 horas [b].
		0.070 ppm	Máximo de los promedios móviles (8 h)		
Monoxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11.00 ppm	Máximo de los promedios móviles (8 h)	No debe rebasarse durante el año [c].	Al menos 75% de los promedios móviles de 8 horas.
Dioxido de azufre (SO_2)[6]	NOM-022-SSA1-2010	0.200 ppm	Máximo de los promedios móviles (8 h)	No debe rebasarse más de una vez al año (se utiliza el segundo máximo) [d].	Al menos 75% de los promedios móviles de 8 horas.
		0.110 ppm	Máximo de los promedios diarios (24 h)	No debe rebasarse durante el año [d].	Al menos 75% de los promedios de 24 horas.
		0.025 ppm	Promedio anual de los datos horarios	–	Al menos 75% de los datos horarios.
	NOM-022-SSA1-2019	0.075 ppm	Promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales, obtenidos de los máximos (1 h) diarios.	–	Al menos 75% de los datos utilizados en el cálculo de los indicadores, con base en el Anexo Normativo A de la norma respectiva.
		0.040 ppm	Máximo de 3 años consecutivos de los promedios diarios (24 h).	No debe rebasarse durante tres años consecutivos.	
Dioxido de nitrógeno (NO_2)	NOM-023-SSA1-1993	0.210 ppm	Máximo de los datos horarios (1 h).	No debe rebasarse durante el año [e].	Al menos 75% de los datos horarios.
Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	NOM-025-SSA1-2014	75 µg/m³	Máximo de los promedios diarios (24 h).	No debe rebasarse durante el año.	Al menos tres trimestres con el 75% de los promedios de 24 horas válidos.
		40 µg/m³	Promedio anual.	–	
Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)	NOM-025-SSA1-2014	45 µg/m³	Máximo de los promedios diarios (24 h).	No debe rebasarse durante el año.	Al menos tres trimestres con el 75% de los promedios de 24 horas válidos.
		12 µg/m³	Promedio anual.	–	
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	1.5 µg/m³	Promedio trimestral.	–	Al menos 75% de los datos utilizados para generar el indicador.

Notas:

a. En las NOM para NO_2 y CO, así como en la versión anterior de la NOM para SO_2, no se especifica cómo realizar el manejo de datos y tampoco criterios de suficiencia de información, pero en congruencia con las especificaciones de las NOM de partículas y O_3 se aplica, en la agregación de cada dato, el criterio de 75% de suficiencia de información para obtener los indicadores.

b. En el caso del O_3 en los numerales 5.2.3.1 y 5.2.3.2 de la NOM se especifica que aún en el caso en el que no se cumpla el criterio de suficiencia del 75% de los valores horarios o de los promedios móviles de 8 horas, se incumplirá la norma cuando al menos uno de los valores horarios sea mayor a 0.095 ppm o al menos uno de los valores de los promedios móviles de 8 horas sea mayor a 0.070 ppm.

c. Para CO la especificación menciona que la concentración "no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm o lo que es equivalente a 12 595 µg/m³ en promedio móvil de ocho horas una vez al año", lo anterior se interpreta como que el valor límite no debe superarse durante el año.

d. Para el SO_2 la especificación menciona que el promedio de 24 horas "no debe rebasar el límite máximo normado de 288 µg/m³ o 0.110 ppm promedio en 24 horas, una vez al año", lo anterior se interpreta como que no debe rebasarse durante el año. Para el caso del promedio móvil de 8 horas la especificación menciona que la concentración "debe ser menor o igual a 524 µg/m³, o 0.200 ppm promedio horario para no ser rebasado dos veces al año"; el enunciado se interpreta como que la concentración del promedio de 8 horas no debe rebasarse más de una vez al año, por lo tanto, se utiliza el 2.º máximo.

e. En el caso del NO_2 la especificación menciona que "no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm o lo que es equivalente a 395 µg/m³, en una hora una vez al año". Para propósitos de esta evaluación se entiende que el valor límite no debe superarse durante el año.

Fuente: *Elaborado a partir de las normas de salud ambiental publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 1993, 1994b, 1994a, 2009, 2014b, 2014a, 2019a) y reportes de calidad del aire (INECC, 2018; SEDEMA, 2018a).*

6 El 16 de febrero de 2020 entró en vigor la actualización de la NOM de salud ambiental para SO_2, la NOM-022-SSA1-2019, con límites más estrictos y nuevas metodologías de cálculo para los indicadores. Se indican los límites permisibles establecidos en la versión derogada (NOM-022-SSA1-2010) al ser el instrumento vigente para la evaluación de la calidad del aire por SO_2 en 2018.

3.3.2 Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS), con el objetivo de ofrecer orientación sobre la manera de reducir los efectos de la contaminación atmosférica en la salud pública, define valores guía para la gestión de la calidad del aire. Las Guías de la Calidad del Aire (GCA) de la OMS son recomendaciones y están basadas en la información de estudios de dosis-respuesta o estimaciones del riesgo a la salud en diversas poblaciones por exposición a contaminantes atmosféricos. Para más información sobre las GCA de la OMS y los impactos a la salud por la contaminación atmosférica, se puede consultar el Capítulo 6 del ProAire.

Aunque los valores de las GCA de la OMS son más estrictos que los límites establecidos por las NOM de salud ambiental, se reconoce que en cada país, las normas y estándares nacionales pueden variar en función del enfoque adoptado y los objetivos de las políticas de calidad del aire. Las guías no son obligatorias y la actualización de los límites permisibles de los contaminantes criterio debe evaluar la viabilidad de alcanzar los valores propuestos por la OMS, de tal forma que se establezcan valores límite que den mayor protección a la población. La aplicación de valores límite permisibles debe tener en cuenta las condiciones locales para equilibrar los riesgos a la salud, la viabilidad tecnológica, aspectos económicos, así como factores políticos y sociales (OMS, 2017). Las GCA se presentan solo con fines comparativos, dado que la calidad del aire se debe evaluar únicamente con la normatividad vigente en el país. La Tabla 3.6 presenta los valores de las GCA de la OMS por contaminante; se define el indicador o dato base utilizado para la evaluación de las guías y el límite equivalente establecido en las NOM de salud ambiental.

Tabla 3.6 Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud

Contaminante criterio	Indicador y dato base	Guía de calidad del aire	Límite NOM
Dióxido de azufre (SO_2)	Máximo de los promedios diarios (24 h)	20 µg/m³ (0.010 ppm*)	0.040 ppm (83 µg/m³ *)
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	Máximo de los datos horarios (1 h)	200 µg/m³ (0.134 ppm*)	0.210 ppm (312 µg/m³ *)
	Promedio anual	40 µg/m³ (0.027 ppm*)	*No aplica*
Monóxido de carbono (CO)	Máximo de los datos horarios (1 h)	30 000 µg/m³ (33.13 ppm*)	*No aplica*
	Máximo de los promedios móviles (8 h)	10 000 µg/m³ (11.04 ppm*)	11.00 ppm (9960 µg/m³ *)
Ozono (O_3)	Máximo de los promedios móviles (8 h)	100 µg/m³ (0.064 ppm*)	0.070 ppm (109 µg/m³ *)
Partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10})	Máximo de los promedios diarios (24 h)	50 µg/m³	75 µg/m³
	Promedio anual (percentil 99)	20 µg/m³	40 µg/m³
Partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$)	Máximo de los promedios diarios (24 h)	25 µg/m³	45 µg/m³
	Promedio anual (percentil 99)	10 µg/m³	12 µg/m³

* Para las guías de calidad del aire y los límites de la NOM, se incluyen los valores de concentración equivalentes en ppm o µg/m³ según aplica, a 17°C y 585 mmHg (condiciones locales de en la ZMVM).

Fuente: *Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1999, 2006).*

3.3.3 Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud

El Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud es una herramienta para la comunicación de los niveles de contaminación en todo el país. Este tiene como objetivo homologar la generación y la difusión de los niveles de contaminación y los riesgos a la salud asociados. El índice relaciona los valores de concentración de cada contaminante criterio con una categoría y un nivel de riesgo, identificado por un color específico para su reporte, así como recomendaciones para la protección de grupos sensibles y la población en general. El cálculo y difusión de este índice, también denominado Índice Aire y Salud, está normado por la NOM-172-SEMARNAT-2019 (DOF, 2019b), que entró en vigor el 18 febrero del 2020, y suple todos los índices de calidad del aire locales, como lo es el Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México, antes conocido como IMECA[7], el cual contaba con un algoritmo similar al de la US EPA y se utilizaba para la difusión de los niveles de contaminación en la ZMVM, según lo indica la Norma Ambiental NADF-009-AIRE-2017 (Gobierno de la Ciudad de México, 2018). El Anexo 3.4 explica con mayor detalle el cálculo del Índice Aire y Salud y el Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México.

3.4 Diagnóstico de la calidad del aire

Dentro del diagnóstico del ProAire ZMVM 2021-2030 se presenta la evaluación del cumplimiento de las NOM de salud ambiental en la ZMVM por estación de monitoreo atmosférico y entidad federativa (Ciudad de México y área conurbada del Estado de México), con base en el Capítulo 1 del Informe Anual de Calidad del Aire de la Ciudad de México para el año 2018 (SEDEMA, 2020a). Dicha evaluación se elabora respecto de los siguientes contaminantes criterio: SO_2, NO_2, CO, O_3 y partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$. A pesar de que el plomo (Pb) también es un contaminantes criterio, en esta sección no se aborda su diagnóstico debido a que sus concentraciones se han mantenido por debajo de los límites requeridos por la NOM de salud ambiental respectiva, con el retiro de este aditivo de la gasolina a partir de la década los 90.

Los resultados obtenidos de la evaluación se comparan con las GCA de la OMS y los límites permisibles de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, 2016). La comparación con los estándares de la US EPA se incluye dado que poseen similitudes con los límites permisibles de la normatividad mexicana en términos de valores de concentración y forma de evaluación de algunos indicadores. Posteriormente se presenta el comportamiento de la concentración de cada contaminante, su distribución especial y las tendencias por hora, día de la semana y época del año, para facilitar la determinación de patrones de los contaminantes y las posibles causas asociadas; toda la información presentada toma como base el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 de la SEDEMA, así como sus versiones anteriores.

La tendencia en el comportamiento histórico de los niveles de contaminación también proviene del análisis descrito en el informe anual 2018 (SEDEMA, 2020a), el cual utiliza los promedios mensuales de cada contaminante desde 1995 y hasta 2018, para posteriormente generar una línea de tendencia con el método LOESS[8]; este análisis se incluye en el Anexo 3.3. A manera de complemento, en el Anexo 3.4 se describen los valores registrados para el Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México en el año 2018 y una comparación con el nuevo Índice Aire y Salud para los contaminantes que superaron los límites establecidos en las NOM de salud ambiental durante ese mismo año.

7 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).
8 También conocida como regresión local *(Locally Estimated Scatterplot Smoothing).*

3.4.1 Dióxido de azufre

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

En 2018 se mantuvo el cumplimiento de los tres límites establecidos en la NOM-022-SSA1-2010 para la concentración de SO_2 en todas las estaciones de monitoreo de la RAMA (ver Tabla 3.7). Se resalta que los niveles de concentración de SO_2 en la atmósfera cumplen con la NOM desde el año 2003 (SEDEMA, 2012); esto se asocia al cambio de combustibles con bajo contenido de azufre (Centro Mario Molina, 2013). Por ejemplo, en la ZMVM, PEMEX suministra únicamente gasolina con bajo contenido de azufre (30 mg/kg), mientras que el diésel automotriz suministrado se denomina de "ultra bajo azufre" y contiene como máximo 15 mg/kg. No obstante el cumplimiento de la normatividad, se superaron los niveles recomendados por las GCA de la OMS para el promedio de 24 horas, con máximos por encima del umbral de 20 µg/m³ (10 ppb a 17°C y 585 mmHg) en todas las estaciones; también se rebasó el estándar de la US EPA.

Tabla 3.7 Comparación de los máximos de dióxido de azufre con respecto a los valores límite de la NOM-022-SSA1-2010, la guía de la OMS y el estándar de la US EPA

	Límite NOM			GCA OMS	US EPA
	Segundo máximo 8 h 200 ppb	**Máximo (promedio 24 h) 110 ppb**	**Promedio anual máximo 25 ppb**	**Máximo (promedio 24 h) 20 µg/m³ ***	**Promedio trianual del Percentil 99 (máximos 1 h) 75 ppb**
Ciudad de México	67 ppb (HGM)	42 ppb (MER)	6 ppb (MER)	87 µg/m³ (MER)	109 ppb (MER)
Área conurbada	125 ppb (CUT)	72 ppb (VIF)	8 ppb (TLA, TLI)	149 µg/m³ (VIF)	169 ppb (CUT)
ZMVM	125 ppb (CUT)	72 ppb (VIF)	8 ppb (TLA, TLI)	149 µg/m³ (VIF)	169 ppb (CUT)

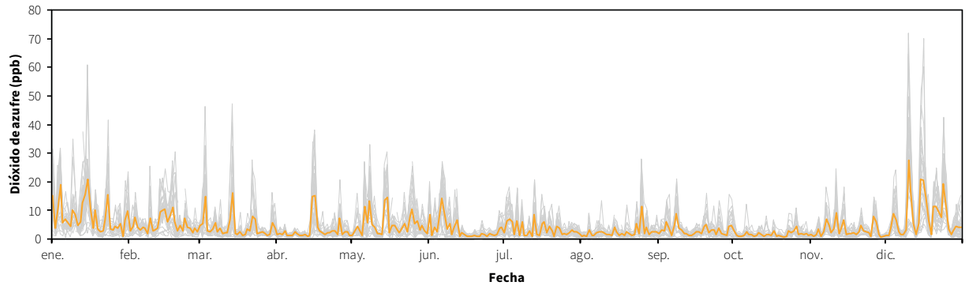
* Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en µg/m³ a 17°C y 585 mmHg (condiciones locales de la ZMVM) para hacer la comparación.
Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos.

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

A título ilustrativo, si se evalúan los resultados del año 2018 contra la NOM-022-SSA1-2019, la ZMVM no cumple con los límites establecidos. El límite actualizado del promedio de 24 horas (40 ppb) se superó en ambas entidades. Asimismo, el nuevo límite de exposición aguda, a partir de los máximos diarios de la concentración horaria, es igual al estándar de la US EPA y, como se observa en la Tabla 3.7, también se rebasó en la ZMVM.

Distribución temporal y espacial de la concentración

En la Figura 3.2 se muestra la serie de tiempo de los promedios diarios de SO_2. Como en años anteriores, en 2018 la variabilidad diaria se caracterizó por la presencia de picos de concentración a lo largo del año, pero con una mayor frecuencia durante los meses de la temporada seca-fría (noviembre a febrero). En esta época del año se presentan condiciones meteorológicas que favorecen el estancamiento de los contaminantes atmosféricos. Por el contrario, en la época de lluvias disminuye el número de picos de concentración; no obstante, la transformación de SO_2 a H_2SO_4 y la subsecuente deposición como lluvia ácida produce efectos negativos sobre la vegetación, el suelo, los cuerpos de agua y la infraestructura urbana.



Notas: La línea gruesa de color amarillo representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo.

Figura 3.2 Serie de tiempo de los promedios diarios de dióxido de azufre en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

El promedio anual de la concentración del contaminante fue de 4.3 ppb, menor que el de los dos años anteriores; en 2017 fue de 4.7 ppb y en 2016 de 4.6 ppb. En el análisis por entidad, el promedio en el área conurbada del Estado de México fue de 4.6 ppb, en tanto que en la Ciudad de México fue de 3.9 ppb. Para las estaciones ubicadas en el área conurbada del Estado de México, los promedios anuales por estación se vieron influenciados por valores extremos derivados en su mayoría por las contribuciones regionales originadas en el corredor industrial de Tula-Tepeji, localizado a aproximadamente 60 km al noroeste de la Ciudad de México.

Las estaciones que registraron el mayor promedio anual fueron Tlalnepantla (TLA) y Tultitlán (TLI) con 8.1 ppb. Los valores más altos de concentración se observan al noroeste de la zona metropolitana; las estaciones de Atizapán (ATI), Cuautitlán (CUT) y Villa de las Flores (VIF) registraron promedios por encima de 6.0 ppb (ver Figura 3.3). En esta región se han llegado a registrar eventos de valores horarios mayores a 200 ppb, llamados "incrementos extraordinarios"; por ejemplo, el máximo horario registrado en 2018 fue de 354 ppb, el 15 de enero a las 22:00 horas, en la estación Cuautitlán (CUT).

Los valores horarios máximos del contaminante se registran con regularidad durante el periodo nocturno, en la época seca-fría, cuando incrementa la frecuencia de inversiones térmicas y la permanencia de la capa límite[9] con altura baja hasta el mediodía, aunado a vientos dominantes provenientes del norte que favorecen el transporte desde la región de Tula hasta la ZMVM. En la Ciudad de México, las estaciones ubicadas en la región centro registran los valores más altos: Merced (MER), Hospital General de México (HGM) y Benito Juárez (BJU) presentaron promedios anuales en un rango de 4.9 a 5.7 ppb. En contraste, las estaciones que se ubican al sur de la zona metropolitana presentan los valores mínimos, asociados a emisiones locales vehiculares.

9 Capa límite o capa límite planetaria: porción de la atmósfera donde predomina la mezcla turbulenta del aire y se mezclan los contaminantes, generada por el roce permanente con la superficie rugosa del suelo y por la elevación convectiva de burbujas de aire al calentarse.

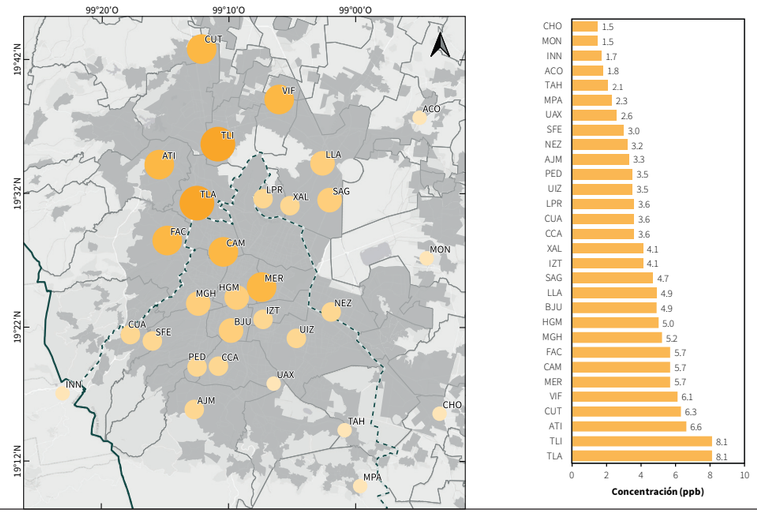
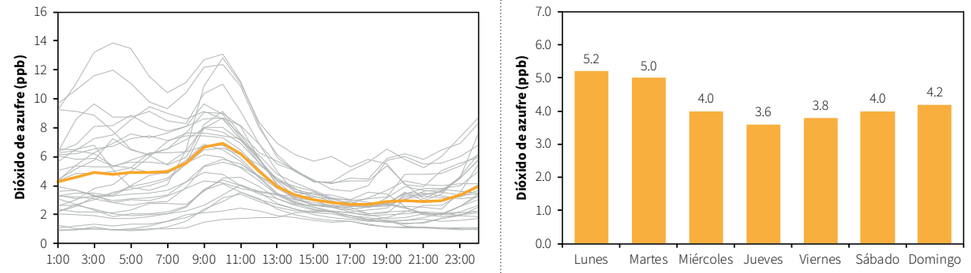


Figura 3.3 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de dióxido de azufre en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

El perfil horario (Figura 3.4) muestra un comportamiento unimodal con un incremento sustancial a partir de las 8:00 horas, con un máximo alrededor de las 10:00. El comportamiento por hora del día varía en cada estación; como se expuso anteriormente, las estaciones localizadas en al norte presentan los máximos de concentración durante la noche y madrugada, mientras que las estaciones que reciben el impacto de fuentes vehiculares muestran incrementos de concentración a partir de las 5:00 horas y alcanzan valores máximos cuando se registra mayor tránsito (alrededor de las 8:00) y, por ende, un mayor volumen de emisiones vehiculares.

Al analizar el comportamiento por día de la semana, en 2018 los promedios máximos se registraron el lunes y martes con 5.2 y 5.0 ppb, a diferencia del comportamiento en 2017 cuando los promedios máximos se observaron en sábado y domingo, con 5.2 y 5.4 ppb, respectivamente. El contaminante no tiene un patrón definido en cuanto al comportamiento por día de la semana; entre 2010 a 2018, todos los años presentaron diferentes patrones que se ven influenciados por los eventos extraordinarios (>200 ppb) registrados por día de la semana (ver Figura 3.4).



Comportamiento horario, la línea gruesa de color amarillo representa el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en cada estación de monitoreo.

Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo.

Figura 3.4 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de dióxido de azufre en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

3.4.2 Óxidos de nitrógeno

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

Para fines de la evaluación de la normatividad, únicamente se establecen límites para el NO_2 y no para NO ni la concentración total de NO_X. Durante 2018, la concentración de NO_2 fue inferior al valor límite descrito en la NOM-023-SSA1-1993 para todas las estaciones de la red. La concentración máxima horaria, 141 ppb, se registró en la estación Tlalnepantla (TLA) en el Estado de México, mientras que el máximo en la Ciudad de México fue de 131 ppb, en la estación Cuajimalpa (CUA).

La Tabla 3.8 presenta la comparación de los valores máximos con los límites de la NOM, las GCA de la OMS y los estándares de la US EPA. La estación Tlalnepantla (TLA) fue la única en toda la ZMVM donde se superó el nivel recomendado por la OMS para el máximo horario, igual a 200 µg/m³ (equivalente a 134 ppb, a condiciones locales). Si bien la NOM-023-SSA1-1993 no establece un límite para el promedio anual, la OMS sí define una guía para este indicador, y este fue excedido en estaciones ubicadas en ambas entidades; en específico, se superó en cuatro estaciones de la Ciudad de México (MER, CAM, HGM y MGH) y en dos del área conurbada (TLA y XAL).

Tabla 3.8 Comparación de los máximos de dióxido de nitrógeno con respecto a los valores límite de la NOM-023-SSA1-1993, las guías de la OMS y los estándares de la US EPA

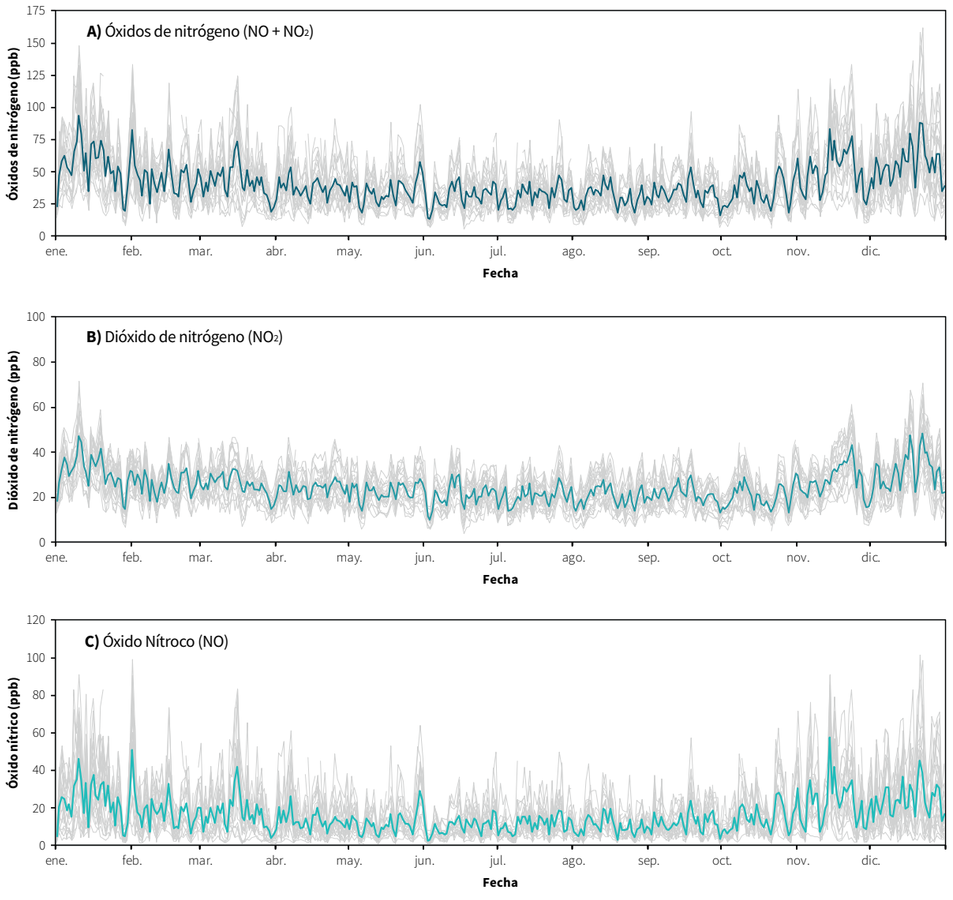
	Límite NOM		GCA OMS		US EPA	
	Máximo 1 h 210 ppb	**Excedencias al máximo de 1 h**	**Máximo 1 h 200 µg/m³ ***	**Promedio anual 40 µg/m³ ***	**Percentil 98 del promedio de 1 h, evaluado en 3 años 100 ppb**	**Promedio anual 53 ppb**
Ciudad de México	131 ppb (CUA)	0 h	195 µg/m³ (CUA)	51 µg/m³ (MER)	106 ppb (MGH)	34 ppb (MER)
Área conurbada	141 ppb (TLA)	0 h	210 µg/m³ (TLA)	48 µg/m³ (TLA)	99 ppb (TLA)	32 ppb (TLA)
ZMVM	141 ppb (TLA)	0 h	210 µg/m³ (TLA)	51 µg/m³ (MER)	106 ppb (MGH)	34 ppb (MER)

* Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en µg/m³ a 17°C y 585 mmHg para hacer la comparación.
Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos.

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Distribución temporal y espacial de la concentración

El análisis de la distribución temporal y espacial de los óxidos de nitrógeno considera al NO y NO_2, así como a la suma de sus respectivos valores de concentración (NO_X). Se observa una estacionalidad marcada, con máximos en la temporada seca-fría ocasionados por condiciones de estabilidad atmosférica y el estancamiento de los contaminantes, lo cual es provocado por un incremento en la intensidad y frecuencia de las inversiones térmicas; en la Figura 3.5 se muestran las series de tiempo de los promedios diarios para los tres contaminantes. Durante los meses de la temporada de lluvia (mayo a octubre) los promedios diarios disminuyen considerablemente y los picos de concentración son menos pronunciados, aunque este fenómeno tiene consecuencias negativas por la deposición húmeda derivada de la formación de HNO_3.



Nota: Las líneas gruesas de color azul representan el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo.

Figura 3.5 Serie de tiempo de los promedios diarios de óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y óxido nítrico en 2018

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Los promedios anuales de la concentración horaria de NO, NO_2 y NO_X para la zona metropolitana fueron de 16, 25 y 41 ppb. En comparación, en 2017 las concentraciones registradas fueron ligeramente mayores: 16, 25 y 42 ppb, respectivamente. La concentración máxima horaria de NO_X en la ZMVM fue de 558 ppb, observada en la estación Xalostoc (XAL) el 1º de febrero. Para NO_2, el máximo horario fue de 141 ppb el 17 de diciembre en la estación Tlalnepantla (TLA), en tanto que para NO fue de 508 ppb también el 1º de febrero en la estación Xalostoc (XAL). Se observa que los máximos horarios coinciden con condiciones de estabilidad, que favorecen la acumulación de contaminantes durante la época seca-fría, al igual que ocurre con los promedios diarios. Es importante destacar que ambas estaciones (XAL y TLA) se ubican en los municipios conurbados del Estado de México y reciben influencia de vías con alto flujo vehicular.

La fuente más importante de los NO_X son los motores de combustión interna. Por esta razón, las estaciones que reciben el impacto del tránsito vehicular son las que registran las mayores concentraciones. Esto es evidente al comparar los promedios anuales de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estaciones que presentan la mayor concentración de NO_X y NO son: Xalostoc (XAL) y Tlalnepantla (TLA) en el Estado de México, y Merced (MER), Camarones (CAM) y Miguel Hidalgo (MGH) en la Ciudad de México.

Para NO_2, además de las estaciones antes mencionadas, se destaca el promedio anual en la estación Hospital General de México (HGM). El NO_2 es predominantemente secundario, por lo que los valores de concentración más elevados en la región centro de la Ciudad de México son resultado de las emisiones de transporte provenientes desde el norte y el oriente, así como las generadas localmente. La distribución espacial de los promedios de las emisiones de NO_X, NO_2 y NO se representa en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8, respectivamente.

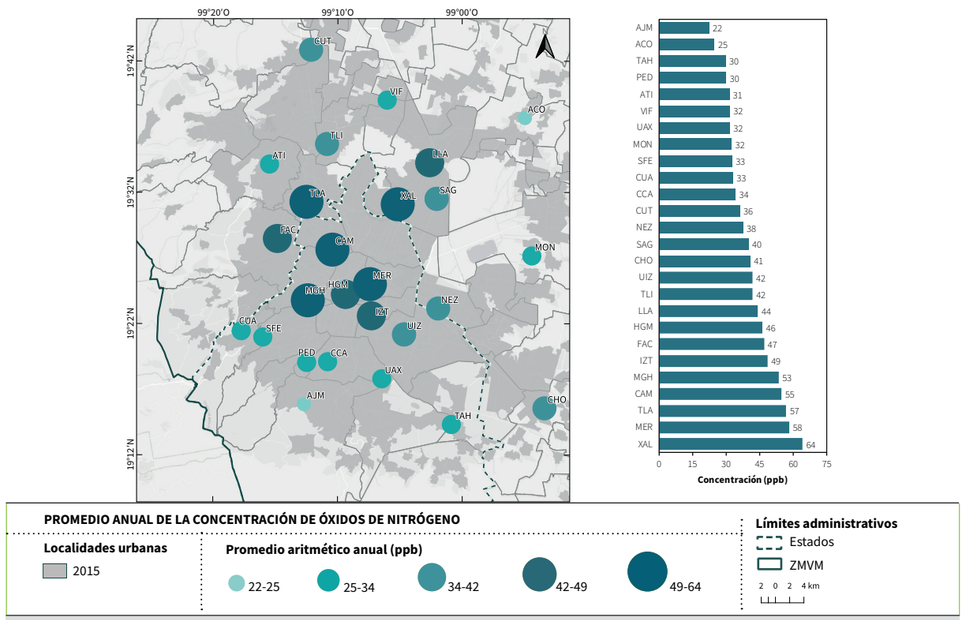


Figura 3.6 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de óxidos de nitrógeno en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

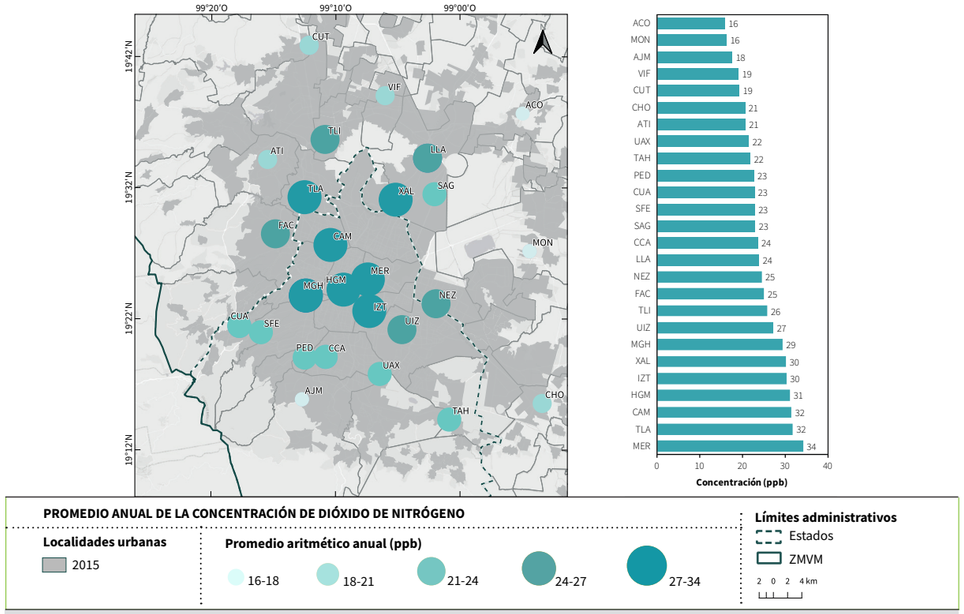


Figura 3.7 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de dióxido de nitrógeno en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

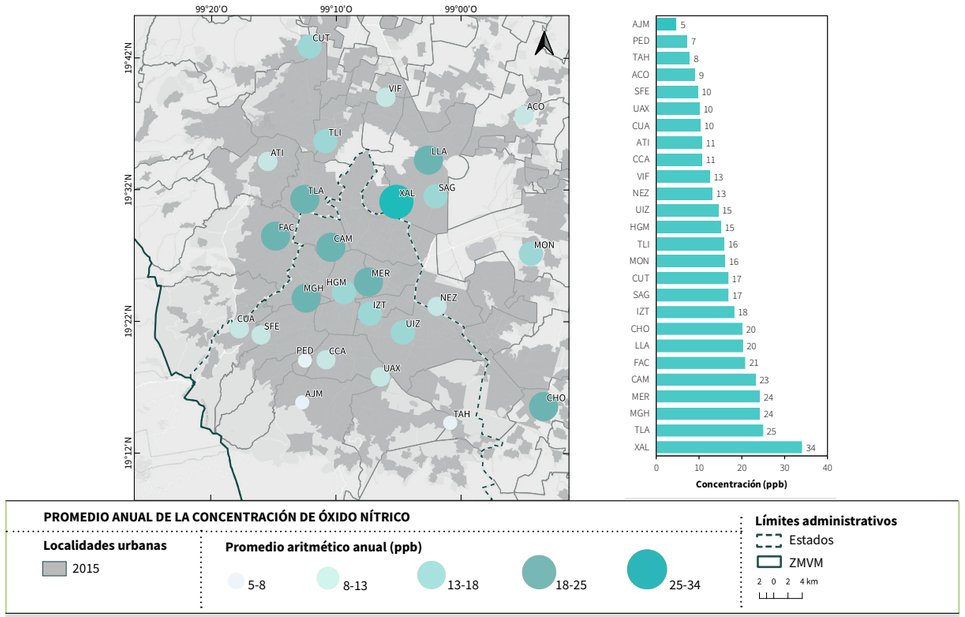
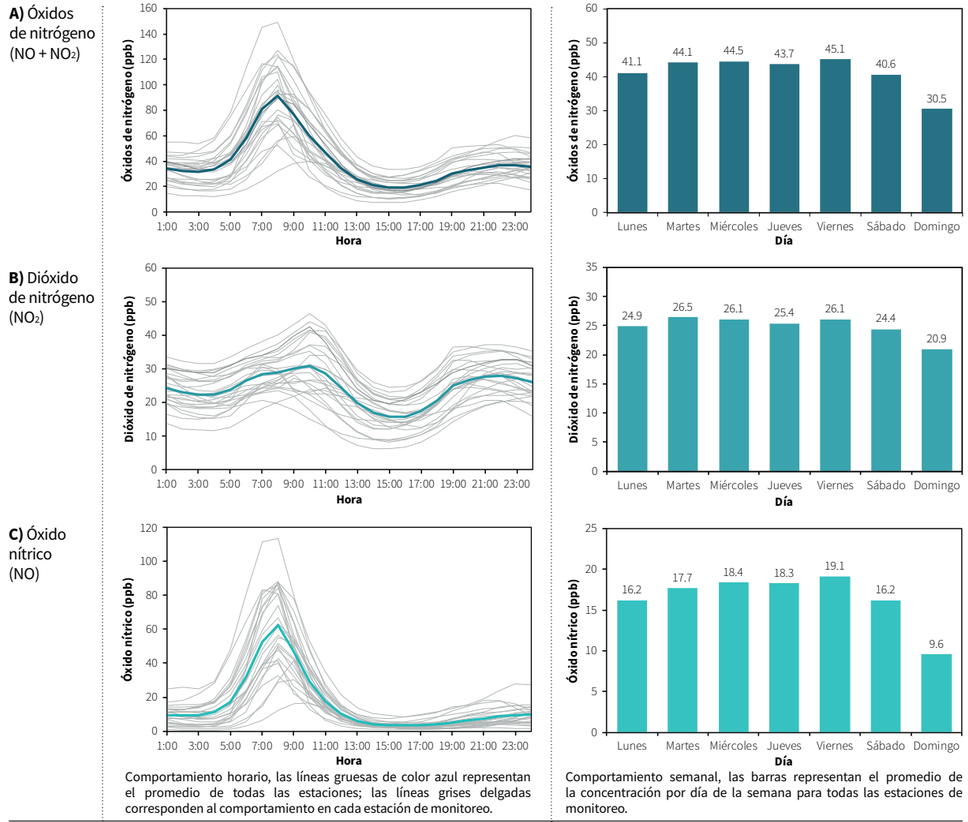


Figura 3.8 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de óxido nítrico en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

El perfil horario y semanal de los NO_X, el NO_2 y el NO se muestra en la Figura 3.9. Cuando se analiza el comportamiento diurno de los óxidos de nitrógeno, se observan variaciones entre el comportamiento de los tres contaminantes monitoreados. El NO, un compuesto predominantemente primario, muestra un pico de concentración muy pronunciado a las 8:00 horas, el cual se relaciona con el aumento de la actividad vehicular con fines de estudio y trabajo. El NO_2 se produce a partir de la oxidación fotoquímica del NO, por lo que el pico de concentración se registra unas cuantas horas después, a las 10:00 horas. A medida que progresa el día, el NO_2 participa en reacciones fotoquímicas donde se transforma principalmente en HNO_3, por lo que la concentración disminuye. Un segundo pico en la concentración de NO_2 aparece entre las 20:00 y las 22:00 horas debido a una disminución de la altura de la capa límite, lo que ocasiona una compresión de la atmósfera y un menor volumen para la dilución; estas condiciones se combinan con emisiones durante el segundo pico más importante de actividad vehicular, después de las 18:00 horas. Estas variaciones diurnas determinan el comportamiento del perfil horario de los NO_X: en las mañanas, la relación NO_2/NO_X es menor, con valores de aproximadamente 30% entre las 7:00 y 8:00, y valores máximos de 80% en torno a las 19:00 horas. En promedio, la relación NO_2/NO_X tiene valores de 60%, con una mayor proporción en sitios de monitoreo donde la contaminación por NO_X es predominantemente secundaria, como al sur de la Ciudad de México, o menor en sitios donde hay un impacto de las emisiones vehiculares.



Comportamiento horario, las líneas gruesas de color azul representan el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en cada estación de monitoreo.

Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo.

Figura 3.9 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y óxido nítrico en 2018

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

La variación semanal se caracteriza por niveles de contaminación más altos durante los días laborales (lunes a viernes). Se observa un pico de concentración los días viernes para el NO y los NO_X, y en martes para el NO_2. Estos cambios están relacionados directamente con las características del tránsito vehicular en los diferentes días de la semana, en donde el viernes generalmente experimenta un incremento en la tarde y noche. No obstante, las variaciones entre semana son pequeñas en comparación con la disminución de la concentración en sábado y domingo, ligada a la reducción del tránsito vehicular durante el fin de semana. Históricamente, el domingo es el día que muestra la menor concentración de NO_X.

3.4.3 Monóxido de carbono

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

En 2018 no se registraron valores superiores al límite establecido por la NOM-021-SSA1-1993 para el promedio móvil de 8 horas de CO. En 2018, el máximo de este indicador, 3.2 ppm, se registró en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), mientras que el máximo horario, 5.4 ppm, ocurrió en la estación Xalostoc (XAL). Se destaca que, desde el 2001, el CO no supera el valor límite de la norma; esto se asocia a la mejora tecnológica de los vehículos y la renovación de la flota vehicular (Centro Mario Molina, 2013). La concentración de CO en 2018 tampoco rebasó las GCA establecidas por la OMS ni los estándares de la US EPA (ver Tabla 3.9).

Tabla 3.9 Comparación de los máximos de monóxido de carbono con respecto a los valores límite de la NOM-021-SSA1-1993, las guías de la OMS y los estándares de la US EPA

	Límite NOM	GCA OMS		US EPA	
	Máximo 8 h 11.0 ppm	**Máximo 1 h 30 000 µg/m³ ***	**Máximo 8 h 10 000 µg/m³ ***	**Máximo 1 h 35.0 ppm**	**Máximo 8 h 9.0 ppm**
Ciudad de México	2.3 ppm (IZT)	4076 µg/m³ (UIZ)	2083 µg/m³ (IZT)	4.5 ppm (UIZ)	2.3 ppm (IZT)
Área conurbada	3.2 ppm (NEZ)	4892 µg/m³ (XAL)	2899 µg/m³ (NEZ)	5.4 ppm (XAL)	3.2 ppm (NEZ)
ZMVM	3.2 ppm (NEZ)	4892 µg/m³ (XAL)	2899 µg/m³ (NEZ)	5.4 ppm (XAL)	3.2 ppm (NEZ)

* Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en µg/m³ a 17°C y 585 mmHg para hacer la comparación.
Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo.

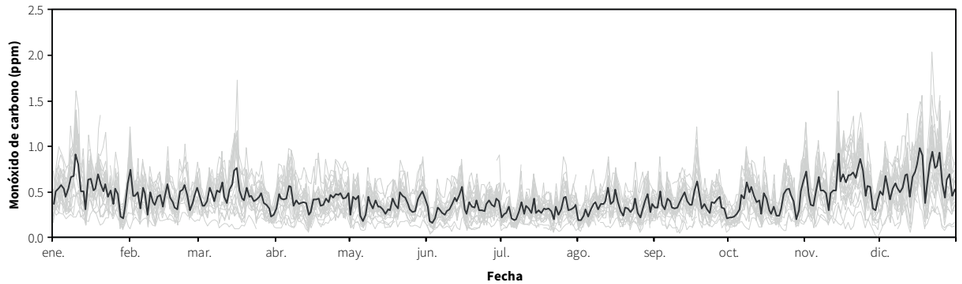
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Distribución temporal y espacial de la concentración

La fuente más importante de este compuesto es la quema de combustibles fósiles en los automóviles. Por lo tanto, se considera como un indicador de emisiones vehiculares. Debido a que el comportamiento del tránsito vehicular es similar durante la mayor parte del año, con excepción de los periodos vacacionales y días festivos, en los cuales disminuye el tránsito vehicular, la variabilidad diaria depende fuertemente de la meteorología local. Esto explica el marcado comportamiento estacional de la concentración diaria de CO, representado en la serie anual de los promedios diarios (Figura 3.10).

En 2018, los valores máximos del contaminante se presentaron durante los meses de invierno, cuando son más frecuentes los días con estabilidad atmosférica y condiciones desfavorables para la dispersión de contaminantes. Los valores mínimos se observaron durante los meses de la temporada de lluvia, con condiciones que propician la dispersión y remoción de la contaminación.

Las estaciones de la RAMA ubicadas en zonas con una mayor densidad de tránsito vehicular son las que generalmente reportan los niveles más altos. El promedio anual del contaminante, tomando en cuenta todas las estaciones, fue de 0.4 ppm. En la Figura 3.11 se muestra la distribución espacial de los promedios anuales en las estaciones de la RAMA que miden este contaminante.



Nota: La línea gruesa de color gris representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo.

Figura 3.10 Serie de tiempo de los promedios diarios de monóxido de carbono en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

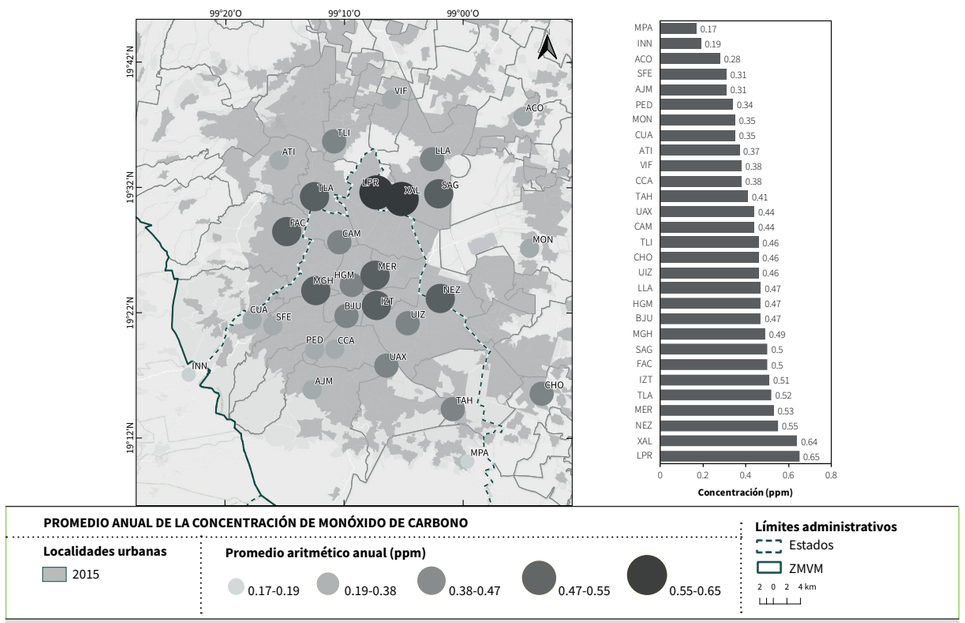
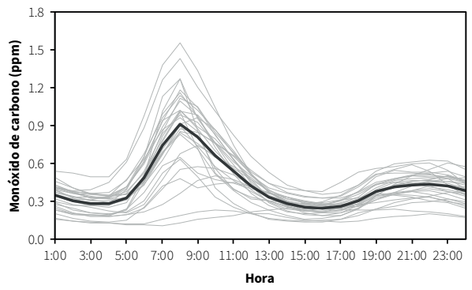


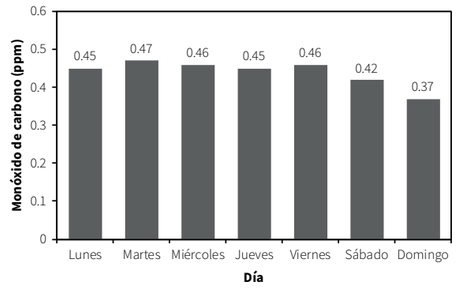
Figura 3.11 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de monóxido de carbono en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

La Figura 3.12 muestra la distribución horaria y por día de la semana de la concentración de CO. En el perfil horario se observa un pico muy pronunciado por la mañana, entre las 7:00 y 9:00 horas, y otro menor por la noche, entre las 20:00 y 22:00 horas. Al igual que los NO_x, el perfil horario está determinado por el nivel de emisiones durante el día y la altura de la capa límite. El pico matutino se relaciona con la intensidad del tránsito vehicular y la baja altura de la capa límite; conforme aumenta la temperatura de la atmósfera a lo largo del día, la altura de la capa límite se eleva y los contaminantes se dispersan y diluyen, por lo que disminuye la concentración. Las estaciones de monitoreo ubicadas en la parte central de la ZMVM, como Hospital General de México (HGM) o Benito Juárez (BJU), generalmente reportan el pico máximo una hora después que las estaciones de la periferia. Las estaciones ubicadas viento abajo de la zona urbana, al suroeste de la ZMVM, tales como el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) o Pedregal (PED), reportan su máximo de concentración hasta dos horas más tarde y con menor magnitud. Finalmente, otras estaciones como el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) o Milpa Alta (MPA), que se encuentran en zonas semi-rurales, presentan un perfil diferente, más alargado que el de las otras estaciones; el comportamiento de estos sitios de monitoreo corresponde a las dos líneas sin un pico matutino definido.

En cuanto al comportamiento por día de la semana, es claro cómo disminuyen los niveles de contaminación durante el fin de semana, y el domingo es el día con menor contaminación. Se destaca que la diferencia entre los promedios de los días laborales no es significativa. Este comportamiento se explica por la disminución de la actividad vehicular durante el fin de semana.



Comportamiento horario, la línea gruesa de color gris oscuro representa el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en cada estación de monitoreo.



Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo.

Figura 3.12 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de monóxido de carbono en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

3.4.4 Ozono

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

El ozono (O_3) es uno de los contaminantes que supera continuamente los límites normados tanto en la Ciudad de México como en su zona metropolitana. En 2018, ninguna de las estaciones del SIMAT cumplió con la norma de salud ambiental para O_3, la NOM-020-SSA1-2014 (ver Tabla 3.10). En total, el límite horario (95 ppb) se superó en 744 horas; el máximo horario, 179 ppb, se registró en la estación Hospital General de México (HGM) el día 4 de mayo, durante la temporada de ozono[10] (15 de febrero al 15 de junio). Para el promedio móvil de 8 horas, todas las estaciones superaron el límite permisible de 70 ppb, con un total de 220 días del año durante los cuales al menos una estación de la RAMA superó el valor normado; el máximo de este indicador fue 120 ppb en la estación Pedregal (PED) el día 23 de noviembre. Las estaciones de la ZMVM tampoco cumplieron con la GCA de la OMS ni con los estándares de la US EPA para la concentración de O_3.

Tabla 3.10 Comparación de los máximos de ozono con respecto a los valores límite de la NOM-020-SSA1-2014, la guía de la OMS y el estándar de la US EPA

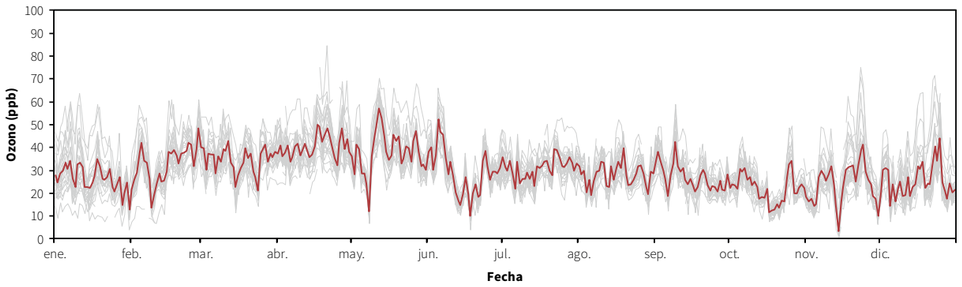
	Límite NOM			GCA OMS	US EPA
	Máximo 1 h 95 ppb	**Excedencias al máximo de 1 h**	**Máximo 8 h 70 ppb**	**Máximo 8 h 100 µg/m³ ***	**4º máximo anual del promedio de 8 h, evaluado en 3 años 75 ppb**
Ciudad de México	179 ppb (HGM)	653 h	120 ppb (PED)	186 µg/m³ (PED)	119 ppb (PED)
Área conurbada	149 ppb (FAC)	414 h	117 ppb (TLI)	182 µg/m³ (TLI)	105 ppb (FAC)
ZMVM	179 ppb (HGM)	744 h	120 ppb (PED)	186 µg/m³ (PED)	119 ppb (PED)

* Los resultados del monitoreo se expresan en ppb. Se calculó la concentración equivalente en µg/m³ a 17°C y 585 mmHg para hacer la comparación.
Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos.

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Distribución temporal y espacial de las concentraciones

El promedio anual de la concentración de O_3 en todos los sitios de monitoreo fue de 30 ppb, mientras que el promedio anual de los máximos diarios de las concentraciones horarias fue de 100 ppb. Es importante enfatizar que las condiciones meteorológicas que se presentan durante el año tienen una influencia significativa en la concentración de O_3.



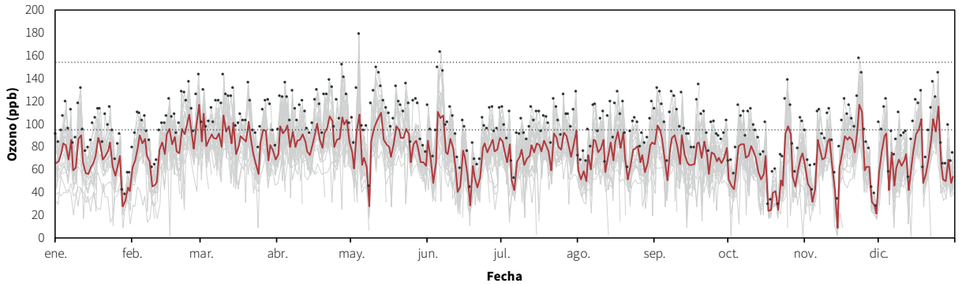
Nota: La línea gruesa de color rojo representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo.

Figura 3.13 Serie de tiempo de los promedios diarios de ozono en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

10 El Informe Anual de Calidad del Aire 2015 de la SEDEMA analiza el porcentaje de diferencia entre el promedio diario de O_3 respecto del promedio anual desde el año 2000 y hasta el 2015. El resultado de este análisis permitió definir la duración de la temporada de O_3 en la ZMVM (SEDEMA, 2016).

La serie de tiempo del promedio diario por estación (Figura 3.13) muestra el incremento de la concentración en la temporada de O_3. Esta época se caracteriza por intensa radiación solar, temperaturas elevadas y sistemas meteorológicos anticiclónicos que ocasionan estabilidad atmosférica, vientos débiles y, en consecuencia, la acumulación de los compuestos precursores (NO_X y COV), por lo que se favorecen las reacciones de formación de O_3. Se aprecia que, a partir de junio, la concentración disminuye; en esta época del año hay más nubosidad y menos radiación solar, a la vez que se reducen las concentraciones de precursores como los NO_X por efecto de la lluvia típica de la temporada.

La serie de tiempo de los valores máximos diarios del promedio horario (Figura 3.14) muestra una oscilación de las concentraciones entre 28 y 179 ppb. Al igual que el comportamiento del promedio diario, se observa un marcado aumento de la concentración máxima en la temporada de ozono. En 2018 únicamente se presentaron tres episodios de concentración horaria superior a 154 ppb, el límite para la activación de la Fase I de Contingencia; dos de estos dentro de la temporada de ozono (4 de mayo y 6 de junio) y el tercero el 23 de noviembre. Sin embargo, solamente el 6 de junio se activó el Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) debido a la persistencia de condiciones meteorológicas adversas que favorecieron la acumulación de los precursores durante la mañana y poca dispersión del contaminante durante la tarde. En la temporada seca-fría (noviembre a febrero), el 23 de noviembre se alcanzó una concentración de 157 ppb; lo anterior se debió a un sistema anticiclónico que generó alta estabilidad atmosférica, lo que dificultó la dispersión del contaminante y propició su acumulación en la atmósfera por algunos días. Esto sucede ocasionalmente en esta época del año, debido a etapas de transición entre sistemas y temporadas meteorológicas.



Nota: La línea gruesa de color rojo representa el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de cada una de las estaciones de monitoreo; las líneas punteadas marcan el límite de la NOM para la concentración horaria (95 ppb) y el valor de activación de las contingencias atmosféricas ambientales por ozono (155 ppb); finalmente, los puntos corresponden a los máximos diarios independientemente de la estación en que se registró.

Figura 3.14 Serie de tiempo de los máximos diarios de ozono en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Debido a las características fisiográficas y meteorológicas de la cuenca, el centro y sur de la Ciudad de México son las regiones más afectadas por el contaminante. La distribución espacial del número de horas con valores superiores a 95 ppb, límite del indicador de una hora, muestra que las estaciones del centro y suroeste de la zona metropolitana tienen el mayor número de excedencias registradas; la estación Pedregal (PED) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) presentaron más de 300 horas con valores superiores a la NOM (ver Figura 3.15). De las 17 estaciones de la Ciudad de México que midieron O_3, 13 (76% del total) registraron más de 100 horas con concentraciones por encima de 95 ppb; en el Estado de México, 3 de las 15 estaciones (20%) superaron el límite horario en más de 100 ocasiones. Las estaciones que registraron menos horas por encima del límite fueron Acolman (ACO) y Xalostoc (XAL) al norte, y Chalco (CHO) al sureste, en el Estado de México, y UAM Iztapalapa (UIZ) en la Ciudad de México. No obstante, todas las estaciones de la RAMA superaron el valor de la NOM.

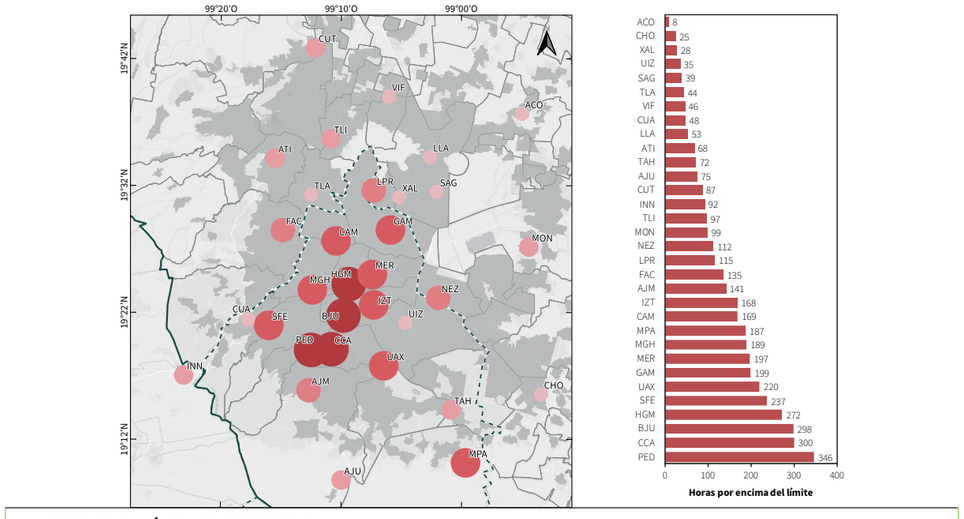
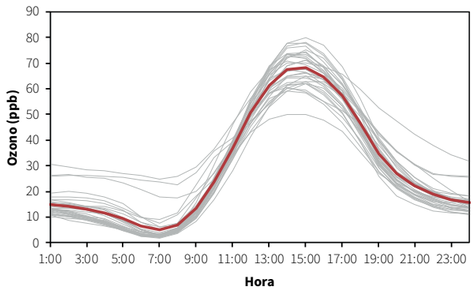


Figura 3.15 Excedencias al límite horario de ozono (2018) en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

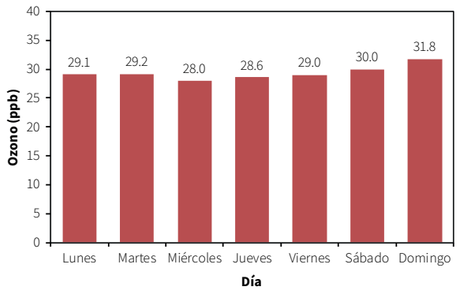
El O_3 es un contaminante secundario, por lo que su formación depende de la abundancia de sus precursores (NO_X y COV) y la radiación solar. La variabilidad diurna (ver Figura 3.16) muestra un incremento en los niveles de contaminación que inicia a las 9:00 horas, cuando comienzan las reacciones fotoquímicas, y que continúa hasta alcanzar los máximos niveles entre las 14:00 y 16:00 horas, periodo en el que se registra la mayor actividad fotoquímica. Por la tarde comienza el decremento de la concentración, que se relaciona con el descenso del sol y aumento de la velocidad del viento. Durante la noche y madrugada se ha observado que, en las estaciones ubicadas a mayor altitud de la ZMVM, las concentraciones nocturnas oscilan entre 20 y 35 ppb, y en ocasiones pueden superar el límite del promedio móvil de 8 horas (SEDEMA, 2017). En estas zonas puede haber un mayor aporte de fuentes naturales (asociado a una mayor área con vegetación forestal); la concentración también puede estar influenciada por el O_3 residual diurno que queda estancado en las capas de la atmósfera y la concentración natural de fondo. La concentración mínima de O_3 se observa a las 7:00 horas, debido a la titulación del ozono residual por las emisiones frescas de NO_X.

La distribución por día de la semana (ver Figura 3.16) muestra mayores concentraciones el fin de semana, en comparación con los días laborales. Entre los días de la semana se muestra poca variación, con un promedio de 29 ppb de lunes a viernes; el sábado el promedio aumenta en 1 ppb de concentración (30 ppb) con respecto a los días laborales y el domingo se registró el mayor promedio, con 32 ppb. Tanto la concentración promedio, como los niveles máximos horarios, son mayores en sábado y domingo en comparación con el res-

to de la semana, con diferencias estadísticamente significativas. Este fenómeno se ha observado en otras ciudades con problemas de contaminación por O_3, donde el régimen de producción es sensible a COV; este fenómeno se conoce como efecto de fin de semana (Stephens *et al*., 2008). El impacto se observa claramente en las estaciones que se encuentran dentro del área urbana y, por el contrario, en las estaciones ubicadas en la periferia el efecto es menor o está ausente, con diferencias que no son estadísticamente significativas para los diferentes días de la semana. Se destaca que la variación semanal en las estaciones urbanas fue inversa a la que se observó para los contaminantes primarios, en donde las concentraciones son menores durante los fines de semana.



Comportamiento horario, la línea gruesa de color rojo representa el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en cada estación de monitoreo.



Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo.

Figura 3.16 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de ozono en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

3.4.5 Partículas suspendidas

Cumplimiento de la NOM de salud ambiental

La REDMA hace muestreo de PST, PM_{10} y $PM_{2.5}$ cada seis días, a través de equipo de operación manual o semiautomático; la información obtenida con esta red se utiliza para el control de calidad de los equipos continuos de la RAMA, para evaluar el cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 y para determinar la composición de las partículas suspendidas. La cobertura de la REDMA se limita a sitios dentro de la Ciudad de México y estaciones en algunos municipios conurbados del Estado de México.

En cuanto al cumplimiento de la NOM, la evaluación muestra que tanto las partículas PM_{10} como las $PM_{2.5}$ todavía son una problemática en la ZMVM y, junto con el O_3, son la principal causa de la mala calidad del aire en la región. En el caso de PM_{10}, los valores para el promedio de 24 horas y el promedio anual superaron los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014 en 2018 (ver Tabla 3.11). El máximo del promedio de 24 horas con el método de referencia (monitoreo manual) fue de 182 µg/m³, valor registrado al norte de la ZMVM en la estación Xalostoc (XAL), en el Estado de México; solamente dos estaciones, Pedregal (PED) y Lomas (LOM), en la Ciudad de México, presentaron valores por debajo del límite normado, con 62 y 69 µg/m³. Para el valor del promedio anual, el máximo también se registró en la estación XAL y corresponde a 71 µg/m³. En la Ciudad de México el promedio anual superó el límite solamente en dos estaciones (MER y UIZ), mientras que en el Estado de México todas las estaciones superaron el umbral normado.

En el caso de las partículas $PM_{2.5}$ se observa una situación similar ya que en ninguna estación se cumple con la NOM-025-SSA1-2014 (ver valores máximos en la Tabla 3.12). En cuanto al límite para el promedio de 24 horas, este se superó en la mayoría de las estaciones, excepto en Pedregal (PED) y San Agustín (SAG), las cuales presentaron los valores mínimos con 44 y 43 µg/m³, respectivamente; el valor máximo del indicador de 24 horas fue de 70 µg/m³ en la estación Xalostoc (XAL). El límite permisible para el promedio anual se superó en todas las estaciones, con un valor máximo en la estación XAL en el Estado de México, igual a 27.7 µg/m³. A diferencia de las PM_{10}, se registró una menor variabilidad entre las concentraciones reportadas en las estaciones que midieron este contaminante; esto se debe a una menor influencia de fuentes primarias, dado que una fracción importante de las $PM_{2.5}$ es de origen secundario.

La comparación de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con los límites de la NOM de salud ambiental, las GCA de la OMS y los estándares de la US EPA se resume en la Tabla 3.11 y la Tabla 3.12, respectivamente. Se puede observar que en la ZMVM tampoco se cumplió con las GCA de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ para el promedio de 24 horas y el promedio anual recomendadas por la OMS. Se destaca que para PM_{10} no se superó el estándar de la US EPA, aunque para $PM_{2.5}$ este no es el caso.

Tabla 3.11 Comparación de los máximos de partículas PM_{10} con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, las guías de la OMS y el estándar de la US EPA

	Límite NOM		GCA OMS		US EPA
	Máximo 24 h 75 µg/m³	**Promedio anual 40 µg/m³**	**Percentil 99 24 h 50 µg/m³**	**Promedio anual 20 µg/m³**	**Promedio trianual del 2º máximo 24 h 150 µg/m³**
Ciudad de México	103 µg/m³ (MER)	48 µg/m³ (MER)	103 µg/m³ (MER)	48 µg/m³ (MER)	91 µg/m³ (MER)
Área conurbada	182 µg/m³ (XAL)	70 µg/m³ (XAL)	182 µg/m³ (XAL)	70 µg/m³ (XAL)	133 µg/m³ (XAL)
ZMVM	182 µg/m³ (XAL)	70 µg/m³ (XAL)	182 µg/m³ (XAL)	70 µg/m³ (XAL)	133 µg/m³ (XAL)

Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos.

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Tabla 3.12 Comparación de las máximos de partículas $PM_{2.5}$ con respecto a los valores límite de la NOM-025-SSA1-2014, las guías de la OMS y el estándar de la US EPA

	Límite NOM		GCA OMS		US EPA	
	Máximo 24 h 45 µg/m³	**Promedio anual 12 µg/m³**	**Máximo 24 h (percentil 99) 25 µg/m³**	**Promedio anual 10 µg/m³**	**Promedio trianual del 2º máximo (24 h) 35 µg/m³**	**Promedio trianual 12 µg/m³**
Ciudad de México	58 µg/m³ (UIZ)	23.2 µg/m³ (MER)	58 µg/m³ (UIZ)	23.2 µg/m³ (MER)	44 µg/m³ (MER)	23 µg/m³ (MER)
Área conurbada	70 µg/m³ (XAL)	27.7 µg/m³ (XAL)	70 µg/m³ (XAL)	27.7 µg/m³ (XAL)	57 µg/m³ (XAL)	27 µg/m³ (XAL)
ZMVM	70 µg/m³ (XAL)	27.7 µg/m³ (XAL)	70 µg/m³ (XAL)	27.7 µg/m³ (XAL)	57 µg/m³ (XAL)	27 µg/m³ (XAL)

Entre paréntesis se muestra la clave de la estación donde se registró el valor máximo. En rojo se muestran los incumplimientos.

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Distribución temporal y espacial de la concentración

A diferencia de la evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014, que utiliza los datos generados por la REDMA, el análisis de la calidad del aire, que incluye la distribución temporal y espacial de la concentración de partículas suspendidas, se realiza a partir de las mediciones de la RAMA[11]. La RAMA tiene como objetivo evaluar la calidad del aire continuamente y, al tener un mayor número de estaciones que la REDMA, tiene una mayor cobertura, por lo que se pueden estudiar los patrones espaciales y temporales de los contaminantes.

Los promedios anuales del monitoreo continuo de partículas suspendidas en la ZMVM fueron de 44 µg/m^3 para PM_{10}, 21 µg/m^3 para partículas gruesas ($PM_{10-2.5}$) y 23 µg/m^3 para $PM_{2.5}$. Cuando se comparan los promedios por entidad federativa, se tiene que en la Ciudad de México los promedios anuales para las tres fracciones fueron 41, 18 y 23 µg/m^3, mientras que en el área conurbada del Estado de México los valores fueron iguales a 47, 27 y 24 µg/m^3, respectivamente. La diferencia en las concentraciones entre la Ciudad de México y el área conurbada del Estado de México se debe a la presencia de una mayor cantidad de fuentes de emisiones primarias en esta última.

Las series de tiempo de los promedios diarios de PM_{10}, $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$ muestran que la temporada fría-seca (noviembre a febrero) es cuando se incrementa la concentración de partículas (Figura 3.17). Esto se debe al aumento en la frecuencia e intensidad de inversiones térmicas, condiciones de estabilidad atmosférica y disminución de la capa de mezcla en esta temporada. Las concentraciones más bajas se registran en la temporada de lluvia, debido al efecto de lavado asociado.

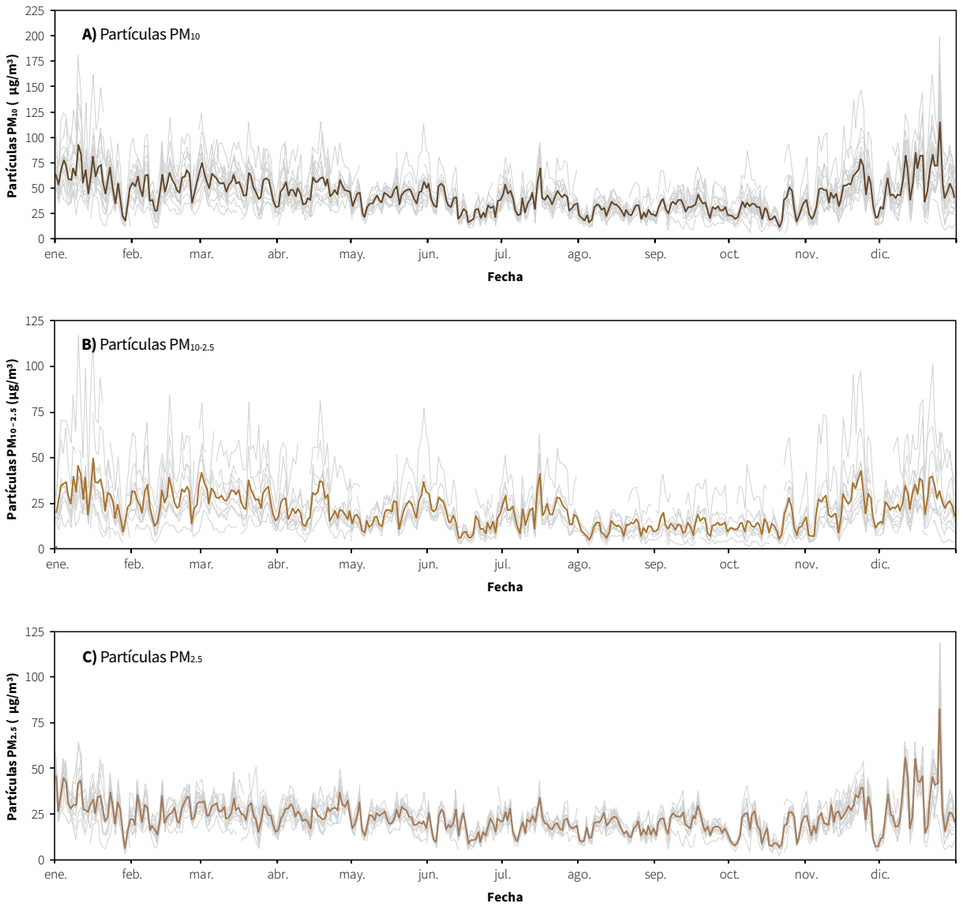
Es importante mencionar el impacto que tienen los juegos pirotécnicos sobre las concentraciones de partículas, especialmente durante las celebraciones de fin de año (25 de diciembre y el 1 de enero). El uso de pirotecnia ocasiona la mayoría de los eventos de alta concentración por partículas; por ejemplo, en 2018 los valores máximos de los promedios de 24 horas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en estaciones automáticas se registraron el 25 de diciembre: 199 µg/m^3 para PM_{10}, en la estación Villa de las Flores (VIF), y 118 µg/m^3 para $PM_{2.5}$ en la estación Nezahualcóyotl (NEZ), ambas ubicadas en el Estado de México. Durante este día, siete estaciones automáticas de la ZMVM presentaron promedios diarios mayores a 90 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ (umbral que no fue superado en ningún otro día).

Las plumas de contaminación producidas por los juegos pirotécnicos contienen una gran cantidad de partículas finas menores a 1 µm, con metales traza y iones solubles en agua. Durante el periodo de mayor intensidad de actividad pirotécnica la composición de las partículas está dominada por tres iones inorgánicos –amonio, nitrato y sulfato– en cantidades que alcanzan el 26% del total de la masa de las $PM_{2.5}$, así como aerosoles orgánicos que contribuyen con el 25% (Retama *et al*., 2019). Las partículas que se forman debido a las emisiones de la pirotécnica tienen un alto potencial oxidativo que ocasiona efectos adversos en la salud de la población y un impacto negativo por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Fang *et al*., 2017; Yang *et al*., 2014).

En las Figuras 3.18, 3.19 y 3.20 se muestra la distribución espacial de los promedios anuales de las diferentes fracciones de partículas (PM_{10}, $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$, respectivamente). En términos generales, las estaciones ubicadas al norte de la zona metropolitana registran consistentemente concentraciones de partículas mayores que las localizadas al sur.

En 2018, las estaciones ubicadas en el área conurbada del Estado de México registraron los

11 Esta distinción se debe a que la REDMA utiliza un método de referencia para la medición de la concentración de partículas suspendidas, mientras que la RAMA utiliza un método equivalente.



Nota: Las líneas gruesas de color café representan el promedio aritmético de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden a los valores de los promedios diarios de cada estación de monitoreo.

Figura 3.17 Serie de tiempo de los promedios diarios de partículas PM_{10}, $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$ en 2018

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

mayores promedios de PM_{10}, con un máximo en Xalostoc (XAL) de 74 µg/m³, seguido de San Agustín (SAG) con 56 µg/m³. En la Ciudad de México el máximo del promedio anual de PM_{10} se registró en la estación Merced (MER), igual a 52 µg/m³. Los menores promedios anuales se observaron al sur de la Ciudad de México, con mínimos de 31 µg/m³ en la estación Cuajimalpa (CUA) y 33 µg/m³ en Ajusco Medio (AJM). En el caso de las partículas gruesas ($PM_{10\text{-}2.5}$) hay una influencia importante de las emisiones locales primarias. Al igual que para las PM_{10}, el valor máximo en la Ciudad de México se registró en la estación Merced (MER), y en el Estado de México en la estación Xalostoc (XAL).

La medición de $PM_{2.5}$ está centralizada al territorio de la Ciudad de México. Sin embargo, se cuenta con mediciones en algunas estaciones en el área conurbada. Los promedios anuales en las estaciones de la Ciudad de México estuvieron en el intervalo de 19 a 26 µg/m³, con el máximo en la estación Merced (MER). En el Estado de México, el promedio anual máximo se registró en la estación Xalostoc (XAL), igual a 29 µg/m³. Para partículas $PM_{2.5}$ se observa una mayor homogeneidad entre todas las estaciones; solo las que se encuentran en el límite de la zona metropolitana al sur y poniente presentan valores de concentración menores a 20 µg/m³, como es el caso de Ajusco Medio (AJM) y Santa Fe (SFE).

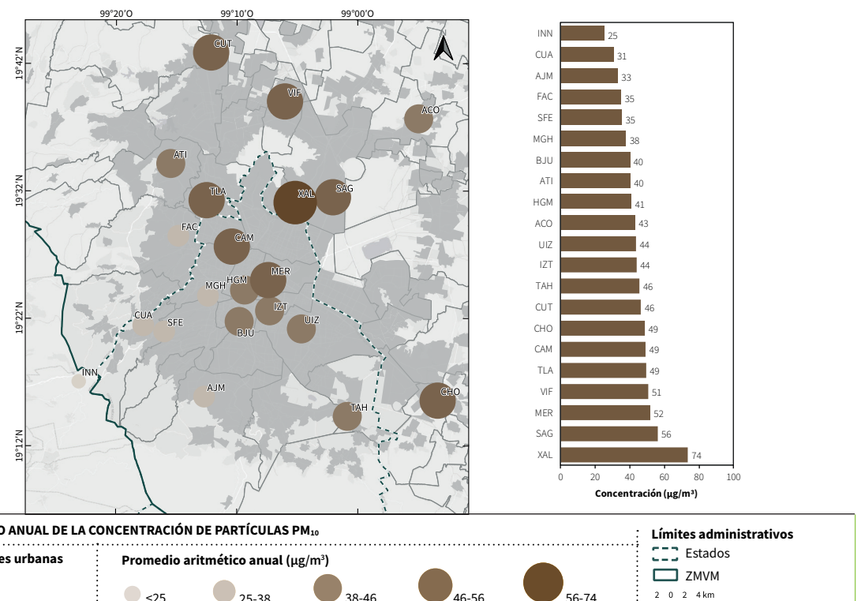


Figura 3.18 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de partículas PM_{10} en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

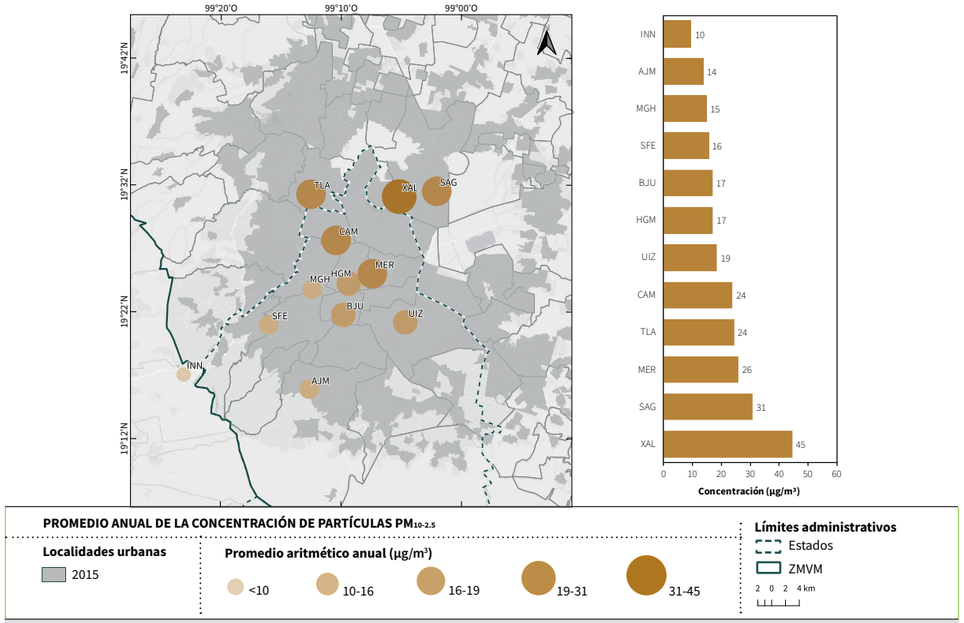


Figura 3.19 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de partículas $PM_{10\text{-}2.5}$ en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

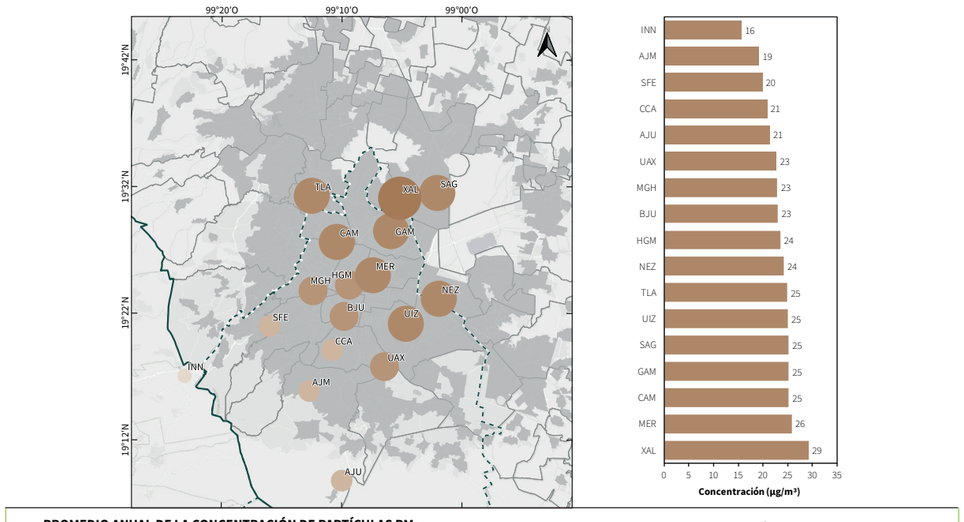
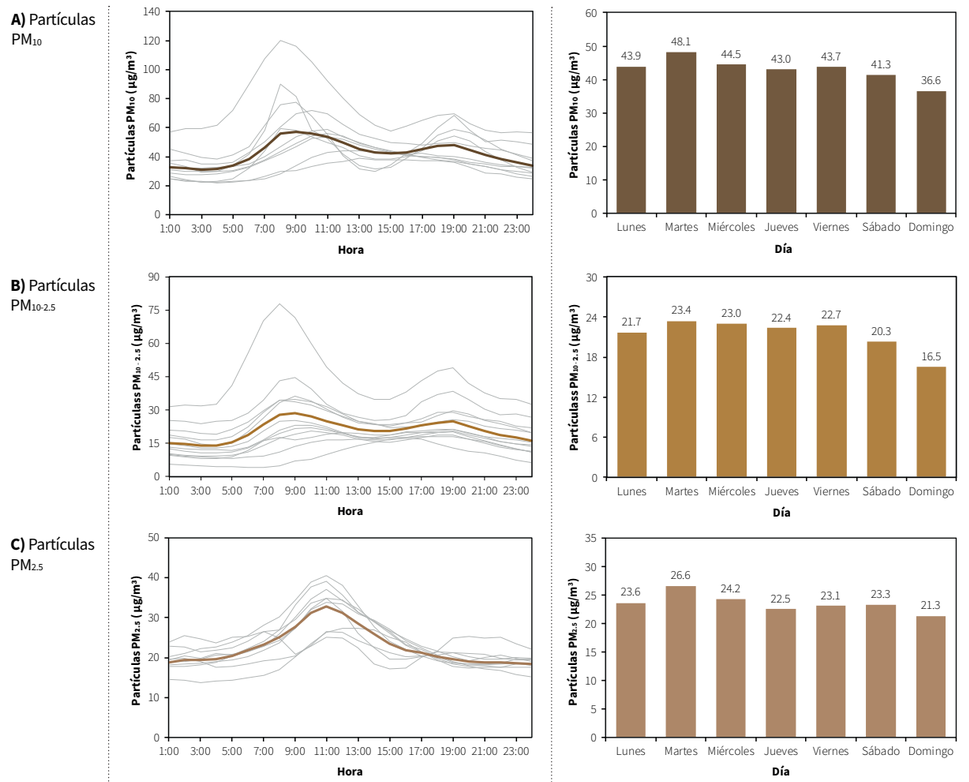


Figura 3.20 Promedio aritmético de la concentración anual (2018) de partículas $PM_{2.5}$ en las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

La variación horaria y por día de la semana de las concentraciones de partículas suspendidas se presentan en la Figura 3.21, en la cual se puede observar que, en la mayoría de las estaciones, el ciclo diurno de las fracciones PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ presenta dos picos de concentración, el primero entre las 8:00 y 9:00 horas y el segundo alrededor de las 19:00 horas. Este comportamiento se asocia principalmente a las contribuciones provenientes de las emisiones vehiculares, lo que incluye la suspensión de polvos y las emisiones primarias del escape (p. ej. de carbono negro).

En el caso de $PM_{2.5}$, el perfil promedio se caracteriza por un pico único entre las 10:00 y las 12:00, el cual se asocia a la formación secundaria de aerosoles inorgánicos (como los nitratos y sulfatos) y orgánicos (principalmente compuestos de baja presión de vapor con diversos grados de oxidación). En las estaciones que se ubican al sur o poniente de la zona metropolitana la duración del pico es más prolongado y en algunas estaciones decrece por la tarde, a partir de las 17:00 horas; por ejemplo, en las estaciones SFE, INN, AJM y AJU, que se ubican en los límites de la zona metropolitana, se observan picos relativamente más tarde, debido al arrastre de los contaminantes y la formación de aerosoles secundarios.



Comportamiento horario, las líneas gruesas de color café representan el promedio de todas las estaciones; las líneas grises delgadas corresponden al comportamiento en cada estación de monitoreo.

Comportamiento semanal, las barras representan el promedio de la concentración por día de la semana para todas las estaciones de monitoreo.

Figura 3.21 Comportamiento horario y por día de la semana de la concentración de PM_{10}, $PM_{10-2.5}$ y $PM_{2.5}$ en 2018
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

Las PM_{10} representan la suma de las fracciones fina y gruesa. De la masa total de estas, el 52% corresponde a $PM_{2.5}$ y el 48% a $PM_{10-2.5}$ (Figura 3.22). La proporción entre la fracción gruesa y fina de las partículas tiene un comportamiento variable durante el día, debido a que las emisiones primarias tienen un mayor impacto en la fracción gruesa; este tipo de emisiones aumenta la proporción de la fracción gruesa en dos periodos del día y se relacionan con las horas de mayor tránsito vehicular, por la mañana (de 7:00 a 9:00 horas) y en la tarde-noche (de 17:00 a 22:00 h). Por otro lado, la fracción fina tiene una importante contribución por la formación de aerosoles secundarios, fenómeno que se presenta entre las 11:00 y las 15:00 horas, por lo que esta fracción representa más del 55% durante este periodo del día. En las restantes horas del día la proporción entre ambas fracciones es prácticamente igual. Se destaca que la distribución de la proporción de las fracciones varía de acuerdo con la ubicación de los sitios de monitoreo. Cuando hay vialidades importantes en el área de representatividad de las estaciones, la fracción gruesa será mayor y el comportamiento horario será similar al de contaminantes primarios como el CO; en cambio, si el sitio se encuentra viento abajo de la formación de compuestos secundarios, el aporte de la fracción fina será más grande.

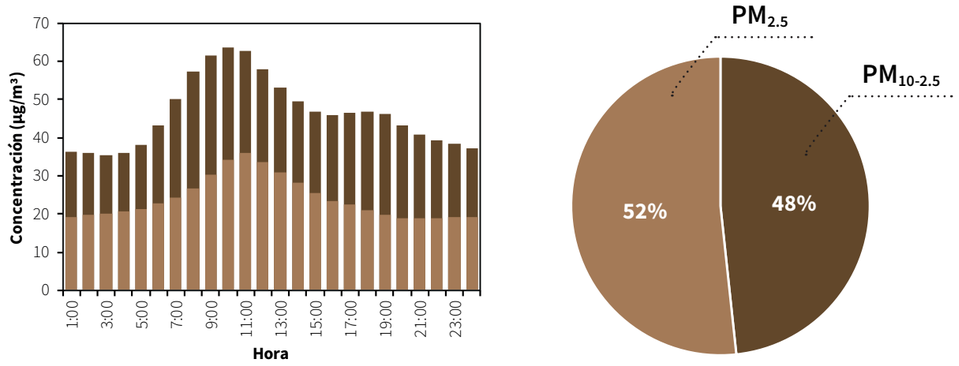


Figura 3.22 Contribución promedio de las partículas $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$ a la masa total y por hora de las PM_{10}
Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2018; SEDEMA, 2020a).*

El comportamiento semanal de PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ muestra un perfil similar al de contaminantes gaseosos como CO y NO_X. Los dos tipos de fracciones presentan la concentración promedio más alta en martes y el valor más bajo en domingo; la reducción es notoria los fines de semana y también se registra un ligero incremento los viernes. Para las $PM_{2.5}$, si bien el promedio más alto se registró en martes y el menor en domingo, las concentraciones fueron similares para todos los días de la semana.

3.4.6 Tendencia histórica de calidad del aire

La tendencia, en términos de calidad del aire, se puede definir como el desplazamiento gradual de la concentración de los contaminantes a través de los años. Esta puede presentar una pendiente positiva, lo que indica el aumento de las concentraciones a lo largo de los años, o negativa cuando se registra una disminución. El análisis de tendencia permite observar cambios en las concentraciones a través de los años, evaluar el impacto a largo plazo que han tenido los programas y políticas públicas dirigidas a reducir emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire, así como determinar patrones de comportamiento en los contaminantes, ya sean estacionales, cícli-

cos o, por el contrario, comportamientos aleatorios sin un patrón específico en el transcurso del tiempo (SEDEMA, 2020a).

En la ZMVM se mantiene una tendencia decreciente en los principales contaminantes desde la segunda mitad de la década de los 90, con reducciones más sustanciales en los primeros años, a partir de que inició la gestión de la calidad del aire en la zona metropolitana. La Figura 3.23 compara los porcentajes de reducción en la concentración promedio anual para SO_2, NO_X, NO_2, CO, O_3, PST y PM_{10}, con respecto al año 1995, a partir del cual las estaciones históricas[12] cuentan con datos consistentes. Para $PM_{2.5}$ el porcentaje de reducción se calculó a partir de la concentración promedio anual de 2004, debido a que el monitoreo de este contaminante no empezó sino hasta los años 2000. La disminución en la concentración de los contaminantes primarios sugiere que las políticas vigentes mantienen todavía un impacto favorable en el control de emisiones. La tasa de decremento ha sido más moderada, pero sostenida, en la última década; esto es meritorio, dado que la mejora en la calidad del aire ha continuado a pesar del crecimiento poblacional y la expansión del área urbana.

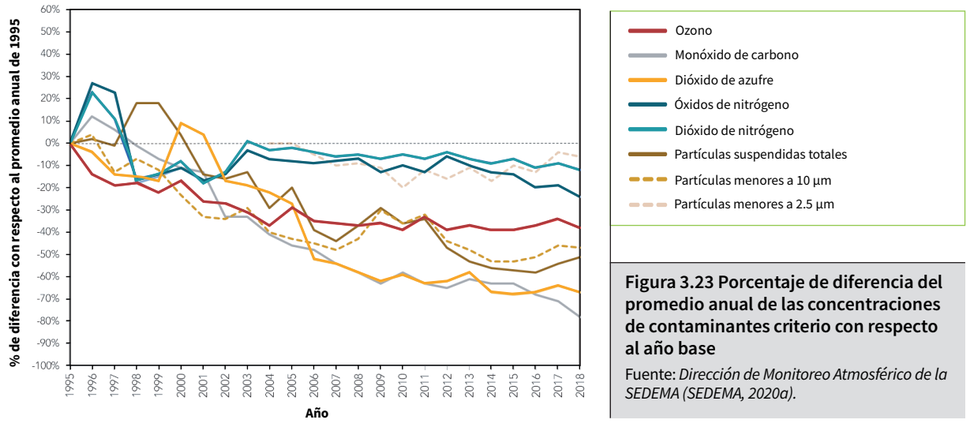


Figura 3.23 Porcentaje de diferencia del promedio anual de las concentraciones de contaminantes criterio con respecto al año base

Fuente: *Dirección de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA (SEDEMA, 2020a).*

En las tres décadas de operación del SIMAT, se observa que las acciones de los programas de gestión de la calidad del aire han tenido un impacto positivo en la reducción de la contaminación atmosférica. Las concentraciones de Pb, SO_2, CO y NO_2 muestran una reducción significativa, con concentraciones por debajo de los límites actuales de las NOM de salud ambiental, según se expuso anteriormente. El máximo porcentaje de reducción en 2018 respecto del año 1995 es de 78% para CO, seguido de 67% para SO_2. Los contaminantes con menor reducción en el año 2018 son PM_{10}, $PM_{2.5}$ y NO_2, con 16%, 9% y 12%, respectivamente. El O_3 presenta una reducción hasta 2004, un ligero incremento en 2005 y a partir de 2006 se estabilizan los valores del porcentaje de reducción, los cuales oscilan entre 34 y 39% con diferencias estadísticamente no significativas. En 2018 todos los contaminantes muestran un decremento en comparación con 2017, con excepción de las PST. Para el caso de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, el comportamiento en la última década ha sido aleatorio, sin una tendencia a la baja perceptible. Asimismo, se destaca que para el caso de O_3, PM_{10} y $PM_{2.5}$, pese al decremento en las concentraciones respecto del año 1995 (2004 para $PM_{2.5}$), no se ha logrado alcanzar los valores límite de sus respectivas normas de salud ambiental.

Adicionalmente se cuenta con las series de tiempo históricas de los promedios mensuales desde 1995 hasta 2018, así como su desviación estándar; este análisis se puede consultar en el Informe Anual de Calidad del Aire 2018 de la SEDEMA (2020a) y en el Anexo 3.3 del presente ProAire. En las series de tiempo se construyó una línea de tendencia con el método LOESS[13], el cual permite remover la variación estacional a través de un análisis de series de tiempo (Cleveland, Cleveland, McRae, & Terpenning, 1990). De manera general, la tendencia en la reducción de la contaminación atmosférica ha sido consistente con la aplicación de medidas de reducción de emisiones y programas de calidad del aire, ya que desde finales de la década de los noventas se presentan decrementos para todos los contaminantes. Sin embargo, prácticamente todos los contaminantes, con excepción del CO, muestran una tendencia estable en la última década.

Dado que la tasa de reducción en los niveles de contaminación es menor que en décadas previas, las variaciones atribuibles a las políticas de gestión se traslapan con aquellas asociadas a variaciones climáticas locales (p. ej. cambios en el régimen pluvial, isla de calor urbano), regionales (p. ej. cambios en los sistemas sinópticos) y globales (p. ej. el fenómeno ENOS), por lo que no es posible atribuir la reducción a cualquiera de ellas. Para todos los contaminantes se identifica una fuerte variación estacional, con ciclos anuales determinados por el contraste meteorológico entre las temporadas seca-fría, seca-caliente y húmeda. Los contaminantes primarios presentan picos de concentración durante el invierno, mientras que para los contaminantes secundarios, particularmente O_3, ocurren en la primavera; en todos los casos los valores de concentración más bajos de cada contaminante coinciden con la temporada de lluvias (SEDEMA, 2018a).

3.4.7 Calidad del aire en el estado de Hidalgo

De las tres cuencas atmosféricas localizadas al Sur del Estado de Hidalgo, dos presentan interacciones importantes con la ZMVM:

- La cuenca de Pachuca, que exporta contaminantes hacía el Estado de México a través del corredor Texcoco-Amecameca y Ozumba, principalmente entre junio y diciembre[14].
- La cuenca de Tula, al noroeste de la ZMVM, que registra emisiones significativas por la actividad en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco. Este corredor se identifica en la normatividad mexicana como Zona Crítica (NOM-085-SEMARNAT-2011 y NOM-016-CRE-2016) por presentar altas concentraciones de contaminantes atmosféricos, y está conformada por los municipios de Tula de Allende, Tepeji del Río de Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan y Apaxco, en los estados de Hidalgo y de México. En específico, dentro del corredor se ubica la refinería Miguel Hidalgo de PEMEX, y la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la CFE, entre otras industrias.

El transporte transfronterizo de contaminantes entre estas dos cuencas y la ZMVM resalta la importancia de analizar los datos de monitoreo atmosférico generados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMARNATH), que opera el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo (SIMAEH). El SIMAEH está conformado por 20 estaciones de monitoreo atmosférico, 10 automáticas y 10 manuales, ubicadas principalmente al sur del Estado, con una cobertura de 12 municipios. En el Anexo 3.6 se detallan las características del SIMAEH.

12 Las estaciones que se consideraron para el análisis cuentan con registros de cada contaminante desde el año base y son: Atizapán (ATI), Camarones (CAM), Cuajimalpa (CUA), FES-Acatlán (FAC), Los Laureles (LLA), La Presa (LPR), Merced (MER), Montecillo (MON), Pedregal (PED), San Agustín (SAG), Tláhuac (TAH), Tlalnepantla (TLA), Tultitlán (TLI), UAM-Iztapalapa (UIZ), Villa de las Flores (VIF) y Xalostoc (XAL). No todos los sitios de monitoreo se utilizaron para todos los contaminantes, debido a que no los miden.

13 La regresión de LOESS *(Locally Estimated Scatterplot Smoothing)* es una técnica no paramétrica que utiliza la regresión ponderada local para ajustar una curva suave a través de puntos en un diagrama de dispersión. Las curvas de LOESS pueden revelar tendencias y ciclos en los datos que pueden ser difíciles de modelar con una curva paramétrica.

14 UNAM & INECC. (2016). Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208883/Informe_Final_AECAME_20161230.pdf

Diagnóstico de la calidad del aire en Tizayuca

El municipio de Tizayuca, que forma parte de la ZMVM, se ubica al sur del estado de Hidalgo y la cuenca atmosférica de Pachuca. Tizayuca presenta un crecimiento industrial, habitacional y de servicios, lo que se ve reflejado en la calidad del aire que se registra a través de la estación Tizayuca (TIZ) del SIMAEH, que es de tipo mixto y conjunta una estación automática y una manual para monitorear las concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente. La siguiente tabla muestra el cumplimiento de las NOM de salud ambiental en la estación TIZ para el año 2018. En el Anexo 3.6 es posible encontrar gráficas detalladas con los perfiles anuales de los diferentes indicadores de calidad del aire.

Para partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, no se rebasaron los límites permisibles para los promedio diarios de 24 horas, según datos de la red de monitoreo manual. Se destaca que en la estación automática sí se rebasó el límite para el promedio de 24 horas de PM_{10} en 20 ocasiones; no obstante, el método de referencia para la evaluación del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014 es a través de equipos de operación manual o semi-automática. En el caso del resto de los contaminantes, únicamente se incumplió con el límite permisible de O_3 para el promedio móvil de 8 horas, igual a 70 ppb según la NOM-020-SSA1-2014. Se destaca que este límite se rebasó en 6 ocasiones.

Tabla 3.13 Cumplimiento de las NOM de salud ambiental en Tizayuca, Hidalgo, año 2018

Contaminante	Tipo de monitoreo	Indicador	Límite NOM	Valor máximo
PM_{10}	Manual	Máximo (promedio 24 h)	75 µg/m³	75 µg/m³
		Promedio anual (24 h)	40 µg/m³	ND
$PM_{2.5}$	Manual	Máximo (promedio 24 h)	45 µg/m³	35 µg/m³
		Promedio anual (24 h)	12 µg/m³	ND
O_3	Automático	Máximo (datos horarios)	95 ppb	88 ppb
		Máximo (promedio móvil 8 h)	70 ppb	75 ppb
NO_2	Automático	Máximo (datos horarios)	210 ppb	83 ppb
SO_2	Automático	Máximo (promedio móvil 8 h)	200 ppb	58 ppb
		Máximo (promedio 24 h)	110 ppb	17 ppb
		Promedio anual (datos horarios)	25 ppb	4 ppb
CO	Automático	Máximo (promedio móvil 8 h)	11.0 ppb	3.8 ppm

Fuente: *Datos proporcionados por la SEMARNATH vía correo electrónico (2020).*

Diagnóstico de la calidad del aire en la cuenca de Tula

En el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, dentro de la cuenca de Tula, ocurren diversas actividades contaminantes. Las dos fuentes de emisión principales son la generación de energía eléctrica y la refinación de petróleo, que en conjunto aportan 93.1% del SO_2 emitido en todo el estado de Hidalgo, 27.8% y 18.4% de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente, y 18.4% del total de NO_x. Además, por su potencial de caliza y otros recursos naturales elementales, en la zona también se presentan actividades como la producción de cemento y cal, haciendo de la zona un polo de desarrollo importante, donde los volúmenes de emisiones conllevan afectaciones importantes en la calidad del aire. En la sección 5.5.1 del Capítulo 5 se profundiza sobre las emisiones de contaminantes en el corredor industrial referido.

Asimismo, al ubicarse vientos arriba del Estado de México, estos contaminantes tienen el potencial de ser transportados hacia la ZMVM. Por ejemplo, distintos estudios y campañas han evidenciado el aporte que tiene el corredor Tula-Vito-Apasco en las concentraciones de SO_2 al noroeste de la ZMVM, lo cual también se observa en los resultados del monitoreo del SIMAT descritos en la sección 3.4.1. Para más información de la interacción entre las cuencas de la ZMVM y Tula, se puede consultar la sección 1.3 del Capítulo 1. Es así que resulta importante contar con evaluaciones de la calidad del aire en la cuenca de Tula, particularmente alrededor del corredor industrial. La descripción completa de los resultados históricos del monitoreo se presentan en el Anexo 3.6. Algunas conclusiones relevantes son las siguientes:

- Desde 2015, el muestreo manual de PM_{10} (3 estaciones) y $PM_{2.5}$ (4 estaciones) registra excedencias respecto de los límites permisibles para los promedios diarios, particularmente en la temporada seca-fría. En las cuatro estaciones de monitoreo automático en la región, que son Tula, Tepeji, Atotonilco y Atitalaquia, las concentraciones de PM_{10} también rebasan el límite permisible de 24 horas de forma frecuente, particularmente en Atotonilco y Atitalaquia.
- El monitoreo automático muestra que en la temporada seca-caliente, el O_3 tiende a subir y rebasar los límites permisibles. Por ejemplo, en 2016 la estación Atotonilco registró 46 excedencias al límite horario de 95 ppb, seguido de Atitalaquia con 33; para 2019, estas dos estaciones contabilizaron 43 y 24 excedencias, respectivamente.
- Respecto del SO_2, los valores históricos registrados en las cuatro estaciones automáticas de Tula, Tepeji, Atotonilco y Atitalaquia tienden a ser elevados. Por ejemplo, si se toma como referencia el límite de 75 ppb establecido en la NOM-022-SSA1-2019, este prácticamente se rebasa por lo menos una vez al día en alguna de las estaciones, según datos para el año 2019.

3.5 Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas

Los Programas para Contingencias Ambientales Atmosféricas ayudan a las autoridades a informar a la población en caso de que se presente una alerta ambiental derivada de una situación eventual y transitoria ocasionada por concentraciones elevadas de O_3 y partículas suspendidas. El objetivo principal de estos programas es evitar que los niveles elevados de contaminación empeoren y, en su caso, mejorar la calidad del aire limitando fuentes de emisiones específicas, a la vez que se alerta a la población para disminuir el riesgo asociado con la exposición a dichos niveles de contaminación.

3.5.1 Revisión histórica del Programa para Contingencias Ambientales

A partir del 2019, la ZMVM cuenta con el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) en la Ciudad de México y los 59 municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM; a este programa lo antecede el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) creado desde 1986. El PPRECAA se activa con los insumos de las concentraciones de contaminantes atmosféricos y de las condiciones meteorológicas generados por el SIMAT. La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) es quien activa y da a conocer las acciones a llevar a cabo en caso de presentarse un evento de contingencia ambiental atmosférica, para prevenir y proteger la salud de la población, en coordinación con el Gobierno Federal y los gobiernos de la Ciudad de México y del Estado de México.

En la ZMVM los niveles de algunos contaminantes secundarios son elevados durante gran parte del año; bajo ciertas condiciones meteorológicas y de emisiones, pueden registrarse eventos extraordinarios con un grave deterioro de la calidad del aire e impactos agudos sobre la salud de la población. Estos episodios de contaminación se suelen presentar cuando las condiciones meteorológicas son adversas para la dispersión de la contaminación, cuando ocurren episodios de alta emisión de contaminantes (naturales o antropogénicos) o por el acarreo de los contaminantes originados fuera de la cuenca del Valle de México (SEDEMA, 2016).

Desde su creación, el PCAA ha experimentado cambios en los valores de activación de sus distintas fases. En un principio los valores fueron definidos a partir de la distribución de la concentración máxima de O_3 y partículas, y solamente se contaba con dos fases de contingencia (Fase I y II). Conforme ha evolucionado el programa, los umbrales de los niveles de concentración de los contaminantes se han vuelto más estrictos, lo que ha cambiado los criterios de activación de las distintas fases y la métrica de los índices que se difunden entre la población en general. En la Tabla 3.13 se muestran las modificaciones de los valores de activación de contingencia por O_3 y PM_{10} desde el 2006.

Tabla 3.14 Histórico de modificaciones a los valores de activación del PCAA para ozono y partículas PM_{10}

	Valor de activación O^3 (ppb)			Valor de activación PM_{10} (µg/m³)			Valor de activación	
Periodo	**Precontingencia**	**Fase I**	**Fase II**	**Precontingencia**	**Fase I**	**Fase II**	**Fase combinada**	**Comentarios**
31 de agosto de 2006 a 30 de junio de 2008	≥ 188	≥ 221	≥ 276	≥ 242	≥ 272	≥ 400	≥198 ppb O_3 ≥170 µg/m³ PM_{10}	Algoritmo establecido en la NADF-009-AIRE-2006
1 de julio de 2008 a 30 de junio de 2009	≥ 183	≥ 216	≥ 271	≥ 242	≥ 272	≥ 392	≥ 193 ppb O^3 ≥ 170 µg/m³ PM_{10}	Se ajustan gradualmente los niveles de activación del PCAA en función al progreso en el control de contaminantes.
1 de julio de 2009 a 30 de junio de 2010	≥ 177	≥ 210	≥ 265	≥ 242	≥ 272	≥ 384	≥ 187 ppb O^3 ≥ 170 µg/m³ PM_{10}	
1 de julio de 2010 a 30 de junio de 2011	≥ 172	≥ 205	≥ 260	≥ 232	≥ 272	≥ 376	≥ 182 ppb O^3 ≥ 170 µg/m³ PM_{10}	
1 de julio de 2011 a 27 de octubre de 2014	≥ 166	≥ 199	≥ 254	≥ 222	≥ 272	≥ 368	≥ 176 ppb O^3 ≥ 170 µg/m³ PM_{10}	
28 de octubre (para O_3) y 29 de octubre (para PM_{10}) de 2014 a 5 de abril de 2016	≥ 155	≥ 185	≥ 264	≥ 215	≥ 286	≥ 375	≥ 164 ppb O^3 ≥ 144 µg/m³ PM_{10}	Algoritmo establecido en la NADF-009-AIRE-2006 ajustado a la actualización de la NOM de salud ambiental de O_3 (NOM-020-SSA1-2014) y partículas suspendidas (NOM-25-SSA1-2014).
A partir del 6 de abril de 2016	No aplica	≥ 155	≥ 205	No aplica	≥ 215	≥ 355	≥ 164 ppb O^3 ≥ 144 µg/m³ PM_{10}	Se deroga la fase de precontingencia.
A partir del 1º de julio de 2016	No aplica	≥ 155	≥ 205	No aplica	≥ 215	≥ 355	No aplica	Se deroga la fase combinada.

Fuente: *Elaborado a partir de información de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA, 2016).*

El resultado de reducir y ajustar los niveles de activación de las contingencias es un aumento en el número de episodios de contingencia, al transformar, por ejemplo, lo que antes era una Fase I en una Fase II. De manera positiva, la percepción del agravamiento de la situación ambiental crea un escenario favorable para la aplicación de nuevas restricciones. Sin embargo, los límites más estrictos en el PCAA por sí mismos no garantizan la disminución de los niveles de contaminación, ya que para esto se requieren acciones tendientes a reducir las emisiones de contaminantes primarios y precursores de contaminantes secundarios.

Al 2016, el PCAA de la ZMVM contaba solamente con la activación de contingencias para dos contaminantes, O_3 o PM_{10}. La actualización más reciente al programa se realizó en 2019, cuando se dio a conocer el PPRECAA por las autoridades ambientales pertinentes: la SEDEMA en la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2019) y la SMAGEM en el Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2019). En específico, se realizaron las siguientes modificaciones:

- **A** La inclusión de la fase preventiva para la protección de la salud para partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Se establecieron nuevos criterios para la activación de la fase preventiva por O_3.
- **B** La implementación de un protocolo de contingencia por $PM_{2.5}$.
- **C** La inclusión de la Fase combinada por altos niveles de contaminación por O_3 y partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$).
- **D** El establecimiento de medidas para la disminución de contaminantes para el sector gubernamental, desde la fase preventiva, y el refuerzo de medidas en distintos sectores.

Tabla 3.15 Niveles de activación y suspensión del PPRECAA por contaminante y fase

	Activación			Suspensión		
	Índice (concentraciones)			Índice		
Fase de contingencia	**Ozono** **Promedio horario**	**PM_{10}** **Promedio móvil de 24 horas**	**$PM_{2.5}$** **Promedio móvil de 24 horas**	**Ozono** **Promedio horario**	**PM_{10}** **Promedio móvil de 24 horas**	**$PM_{2.5}$** **Promedio móvil de 24 horas**
Fase I	> 150 puntos (154 ppb)	> 150 puntos (214 µg/m³)	> 150 puntos (97.4 µg/m³)	≤ 150 puntos con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		
Fase II	> 200 puntos (204 ppb)	> 200 puntos (354 µg/m³)	> 200 puntos (150.4 µg/m³)			
Fase combinada	Ozono > 150 puntos (154 ppb) y PM_{10} o $PM_{2.5}$ > 140 puntos (186 µg/m³ para PM_{10} o 86.7 µg/m³ para $PM_{2.5}$) Ozono > 140 puntos (142 ppb) y PM_{10} o $PM_{2.5}$ > 150 puntos (214 µg/m³ para PM_{10} o 97.4 µg/m³ para $PM_{2.5}$)			≤ 150 puntos y ≤ 140 puntos dependiendo del contaminante, con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		
Fase preventiva	Pronóstico de ozono para el día siguiente mayor a 140 puntos IMECA (142 ppb) con una probabilidad del 70% de ocurrencia.	> 135 puntos (172 µg/m³)	> 135 puntos (81.4 µg/m³)	De manera automática al día siguiente a las 19:00 horas o con la emisión de un comunicado de Fase de contingencia.	Cuando las concentraciones sean < 135 puntos IMECA y se cuente con un pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente y con la emisión de un comunicado.	

Nota: Los niveles de activación se expresan como puntos del Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México. Entre paréntesis se muestran las concentraciones expresadas en ppb o µg/m³, según aplique para cada contaminante. Para mayor información sobre el Índice de Calidad del Aire, consultar el Anexo 3.4 del presente documento.

Fuente: *Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 28 de mayo de 2019 (Gobierno de la Ciudad de México, 2019).*



En el nuevo PPRECAA se define el mecanismo mediante el cual se activan las Fases de Contingencia a través de la CAMe, en coordinación con el Gobierno Federal y los Gobiernos del Estado de México y de la Ciudad de México, así como las acciones a implementar por autoridades locales y federales, el sector industrial, comercios, servicios y la ciudadanía en general. Es importante mencionar que las contingencias ambientales tienen diferentes niveles de acciones según la gravedad y persistencia del problema. En la Tabla 3.14 se muestran los niveles actuales de activación y suspensión correspondientes a cada una de las distintas fases de contingencia, publicados en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2019).

En el Anexo 3.5 se resume el proceso de activación y suspensión de las diferentes Fases de Contingencia descritas en el PPRECAA; se incluyen también descripciones de las condiciones que llevaron a la activación del programa durante el periodo de 2016 a 2019, así como el registro histórico de contingencias ambientales atmosféricas en la ZMVM, por tipo de fase, contaminantes responsables, fechas de activación y suspensión.

Actualmente los valores de concentración –y no los del Índice de Calidad del Aire– son los que se usan de referencia para la instrumentación del PPRECAA en la ZMVM. Esto debido que a partir de la entrada en vigor del nuevo Índice Aire y Salud, regulado por la NOM-172-SEMARNAT-2019, se reemplazó al Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México. Si bien los dos índices comparten muchas similitudes en los colores de las categorías, el Índice Aire y Salud se basa en una escala de concentraciones distinta y no cuenta con un algoritmo ni una escala numérica. En algunos contaminantes las categorías de calidad del aire tienen valores más estrictos y diferentes indicadores estadísticos para determinar la categoría del Índice Aire y Salud; por ejemplo, para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se utiliza un promedio móvil ponderado de 12 horas, el cual es un método de la US EPA conocido como *NowCast* (US EPA, s/f) y es utilizado para emitir avisos en tiempo real de la situación del nivel de partículas en casos de incendios; en comparación, el anterior Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México utilizaba promedios móviles de 24 horas y un algoritmo de cálculo similar al que utiliza la US EPA, el cual genera un valor numérico del índice en una escala de 0 a 500 puntos.

Al contrario del Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México, el Índice Aire y Salud no tiene vinculación con los límites de las NOM de salud ambiental ni con la aplicación del PPRECAA. Es importante fomentar la homologación de los diferentes mecanismos de difusión de los niveles de contaminación a la población con la instrumentación del PPRECAA.

3.6 Eventos extraordinarios de calidad del aire

3.6.1 Incendios de mayo de 2019

La quema de biomasa contribuye de manera importante a la contaminación del aire con emisiones de partículas, gases tóxicos y gases de efecto invernadero en todo el mundo. Esto da como resultado que la ciudadanía se expongan a altos niveles de concentración de diversos contaminantes del aire. Los contaminantes del aire (o sus precursores) que a menudo tienen mayor conexión con las exposiciones de la población en general son partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO). Por ejemplo, las emisiones de compuestos basados en azufre y nitrógeno dependen de la eficiencia del proceso de combustión y, la composición química de la vegetación quemada.

En mayo de 2019, se desarrolló un episodio importante de mala calidad del aire en la ZMVM que resultó del impacto de los incendios en varios estados de la República. Desde la madrugada del día 10 y hasta el día 16 de mayo, se registró una cantidad importante de incendios en los estados miembros de la CAMe (Estado de México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Morelos y Querétaro, además de la Ciudad de México) y estados circunvecinos como Guerrero, Michoacán y Oaxaca (Figura 3.24).

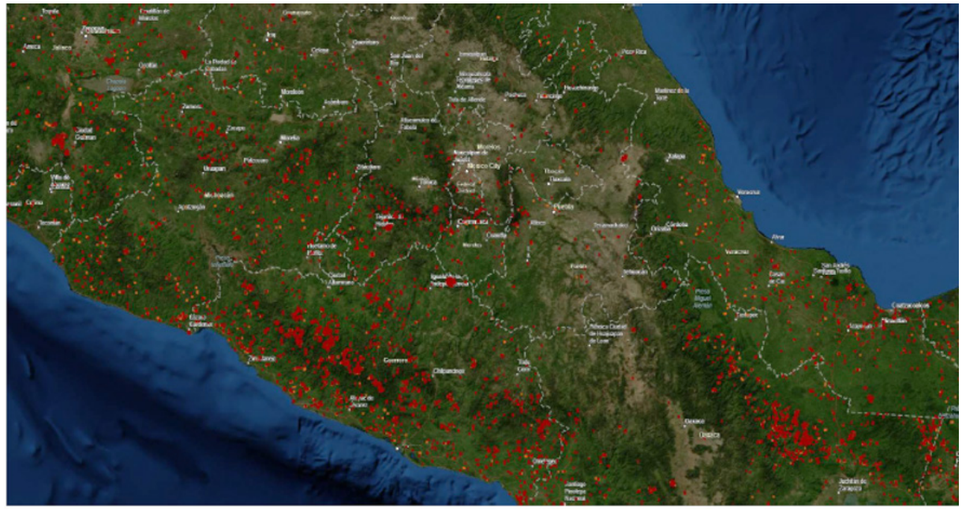


Figura 3.24. Imagen satelital con los puntos calientes del 10 al 12 de mayo
Fuente: *Global Forest Watch Fires.*

Adicionalmente, las condiciones meteorológicas propiciaron que el humo de los incendios vecinos se transportara hacia la ZMVM y quedara retenido; los fenómenos causantes fueron: 1) la presencia de un sistema anticiclónico, característico de la primavera, el cual propició que a diferentes alturas sobre el centro del país los flujos de viento convergieran hacia el Valle y transportaran el humo de los incendios; 2) el anticiclón generó condiciones de gran estabilidad atmosférica tanto en superficie como en los siguientes 3000 metros de altura por encima del Valle, por lo que se acumularon los contaminantes día y noche.

Asimismo, la alta y constante radiación solar durante el día en consecuencia de la poca nubosidad que predominó, condujo a la mayor formación de ozono e incremento la concentración de partículas. En la Figura 3.25 se observa cómo se va incrementando la concentración de las partículas $PM_{2.5}$ y el ozono a partir del 13, 14 y 15 de mayo, cuando las condiciones meteorológicas fueron más adversas para la dispersión de los contaminantes.

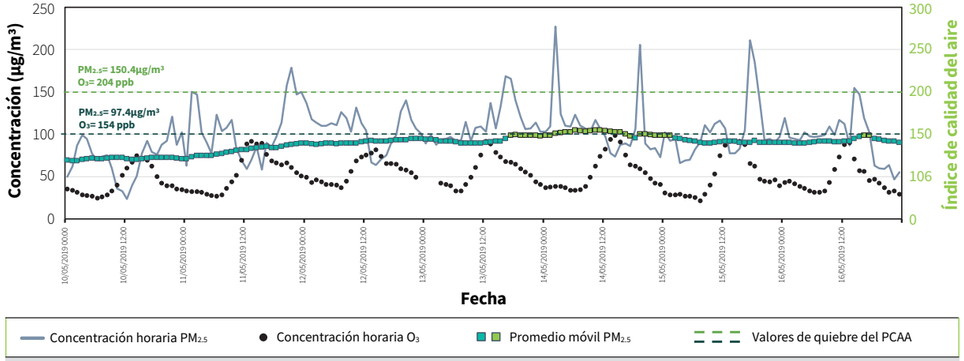


Figura 3.25 Serie de tiempo que muestra el comportamiento de las partículas $PM_{2.5}$ y ozono durante el evento del 10 al 16 de mayo

Fuente: *Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.*

El día 14 de mayo la CAMe publicó el comunicado donde activó la contingencia ambiental extraordinaria por partículas ($PM_{2.5}$) en la ZMVM, debido a que la estación Nezahualcóyotl (NEZ) al oriente de la Ciudad registró un valor de 105 µg/m³ del promedio móvil de $PM_{2.5}$, que equivalen a 158 puntos del índice de calidad del aire vigente en 2019 (NADF, 2017). Con este comunicado se agregaron acciones para reducir la emisión de los contaminantes. Sin embargo, las condiciones meteorológicas que prevalecieron en el Valle de México no fueron favorables para la dispersión de los contaminantes y la corriente de viento del suroeste sobre la cuenca de México se mantuvo. A nivel de superficie se presentaron vientos débiles por la mañana y hasta antes del mediodía.

Después del mediodía, una corriente débil del sureste creó un flujo hacia el poniente, que acumuló los contaminantes al sureste y noreste de la Ciudad de México. Este flujo del sureste se fortaleció gradualmente a medida que avanzó la tarde, hasta formar una corriente fuerte que disminuyó la concentración de los contaminantes después de las 16:00. En cuanto a $PM_{2.5}$, se mantuvo el flujo de masas de aire contaminando desde el suroeste del país, por lo que no se observó una disminución importante de los valores máximos en las estaciones ubicadas al oriente (este) de la ZMVM.

Debido a las condiciones adversas para la dispersión de los contaminantes, el valor máximo de ozono que se alcanzó fue de 153 ppb (149 puntos del índice) en la estación Tultitlán (TLI); desde las 15:00 la estación Pedregal, al sur de la Ciudad, ya había alcanzado las 142 ppb (140 puntos). La corriente de viento trasladó la masa de contaminantes hacia el norte, lo que ocasionó que se registraran concentraciones más altas.

Las $PM_{2.5}$ en la estación NEZ incrementaron hasta alcanzar su máximo a las 9:00 horas, registrando 108 µg/m³ (161 puntos del índice); la estación Santiago Acahualtepec (SAC) también registró valores por arriba de 97.4 µg/m³ (150 puntos del índice) llegando a 102 µg/m³ (155 puntos del índice) como máximo a las 12:00; las estaciones del oriente y sureste fueron las que presentaron las concentraciones más altas. También se registraron concentraciones altas de $PM_{2.5}$ en el Valle de



Toluca, Puebla e Hidalgo, debido a la gran cantidad de incendios, junto con las condiciones meteorológicas prevalecientes.

Debido a las altas concentraciones por ozono ese mismo día se activó la contingencia ambiental atmosférica extraordinaria por partículas ($PM_{2.5}$) y ozono en la ZMVM, esto fue dado a conocer por la CAMe en un comunicado de las 15:00. Con esta contingencia se decretó la restricción vehicular para reducir la emisión de los precursores de ozono, así como otras acciones relacionadas.

3.6.2 Pandemia causada por SARS-CoV2 (COVID-19)

La pandemia causada por SARS-CoV2 (COVID-19) fue declarada por la OMS, el 11 de marzo del 2020. En México, la aparición del primer caso de importación fue el 27 de febrero del 2020; en esta fecha se dieron a conocer las fases de contagio y las medidas de control que se implementarían en cada una de estas (Secretaría de Salud, 2020); el 23 de marzo del 2020 se declaró la fase 2 (dispersión comunitaria) y con ello la denominada Jornada Nacional de Sana Distancia (JNSD).

El 31 de marzo de 2020 se declaró Emergencia Sanitaria y, con esto, fueron seleccionadas las actividades esenciales y no esenciales que tendrían que suspenderse temporalmente. El 19 de abril se declaró la fase 3, continuando con las restricciones en la movilidad y de aglomeraciones, además de monitorear la capacidad hospitalaria para atender los casos de COVID-19. El 31 de mayo se finalizó la JNSD; sin embargo, se implementó un sistema de semáforo nacional, en el que se determinó la activación de algunas actividades económicas y sociales de acuerdo con cuatro indicadores epidemiológicos: ocupación hospitalaria, positividad al SARS-CoV-2, tendencia de casos hospitalizados y la tendencia síndrome COVID-19.

La Ciudad de México tiene una alta densidad poblacional, así como una gran afluencia de trabajadores y estudiantes que, todos los días, se movilizan desde el Estado de México hacia sus centros de trabajo o estudio dentro de la Ciudad, por lo que desde el 19 de marzo de 2020 se aplicaron medidas para la mitigación y prevención del contagio. Entre las acciones más importantes se decretó que los trabajadores de las dependencias locales, alcaldías y otras entidades de la Administración Pública en la Ciudad de México, con

síntomas compatibles con COVID-19, deberían de aislarse y trabajar desde casa; de igual manera, se invitó a trabajar desde casa a personas con padecimientos respiratorios, servidores públicos con hijos en educación básica y trabajadores con alguna condición de riesgo, como mujeres embarazadas, personas con discapacidad, hipertensión, diabetes o enfermedades crónicas que reduzcan la capacidad inmunitaria.

Algunas dependencias del Gobierno Federal y local de la Ciudad de México, así como oficinas e industrias del sector privado, cuyas actividades se podían realizar de manera remota, se sumaron a las restricciones de movilidad. Como resultado, se observó una clara disminución del tránsito vehicular en la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2020). En la Figura 3.26 se presenta el porcentaje de reducción del tránsito vehicular ZMVM, el cual fue calculado a partir de la estimación de una semana típica (lunes a domingo) y se comparó con el tránsito registrado en cada día desde que comenzaron las restricciones y medidas de la JNSD.

Se puede observar la reducción en los días correspondientes al 9 y 16 de marzo, en los cuales se presentó el paro nacional de mujeres y un día de asueto, respectivamente. A partir del 19 de marzo de 2020 comenzó una reducción gradual, acentuándose el 26 y 27 de marzo, posterior al decreto nacional de suspensión temporal de labores. La mayor reducción se registró el viernes santo (10 de abril, con el 80%).

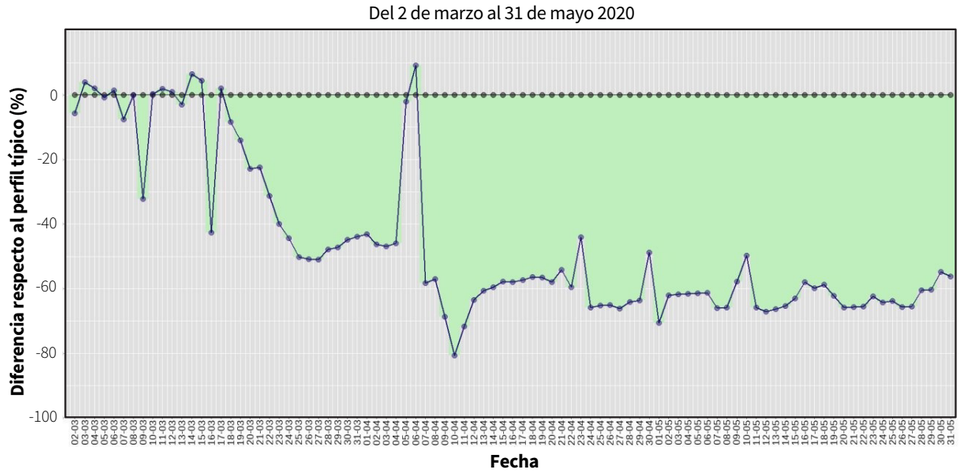


Figura 3.26 Diferencia porcentual del tránsito vehicular con respecto a días típicos en la Zona Metropolitana del Valle de México

Fuente: *Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.*

La reducción en la movilidad ocasionada por las restricciones tuvo un impacto en la concentración de todos los contaminantes atmosféricos durante abril y mayo, meses con las mayores restricciones.

En la Tabla 3.16 y 3.17 se muestran las comparaciones de las concentraciones promedio y los máximos diarios considerando cinco años (2015 a 2019) contra 2020.

Tabla 3.16 Comparación de concentraciones promedio por contaminante (abril y mayo) y porcentaje de cambio.

Contaminante	Concentración máxima		Porcentaje de cambio
	Años anteriores (2015-2019)	Durante abril y mayo (2020)	
O_3 (ppb)	40.13	44.7	+11%
$PM_{2.5}$ (µg/m³)	28.7	24.6	-14%
PM_{10} (µg/m³)	51.1	41.2	-19%
CO (ppm)	0.55	0.26	-52%
NO (ppb)	13.4	5.1	-62%
NO_2 (ppb)	24.7	15.8	-36%
NO_x (ppb)	38.2	21.3	-44%
SO_2 (ppb)	3.5	1.8	-48%

Nota: No se consideran las estaciones de transporte: ACO, AJU, INN, MON y MPA.

Fuente: *Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.*

Tabla 3.17 Comparación de concentraciones máximas diarias por contaminantes (abril y mayo) y porcentaje de cambio.

Contaminante	Concentración máxima		Porcentaje de cambio
	Años anteriores (2015-2019)	Durante abril y mayo (2020)	
O_3 (ppb)	122	114	-6%
$PM_{2.5}$ (µg/m³)	78	69	-12%
PM_{10} (µg/m³)	191	189	-1%
CO (ppm)	2.6	1.3	-50%
NO (ppb)	188	94	-50%
NO_2 (ppb)	71	50	-30%
NO_x (ppb)	233	129	-44%
SO_2 (ppb)	41	21	-48%

Nota: No se consideran las estaciones de transporte: ACO, AJU, INN, MON y MPA.

Fuente: *Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.*

Se observa claramente una reducción en los contaminantes primarios relacionados con la movilidad, como el CO, NO, NO_2 y NO_X. En las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ es importante mencionar que durante los meses secos y cálidos se presenta una mayor frecuencia de incendios, lo que ocasiona que estos contaminantes se incrementen, y se puede observar que los máximos no tienen una reducción de la misma magnitud que otros contaminantes; sin embargo, en la concentración promedio, la reducción es de alrededor del 15%.

En cuanto al ozono, se observa un incremento en las concentraciones promedio, debido a que la ZMVM en general tiene una atmósfera sensible a COV; esto significa que cuando se reducen en una relación mayor los NO_X con respecto a los COV, se presenta un incremento en las concentraciones de O_3 (observado desde el inicio de los años 2000 en las campañas lidereadas por el Dr. Mario Molina y la Dra. Luisa Molina).

En la Figura 3.27 se muestra el perfil horario típico de ozono y el observado durante la contingencia sanitaria por COVID-19. En comparación con el comportamiento regular, no se alcanzan valores tan bajos de concentración en las primeras horas de la mañana; esto se debe a la reducción en los NO_X, que también actúan como sumideros de O_3. Al registrarse menos cantidades de NO_X, la reacción de consumo de O_3 por NO_2 no se lleva a cabo en la magnitud que se presentaba antes de la contingencia. En consecuencia, el O_3 se mantiene por más tiempo en el aire ambiente; este fenómeno se traduce en una curva del perfil horario más amplia, donde la formación de O_3 comenzó más temprano y su eliminación tardó más por la falta de NO_2.

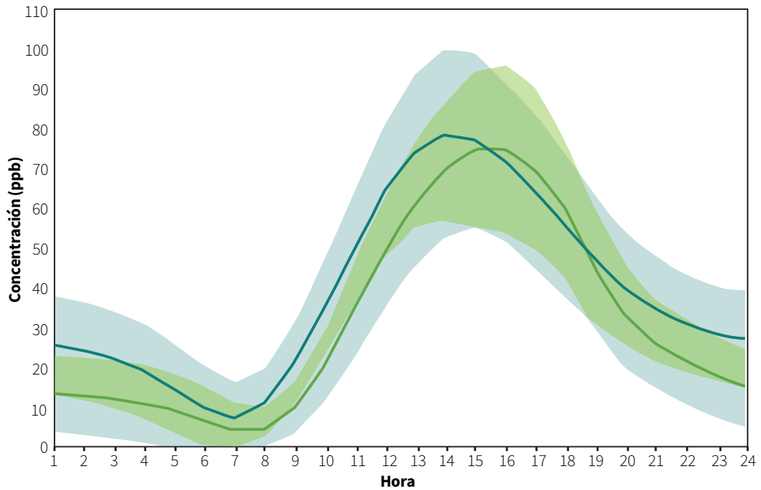


Figura 3.27 Perfil horario de la concentración de ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México durante la contingencia sanitaria

Fuente: *Proporcionado por la SEDEMA de la Ciudad de México a través de comunicaciones directas por correo electrónico.*

Es importante destacar que la reducción en la movilidad y en las actividades de económicas la Ciudad, ocasionaron la reducción de las concentraciones máximas de todos los contaminantes. Este análisis muestra la complejidad de la atmósfera en la ZMVM, ya que la reducción de la actividad de las diferentes fuentes de contaminación no significa que todos los contaminantes van a reducirse de la misma manera, ya que su comportamiento se ve afectado por otros fenómenos como la meteorología y la radiación solar.

3.7 Evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020

Con el objetivo de mejorar la gestión de la calidad del aire, el ProAire ZMVM 2021-2030 retoma las experiencias del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (SEDEMA, SMAGEM, & SEMARNAT, 2011). Este último se caracterizó por incorporar un nuevo enfoque en la gestión de la calidad del aire, al tener como eje rector un manejo ecosistémico de la ZMVM para fortalecer la gestión de calidad del aire. En el ProAire anterior se relacionó la estructura urbana con el sistema de generación de contaminantes y se colocó a la protección de la salud de la población como el punto estratégico y prioritario para mejorar la calidad del aire en la ZMVM.

Se reconoce la importancia de retomar acciones pasadas que mostraron efectividad en la mejora de la calidad del aire y la reducción de emisiones contaminantes, para así poder ampliar su efectividad en esta nueva iteración de políticas públicas. Es crucial detectar los obstáculos principales que evitaron la materialización de algunas acciones planteadas en el pasado, así como las problemáticas que no fueron atendidas por políticas y acciones de gestión de la calidad del aire, ya sea porque todavía no se había identificado claramente la problemática y sus causas, o porque se priorizaron otros temas con base en el diagnóstico integrado en ese entonces. Con estos puntos en mente, para la integración del ProAire ZMVM 2021-2030, se evaluó el ProAire ZMVM 2011-2020 en términos de los siguientes elementos:

- Porcentaje de avance en la implementación de las acciones definidas en el ProAire ZMVM 2011-2020.
- Impacto de la implementación de las acciones del ProAire ZMVM 2011-2020 en la reducción de emisiones contaminantes.
- Impacto de la implementación de las acciones del ProAire ZMVM 2011-2020 en la calidad del aire.

3.7.1 Avances en la implementación de acciones del ProAire ZMVM 2011-2020

El ProAire ZMVM 2011-2020 contaba con 116 acciones específicas, agrupadas en 81 medidas y 8 estrategias[14]. Cada estrategia trazaba una ruta a seguir para avanzar cuantitativa y cualitativamente en la gestión de la calidad del aire. A continuación se enlistan las estrategias del ProAire ZMVM 2011-2020 y su número de medidas:

	Estrategia 1. Ampliación y refuerzo de la protección a la salud: 9 medidas.
	Estrategia 2. Disminución estructural del consumo energético de la ZMVM: 4 medidas.
	Estrategia 3. Calidad y eficiencia energéticas en todas las fuentes: 16 medidas.

14 Para más información sobre cada medida individual, consultar el ProAire ZMVM 2011-2020 (SEDEMA *et al.*, 2011).

	Estrategia 4. Movilidad y regulación del consumo energético del parque vehicular: 15 medidas.
	Estrategia 5. Cambio tecnológico y control de emisiones: 18 medidas.
	Estrategia 6. Educación ambiental, cultura de la sustentabilidad y participación ciudadana: 4 medidas.
	Estrategia 7. Manejo de áreas verdes, reforestación y naturación urbanas: 11 medidas.
	Estrategia 8. Fortalecimiento institucional e investigación científica: 4 medidas.

De las 81 medidas, 13 se catalogaron de competencia federal, mientras que las 68 restantes tenían que ser implementadas por dependencias dentro de los gobiernos estatales de la Ciudad de México o el Estado de México[15]. Algunas de las acciones específicas de las medidas de jurisdicción estatal implicaban acciones de responsabilidad federal; sin tomar en cuenta estas últimas, las 68 medidas de competencia local comprendían 98 de las 116 acciones del ProAire[16].

En cuanto al progreso de implementación de las medidas de competencia local y federal del ProAire, la SEDEMA, la SMAGEM y la SEMARNAT realizaron una valoración en donde clasificaron el avance de implementación de cada medida bajo un Código de Valoración del Avance[17] para las medidas bajo su responsabilidad y asignaron un porcentaje al progreso de implementación.

Según la valoración de la SEDEMA, considerando solamente las medidas de competencia local, 58 se han implementado en su totalidad, en tanto que las 10 restantes se encontraban demoradas, con fecha de corte en abril de 2020 (SEDEMA, 2020b); sin embargo, el avance individual de las medidas no completadas era superior al 70% en todos los casos y, al ponderar su progreso, se obtuvo un avance global del 98% en la implementación del ProAire ZMVM 2011-2020. En cuanto a la valoración de las medidas federales realizada por la SEMARNAT, siete medidas contaban con un avance favorable (con fecha de corte en 2018), una medida con implementación demorada, cuatro de ellas en peligro de realizarse y no se contaba con información para una de ellas; el mismo informe señala que se tenía un avance óptimo del 53.8% en la implementación de las medidas de jurisdicción federal (SEMARNAT, 2020).

Por otro lado, es importante señalar que la SMAGEM también evaluó el progreso de las 68 medidas de jurisdicción local establecidas en el ProAire ZMVM 2011-2020, aplicando el mismo código de clasificación y con fecha de corte a junio de 2020. Para cada medida se asignó un porcentaje de avance igual a 100%, > 50%, < 50% o 0%, por lo que se tiene un estimado del progreso de implementación, mas no un porcentaje específico de avance. La evaluación indicó que, de las 68 medidas clasificadas como locales, 28 (41.2%) estaban completas o a tiempo de implementarse, en tanto que 40 (58.8%) se encontraban demoradas. Se destaca que, de las medidas locales, 20 se reportan como completas (SMAGEM, 2020).

La Figura 3.28 representa el avance en la implementación de todas las medidas de competencia local (evaluación de la Ciudad de México y el EdoMex) y federal (evaluación de la SEMARNAT) según la estrategia a la que pertenecen. Se observa que la Estrategia 3 es la que tiene la mayor proporción de medidas completadas o a tiempo. La Estrategia 5 tiene el mayor número de medidas, de las cuales 12 son de competencia local y 6 federales. Alrededor de la mitad de las medidas de esta estrategia se encuentran a tiempo para completarse; se observa un gran número de medidas con un avance parcial (demoradas), en específico en el Estado de México, en tanto que las dos medidas en riesgo son de competencia federal. La medida de la Estrategia 4 con la que no se cuenta información es la no. 44 y corresponde a una política de jurisdicción federal. Por su parte, las Estrategias 3 y 7 cuentan con el mayor porcentaje de medidas a tiempo o concluidas.

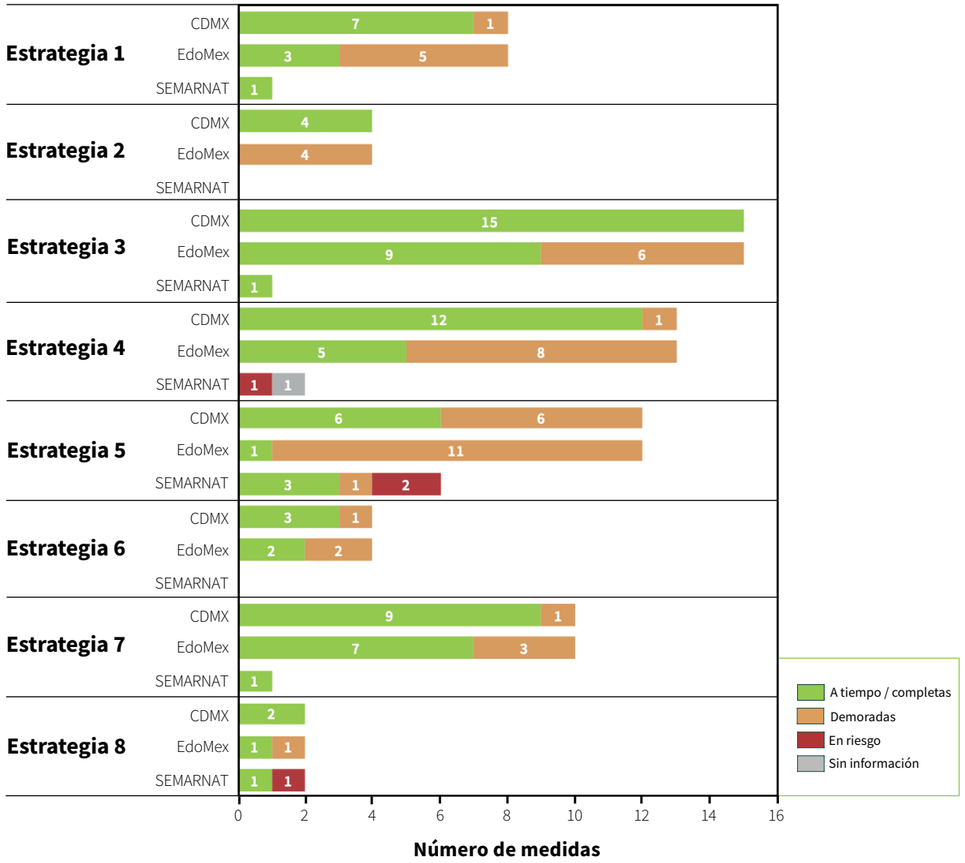


Figura 3.28 Avance de implementación por estrategia del ProAire ZMVM 2021-2030

Fuente: *Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2020b), Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM, 2020) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2020).*

15 Cuando se elaboró el ProAire anterior, el municipio de Tizayuca, Hidalgo, no estaba considerado como parte de la ZMVM.

16 Se consideran como medidas y acciones de competencia federal las siguientes: 2.1, 19.1, 19.2, 41.1, 44.1, 45.1, 46.1, 50.1, 53.1, 61.1, 62.1, 69.1, 80.1 y 81.1. Las medidas 14 y 79 contaban con acciones de competencia federal, en específico la 14.2, la 14.3 y la 79.5, pero para las evaluaciones por medida se consideraron como medidas locales.

17 El código le asigna una letra a la medida dependiendo del grado de avance de implementación que esta tenía a la fecha en la que se realizó la evaluación. La letra "A" indica que la medida está a tiempo de implementarse en su totalidad, la letra "B" que su implementación está demorada, la letra "C" que se encuentra en riesgo de realizarse y, finalmente, la letra "D" indica indica que no se tienen metas en el periodo a evaluar o que no se cuenta con información para la evaluación.

Tabla 3.18 Reducción de emisiones asociada a medidas y acciones selectas del ProAire ZMVM 2011-2020, entre 2012 y 2020

Medida o acción	Reducción de emisiones (toneladas/años)									
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	CO	NO_x	COV	SO_2	CN	CO_2	CO_2e [18]
Medida 14. Modernización y homologación del programa de verificación vehicular (PVVO).	1685.84	1278.53	600 409.88	79 885.88	28 740.14	228.95	479.13	17 571 025.08	17 737 333.26
Acción 15.1 Fortalecer la aplicación del programa para la sustitución de convertidores catalíticos.	N/A	N/A	132 195.88	6835.75	12 297.58	N/A	N/A	124 284.98	5763.75
Acción 16.1 Fortalecer el programa ostensiblemente contaminante con nuevo equipo para su operación y tecnología de detección.	88.58	63.04	6544.57	1405.53	819.96	3.94	24.17	221 068.76	222 455.30
Medida 18. Modernización del programa “Hoy No Circula” (HNC).	1485.32	907.67	166 660.27	26 416.12	19 266.43	58.53	289.39	4 545 210.56	4 649 031.62
Acción 22.1. Renovar la flota vehicular de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad de la ZMVM.	61.10	50.06	10 349.79	1238.48	1123.60	-0.05	11.82	-11 045.66	-4738.24
Acción 23.1. Promover el uso de combustibles menos contaminantes en vehículos de transporte público de pasajeros y de carga.	30.67	24.13	144.51	525.58	22.48	0.09	15.01	29 211.55	27 273.38
Acción 25.1. Fortalecer el programa de autorregulación de vehículos a diésel.	284.65	219.01	1547.85	3674.58	337.84	1.66	98.46	288 059.86	288 280.45
Acción 30.3. Continuar con Fortalecer el programa de autoAcción 30.3. Continuar con el establecimiento de rutas exprés, locales y metropolitanas de transporte público, así como continuar promoviendo la construcción de los sistemas de transporte público de alta capacidad y eficiencia.	61.57	33.33	9606.71	956.58	945.61	5.11	7.87	221 952.17	227 143.72
Acción 39.1. Promover el uso de la bicicleta como un medio de transporte en la ZMVM.	0.75	0.24	83.43	9.95	9.30	0.05	0.04	3757.20	3796.66
Acción 47.1. Establecer instrumentos de reducción adicional de emisiones con la iniciativa privada.	4194.14	1397.38	N/A	1192.22	1324.88	N/A	162.06	N/A	N/A
SUBTOTAL	**7892.62**	**3973.39**	**927 542.89**	**122 140.67**	**64 887.82**	**298.28**	**1087.95**	**22 993 524.50**	**23 156 339.90**

Fuente: *Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020.*

3.7.2 Reducción de emisiones contaminantes

No todas las acciones definidas dentro de un ProAire tienen un impacto directo sobre la reducción de emisiones de contaminantes primarios y precursores de contaminantes secundarios. Por ejemplo, algunas de las acciones pueden estar orientadas hacia el fortalecimiento institucional, la actualización de marcos legales, el monitoreo de la calidad del aire, la prevención de riesgos y la disminución de la exposición de la población a episodios de contaminación atmosférica severa. Para la evaluación de los beneficios directos en la reducción de emisiones contaminantes, se tomó en cuenta la reducción por contaminante entre 2012 y 2020, para 10 acciones del ProAire ZMVM 2011-2020, las cuales contaban con una meta de reducción específica. Los resultados de la evaluación se resumen en la Tabla 3.15.

18 El dióxido de carbono equivalente (CO_2e) es una métrica que se utiliza para expresar el total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), medidos por su equivalencia en CO_2. Se determina multiplicando la masa de emisiones de un GEI en específico –por ejemplo el CH_4 o el óxido nitroso (N_2O)– por su potencial de calentamiento global; este resultado es comparable con las emisiones de otros GEI expresadas como CO_2e, por lo que se pueden sumar.

En cuanto a la reducción de emisiones de precursores de O_3, la SEDEMA, en colaboración con el BSC, realizó una evaluación del impacto del ProAire ZMVM 2011-2020 sobre los niveles de O_3 en la ZMVM (BSC-SEDEMA, 2017). Se modelaron los impactos de aplicar 13[19] acciones del ProAire, consideradas de gran potencial para la reducción de precursores de O_3 (NO_X y COV). La evaluación concluyó que las medidas más efectivas del ProAire se relacionan con las fuentes móviles, en específico la modernización del Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO) y la aplicación del programa "Hoy No Circula" (HNC), lo que implica una reducción mucho más elevada de NO_X que de COV. Este factor, aunado a que en la ZMVM la formación de O_3 está limitada por COV, provoca reducciones no significativas (e inclusive incrementos) en la concentración de O_3 en el aire ambiente.

Evaluaciones previas han concluido que, en el caso de las partículas, las políticas han priorizado la reducción de emisiones primarias, ya que estas solían tener una mayor contribución a la masa total de partículas suspendidas. Sin embargo, actualmente los resultados del monitoreo indican que los aerosoles de origen secundario tienen una aportación significativa, particularmente en la fracción fina (<2.5 µm). Las acciones del ProAire ZMVM 2011-2020 se enfocaron en el control de fuentes primarias, por lo que el impacto fue menor en la reducción de concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ en comparación con el impacto global sobre los niveles de PM_{10}. La reducción de emisiones primarias de $PM_{2.5}$ estuvo ligada principalmente a medidas efectivas para el control de emisiones de fuentes móviles.

3.7.3 Mejoras en la calidad del aire

Aunque es posible cuantificar la reducción de emisiones asociada a la implementación de las medidas del ProAire ZMVM 2011-2020, el análisis de las tendencias en la calidad del aire[20] a través de las mediciones directas del SIMAT es la principal herramienta que permite evaluar el impacto a largo plazo que han tenido los programas y políticas públicas sobre la reducción en los niveles de contaminantes criterio en el aire ambiente, lo cual conlleva una disminución de la exposición de la población a concentraciones peligrosas.

Desde 2010, prácticamente todos los contaminantes, con excepción del CO, muestran una tendencia estable. Esto evidencía que la instrumentación de acciones encaminadas a reducir la contaminación atmosférica ha tenido un impacto positivo. La estabilización de la concentración de los contaminantes atmosféricos no es un indicador de una mala gestión de la calidad del aire, sino que se debe de tomar en cuenta el crecimiento poblacional, el aumento progresivo en el parque vehicular y la expansión urbana en la ZMVM durante la última década, factores que, en ausencia de cualquier medida de gestión de la calidad del aire, derivarían en un aumento en los niveles de contaminación. Este comportamiento moderado contrasta con las reducciones significativas en la concentración de contaminantes criterio que se habían observado a partir de la década de los noventa.

La tendencia descendente para CO y NO_X se ha mantenido en la última década, lo que refleja el efecto que han tenido las medidas del ProAire ZMVM 2011-2020 dirigidas a controlar las emisiones de fuentes móviles. La modernización del programa de detección y retiro de vehículos ostensiblemente contaminantes, la renovación de las flotas vehiculares de transporte de pasajeros de baja, mediana y alta capacidad, el fortalecimiento del programa de sustitución de convertidores catalíticos, la mejora tecnológica en los vehículos, el PVVO y el programa HNC han tenido, en conjunto, un impacto positivo sobre la calidad del aire respecto de emisiones provenientes de fuentes móviles; es importante mencionar que el PVVO y el HNC son los políticas que aportan las mayores reducciones de contaminantes.

En relación con la concentración de O_3, esta se ha mantenido prácticamente constante y, desde el 2006, las variaciones en el promedio mensual del contaminante no han sido estadísticamente significativas. Sin embargo, se observa una tendencia incipiente en el aumento de los niveles de O_3 a partir de 2015. Esto puede ser ocasionado por diferencias en el impacto que han tenido las políticas de reducción de emisiones de precursores de O_3; solamente los NO_X muestran una tendencia ligera a la baja, mientras que el impacto del ProAire ZMVM 2011-2020 sobre la reducción de COV ha sido menor en comparación. Por lo tanto, en una región como la ZMVM, donde la formación de O_3 está limitada por COV, las medidas planteadas resultan insuficientes para observar una disminución en la concentración de O_3, aunado al impacto que tienen las condiciones meteorológicas y topográficas en la acumulación de contaminantes atmosféricos.

Con el propósito de contribuir al desarrollo del ProAire para la ZMVM 2011-2020, durante su elaboración se realizó una simulación de escenarios con y sin la aplicación de algunas de las medidas que se incluyeron en el programa (disponible en el Anexo 8 del ProAire anterior). La simulación se realizó con la finalidad de estimar el beneficio esperado que se tendría en la calidad del aire por O_3, derivado de la instrumentación del ProAire[21]. Los principales resultados de la simulación muestran que, sin la implementación de las medidas analizadas, habría un ligero aumento de la contaminación por O_3 a las 15:00 horas, cuando normalmente se registran los picos más altos del contaminante. También se concluyó que la aplicación de las medidas de control sobre las emisiones vehiculares proyectadas al 2020 tendrían efectos favorables en la mitigación de la contaminación.

No obstante, el análisis de tendencia de la concentración de O_3 muestra que el impacto en la reducción de los niveles de contaminación desde 2010 ha sido poco significativo. Desde 2008, la variación en el registro de horas por encima del límite normado de 95 ppb durante la temporada de O_3 no muestra una tendencia a la baja. Las variaciones observadas pueden responder a cambios en la meteorología regional o global (p. ej. el fenómeno ENOS) y a los cambios en la química atmosférica por la relación entre NO_X y COV.

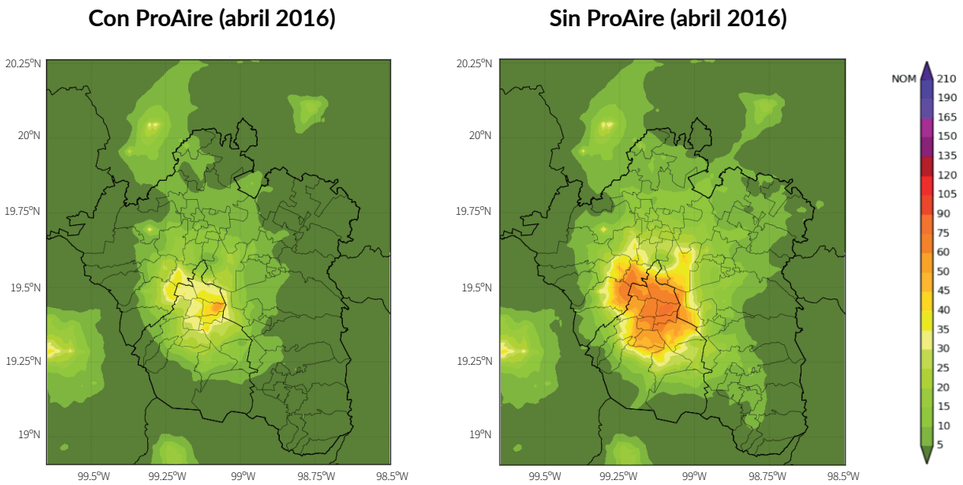
La colaboración entre el BSC y la SEDEMA para la evaluación del ProAire tuvo conclusiones consistentes con los datos observados. Bajo las condiciones meteorológicas y topográficas de la ZMVM, la aplicación de las acciones de reducción de emisiones de precursores de O_3 planteadas en el ProAire ZMVM 2011-2020 inclusive podrían implicar aumentos en las concentraciones máximas horarias del contaminante (hasta +10 ppb, dependiendo de las condiciones meteorológicas), derivado de reducciones de NO_X muy superiores a las reducciones de COV (BSC-SEDEMA, 2017) y un cambio en la relación COV/ NO_X.

No obstante, se determinó que en el caso de no haberse realizado ninguna medida del ProAire entre los años 2012 a 2016, las emisiones de NO_X y COV se hubieran incrementado en un 130% y 32%, respectivamente. Por ejemplo, la Figura 3.25 compara la distribución espacial de la concentración de NO_2 en la ZMVM con y sin la aplicación de las medidas del ProAire ZMVM 2011-2020; el modelo estimó un incremento promedio de 26 ppb de NO_2 en la ZMVM de no haberse instrumentado el ProAire y un aumento diario máximo de hasta 80 ppb. También se muestra el resultado de la simulación de concentraciones promedio horarias en la estación Iztacalco (IZT), un sitio de monitoreo urbano.

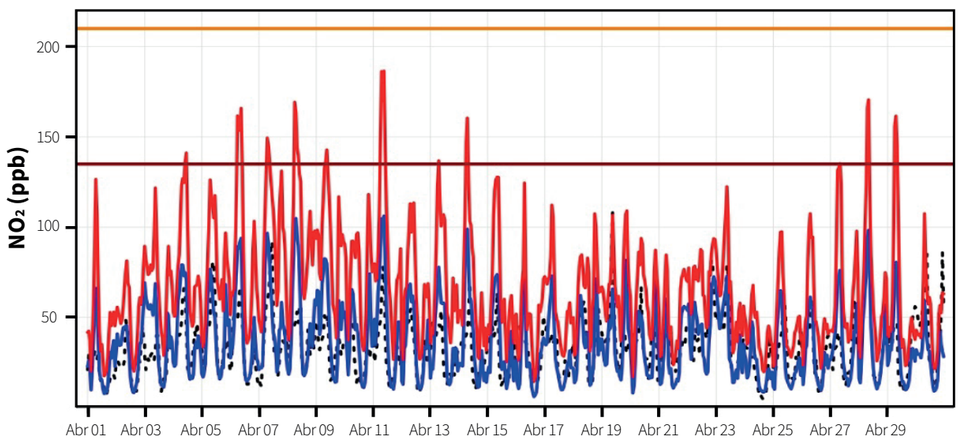
19 Las acciones evaluadas se enmarcan mayoritariamente dentro de la Estrategia 3 (Calidad y eficiencia energética en todas las fuentes; acciones 14.1, 15.1, 16.1, 17.1, 18.1, 22.1, 23.1, 25.1) y en menor medida en la Estrategia 4 (Movilidad y Regulación del consumo energético del parque vehicular; acciones 30.3, 30.4, 37.1, 39.1) y la Estrategia 5 (Cambio tecnológico y control de emisiones; acción 47.1).

20 Consultar el análisis de tendencia en el apartado 3.4.6 del presente Capítulo y el Anexo 3.3 del ProAire. También se puede revisar el análisis completo en el Capítulo 3 del Informe Anual de Calidad del Aire 2018 de la SEDEMA.

21 Se recomienda consultar el Anexo 8 del Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (SEDEMA *et al.*, 2011).



Nota: Promedio horario de NO_2 (ppb) para todo el mes de abril bajo distintos escenarios de aplicación del ProAire ZMVM 2011-2020



Nota: Concentraciones promedio horarias de NO_2 (ppb) observadas (negro) y simuladas utilizando el escenario de aplicación del ProAire ZMVM 2011-2020 (azul) y sin ProAire (rojo) en la estación urbana Iztacalco (IZT) para abril de 2016. La línea horizontal naranja representa el límite horario de la NOM-023-SSA1-1993; la línea horizontal roja corresponde a la guía de la OMS para la concentración horaria.

Figura 3.29 Impacto de la implementación del ProAire ZMVM 2011-2020 en el promedio horario de dióxido de nitrógeno

Fuente: *BSC-SEDEMA, 2017.*

Si se continúa con las acciones y programas actuales, se esperan reducciones al 2020 del 21% de NO_x y 8% de COV. En cuanto a la formación de O_3 se presentarían disminuciones en los promedios horarios de alrededor de 2.2 ppb en la ZMVM y de 1.5 ppb en la Ciudad de México durante las horas de máximas concentraciones (14:00 a 16:00 horas). Se concluye que una reducción más significativa de concentraciones de O_3 solo se podrá lograr con medidas adicionales que disminuyan las emisiones de COV, por lo que se recomienda la implementación de acciones exclusivas para este contaminante.

Para partículas suspendidas, el análisis de tendencia muestra una disminución ligera en la concentración de PM_{10}, en tanto que la concentración de $PM_{2.5}$ se mantuvo estable en la última década. La evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020 realizada por la SEDEMA y el BSC concluyó que el impacto principal de la implementación de las acciones descritas en el ProAire anterior fue sobre emisiones de partículas primarias provenientes de fuentes móviles. Por ejemplo, se determinó que la aplicación del Programa durante 2017-2020 implicó una reducción promedio de $PM_{2.5}$ en la ZMVM de -0.5 $\mu g/m^3$ (-2%). El escaso impacto se asocia a una baja reducción de emisiones primarias de $PM_{2.5}$ (-7%), el aporte de fuentes de área con un mayor grado de complejidad en su control y reducción de emisiones, así como la elevada contribución de aerosoles orgánicos secundarios formados por la oxidación de COV. Es así que la baja reducción de emisiones de COV observada en la ZMVM (-8%) justifica el impacto limitado del ProAire. Dado que las $PM_{2.5}$ tienen una importante contribución de partículas secundarias, un nuevo reto implica el estudio de los procesos responsables de la formación de aerosoles secundarios, así como la identificación y control de sus principales precursores, los cuales incluyen NO_x, SO_2 y COV (SEDEMA, 2018a).



3.7.4 Lecciones aprendidas

De la evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020 se desprenden las siguientes conclusiones y lecciones aprendidas:

- Se redujo efectivamente los niveles de contaminación por NO_2 y, en menor medida, de $PM_{2.5}$, en la ZMVM. La mayor efectividad en la reducción de emisiones derivó de acciones dirigidas hacia fuentes móviles, como la modernización del PVVO y el programa HNC.
- Dentro de las acciones con impactos directos en la reducción de precursores de O_3, se destaca la reducción de NO_X por el control de emisiones de fuentes móviles. Se reconoce que estas acciones han logrado contener un incremento acelerado de los niveles de concentración de O_3, mas no disminuirlos, por lo que estas regulaciones no han sido suficientes para dar respuesta a los problemas de O_3 que existen actualmente en la ZMVM. Esto no implica que deban dejarse de aplicar medidas de reducción de emisiones para fuentes móviles. Este sector es una de las principales fuentes de partículas $PM_{2.5}$ primarias, como el carbono negro, y de precursores de aerosoles secundarios y O_3, como los NO_X y COV.
- Debido a que los niveles de O_3 en la última década se han mantenido estables, para lograr que la contaminación disminuya de manera significativa en la ZMVM, las políticas deben de priorizar el control de precursores, particularmente COV. Las políticas destinadas a reducir las emisiones derivadas de fuentes móviles se deben combinar con políticas de reducción de emisiones de COV procedentes de fuentes de área y, en particular, del uso de solventes en productos utilizados a nivel residencial, comercial, servicios e industrial, así como del consumo de gas L.P.
- Se deben seguir impulsando medidas para el control de COV procedentes de fuentes industriales locales y federales. En el caso de las emisiones generadas en el sector industrial, en enero de 2020 se publicó la norma NADF-011-AMBT-2018, que establece los criterios para la reducción de las emisiones a la atmósfera de COV emitidos por fuentes fijas de competencia de la Ciudad de México. Sin embargo, se debe impulsar la generación de políticas públicas que apliquen a toda la ZMVM o, en dado caso, de manera nacional.
- Es necesario mantener actualizadas las medidas destinadas a disminuir las emisiones de fuentes móviles (p. ej. el PVVO y el HNC), para impactar en una mayor cantidad de vehículos circulantes y promover el uso de tecnologías más limpias y eficientes.
- Un ProAire debe evaluar las medidas y acciones propuestas en él, mediante herramientas que simulen la reducción de emisiones y su impacto en la calidad del aire, con base en un inventario de emisiones actualizado, así como sus respectivas proyecciones a futuro. Esto fortalece el proceso de toma de decisiones para establecer metas viables y alcanzables, así como específicas y cuantitativas, en términos de la reducción de contaminantes primarios y precursores.
- Se debe fortalecer el trabajo colaborativo entre la Ciudad de México, el Estado de México y Tizayuca, Hidalgo, ya que en el ProAire ZMVM 2011-2020 el seguimiento y evaluación solo se pudo hacer de manera exhaustiva para las acciones aplicadas dentro de la Ciudad de México.
- Para la implementación del total de las medidas propuestas en el ProAire, la colaboración entre los gobiernos locales de la ZMVM y el Gobierno Federal es imprescindible, puesto que muchas fuentes están relacionadas con sectores o productos regulados a nivel federal. Un ejemplo de esto es la normatividad para limitar emisiones de COV por el uso de productos.
- Es fundamental reforzar el marco normativo, la vigilancia y el reporte de acciones de jurisdicción local, así como el establecimiento de sanciones para el cumplimiento de la normatividad y programas vigentes.
- Se debe fortalecer el trabajo colaborativo entre la Ciudad de México, el Estado de México y Tizayuca, Hidalgo, para mejorar la cobertura del monitoreo y homologar las prácticas de operación de los equipos.
- Se deben buscar mecanismos de financiamiento para el apoyo de las políticas y actividades que permitan su implementación y seguimiento.
- Se requiere mayor participación de todos los involucrados en la aplicación de las estrategias y comunicación entre áreas.
- Es fundamental incorporar el principio de igualdad sustantiva y lograr la transversalidad de la perspectiva de género en el ProAire ZMVM 2021-2030, por lo que se recomienda que futuras evaluaciones caractericen la relación entre las evaluaciones de calidad del aire e indicadores socioculturales que evidencien los impactos diferenciados de la contaminación atmosférica tanto en territorios, como entre mujeres y hombres. Asimismo, será importante documentar como factores ligados al género se relacionan con los procesos antropogénicos que dan origen a la contaminación atmosférica, como el uso y generación de energía, el transporte, las actividades industriales, el uso de productos químicos, actividades agropecuarias y la disposición de residuos.[22]
- Se deben fortalecer los esquemas de gobernanza para hacer frente a la problemática de calidad del aire en la Megalópolis, con el objetivo de sumar los esfuerzos que realizan los distintos gobiernos locales, en conjunto con el Gobierno Federal. En específico, es necesario ampliar la gestión de la calidad del aire a las cuencas atmosféricas aledañas a la ZMVM, particularmente en la cuenca de Tula, e implementar acciones y medidas ambiciosas que respondan a la evidencia científica disponible y que limiten el impacto negativo en la calidad del aire asociado al corredor industrial Tula-Vito-Apasco, catalogado como Zona Crítica por sus niveles de emisiones.

22 Esta recomendación se enfoca en fortalecer los compromisos adquiridos ante los tratados internacionales expuestos en el Capítulo 2, y en atención a las recomendaciones de la Secretaría de las Mujeres de la Ciudad de México.

3.8 Evidencia científica reciente sobre calidad del aire y química atmosférica en la ZMVM

A nivel global, se tiene un progreso sustancial en la mejora del entendimiento científico sobre las características de las fuentes de emisión de contaminantes del aire, el transporte y transformación de estos en la atmósfera, y su impacto en la salud humana, los ecosistemas y el clima. Asimismo, el desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido mitigar las emisiones contaminantes asociadas a distintas actividades como el transporte y los procesos industriales. Sin embargo, queda mucho por comprender acerca de los complejos procesos de química atmosférica y los mecanismos que derivan en la formación de especies como el O_3 y aerosoles secundarios, particularmente aquellos que contienen especies orgánicas (Molina, 2021). Adicionalmente, se debe generar más conocimiento sobre las fuentes de emisión emergentes y los cambios en los perfiles de emisión que resultan de la implementación de cambios tecnológicos y regulatorios, para evaluar su impacto en la química atmosférica. También se destaca la relevancia de continuar investigando las posibles interacciones entre el cambio climático, la calidad del aire y la salud pública.

Entender los procesos que rigen el comportamiento de la contaminación atmosférica es de particular interés en megaciudades como la ZMVM, donde se registran tasas elevadas de emisiones que ponen en riesgo a la salud de la población e implican costos económicos y sociales elevados. En este sentido, las políticas de calidad del aire deben basarse en información científica y técnica para maximizar la efectividad en el control de la contaminación y proteger la salud pública. Los estudios de campo intensivos periódicos son una herramienta fundamental que, en conjunto con los inventarios de emisiones actualizados, el monitoreo continuo de la calidad del aire y los modelos numéricos, permiten abordar las causas que desencadenan la contaminación del aire y apoyar el diseño de políticas de control de emisiones rentables (Velasco *et al.,* 2021).

En la ZMVM se han realizado diversos estudios y campañas de campo intensivas que han permitido identificar y caracterizar los procesos químicos y meteorológicos que influyen en la formación de O_3, partículas secundarias y otros contaminantes, así como su transporte y transformación en la atmósfera. En específico, se resaltan los resultados de la campaña MCMA-2003 (Molina *et al.,* 2007), conducida por un equipo multidisciplinario del Instituto Tecnológico de Massachusetts, y la campaña MILAGRO-2006, liderada por Luisa Molina (Molina *et al.,* 2010). Desde entonces, han habido relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM, aunque el SIMAT de la Ciudad de México y distintos centros de investigación, como el CCA de la UNAM, han desarrollado estudios especiales para ampliar el entendimiento de los procesos de química atmosférica en la ZMVM. A continuación, se resumen algunas de las conclusiones principales de estas campañas, así como de estudios relacionados (Molina *et al.,* 2019):

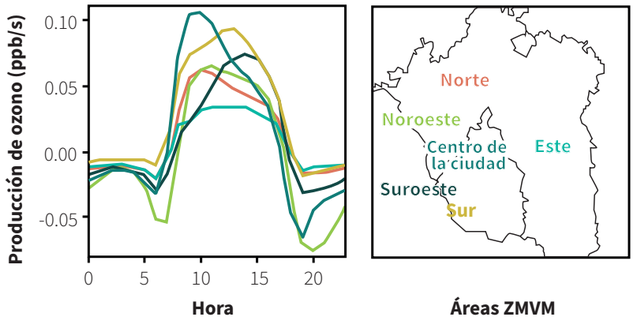
Meteorología: Las campañas permitieron definir una clasificación para los episodios de contaminación (ver Figura 1.15 en el Capítulo 1) y evaluar cómo la meteorología regional y de gran escala influye en los niveles de O_3 (de Foy *et al.*, 2005, 2008). También se ha identificado una variabilidad estacional en los niveles de O_3 producto de los cambios en la nubosidad en la tropósfera alta, fenómeno que es modulado por la Oscilación Madden – Julian (Barrett & Raga, 2016), así como intrusiones de O_3 estratosférico en la capa límite (Barrett *et al.*, 2019). Por otro lado, García-Yee *et al.* (2018) caracterizó cómo los límites permisibles nacionales para O_3 no se excedían durante días con sistemas de baja presión, mientras que los sistemas anticiclónicos o de alta presión se asociaron a excedencias de los límites normados. Se destaca también la necesidad de evaluar cómo el incremento en la temperatura, registrado por el SIMAT en años recientes, impacta la calidad del aire, y determinar si los cambios en la calidad del aire se deben a variaciones en la meteorología, modificaciones en las emisiones o cambios en la química atmosférica.

Compuestos orgánicos volátiles: Se midieron múltiples especies de COV durante las campañas MCMA-2003 (Jobson *et al.*, 2010; Velasco *et al.*, 2007) y MILAGRO-2006 (Apel *et al.*, 2010; Bon *et al.*, 2011; de Gouw *et al.*, 2009; Fortner *et al.*, 2009). Por ejemplo, las campañas determinaron que el consumo de gas L.P. es una fuente de alcanos de bajo peso molecular, mientras que las emisiones evaporativas en fuentes móviles e industriales generan COV aromáticos y metanol. Desde entonces, se han generado datos muy limitados sobre la especiación de COV, aunque se resalta que el SIMAT ha realizado campañas para medir hidrocarburos distintos del metano. Un estudio reciente midió 64 COV y reportó que la mayoría de las emisiones provienen de emisiones vehiculares y el uso de solventes (Garzón *et al.*, 2015).

Fotoquímica urbana y regional: La formación de O_3 en la ZMVM depende no solo de la concentración de COV y NO_X, sino de su relación. Las mediciones de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 mostraron cómo la formación de O_3 estaba generalmente limitada por COV en la zona urbana, y mayoritariamente limitada por NO_X en las periferias, dependiendo de las condiciones meteorológicas (Lei *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2010; Tie et al., 2007). Cuando la formación de O_3 es sensible a NO_X, un incremento en los COV generalmente provoca aumentos en la concentración de O_3, mientras que si los NO_X se elevan, el O_3 disminuye; el régimen de O_3 limitado por COV es frecuentemente observado en áreas urbanas densamente pobladas, como la ZMVM. Asimismo, se caracterizó el papel del nitrato de peroxiacilo en la regeneración de los NO_X y su contribución a la producción regional de O_3 (Mena-Carrasco et al., 2009).

Partículas suspendidas: Se encontró que en el centro de la ZMVM la fracción fina de partículas estaba compuesta principalmente por material orgánico (50%), inorgánico secundario (25%), carbono negro y partículas minerales. En contraste, la fracción mineral fue más importante (36%) en las afueras de la ciudad, mientras que el carbono negro también mostró concentraciones levemente superiores (Aiken et al., 2010; Querol *et al.*, 2008). Volkamer *et al.*, (2006) observó que la producción de aerosoles orgánicos secundarios en la ZMVM era más rápida y alta de lo esperado, según modelos atmosféricos y simulaciones de laboratorio. Los aerosoles orgánicos secundarios representan una gran fracción de las partículas, y su formación, evolución e impactos climáticos requieren mayor comprensión e investigación. En este sentido, el SIMAT ha realizado estudios para determinar la composición química de las partículas y generar información para mejorar la gestión de la calidad del aire. Un estudio de campo de 2015 señaló que la formación de aerosoles secundarios podría tener una variabilidad espacial sustancial (Salcedo *et al.*, 2018). Además de estudiar esta variabilidad espacial, también se necesitan estudios a largo plazo para verificar la variabilidad estacional en la química de los aerosoles. Además, otra prioridad es estudiar las propiedades radiativas de las partículas suspendidas, puesto que la quema de biomasa puede tener impactos importantes en la absorción o calentamiento por la emisión de carbono negro a escala urbana y regional. Paredes-Miranda et al. (2013) compararon la variación diaria de los coeficientes de absorción y dispersión de carbono negro en cinco ciudades de todo el mundo y encontró que la Ciudad de México tenía los valores más altos. Por su parte, Retama et al. (2015) encontraron una fuerte variación estacional en las concentraciones de carbono negro en la ZMVM.

Respecto de la formación de O_3, estudios recientes evidencian los cambios en la química atmosférica y la sensibilidad de las reacciones fotoquímicas que producen O_3, respecto de sus precursores. En específico, un estudio reciente de Zavala *et al.* (2020) concluyó que la reactividad de los COV se ha reducido durante las primeras horas de la mañana en la zona urbana, con variabilidades espaciales significativas. Esto implica que la producción de O_3 y su sensibilidad a los COV y NO_X también varía regionalmente dentro de la ZMVM (ver Figura 3.30). Si bien los alcanos provenientes de las fugas e hidrocarburos no quemados durante el consumo de gas L.P. siguen siendo un contribuyente clave en la reactividad de los COV en la atmósfera, el aporte de compuestos aromáticos y alquenos ha disminuido de forma consistente con la reducción de emisiones en fuentes móviles. Los cambios en la producción de O_3 sugieren que los elevados niveles de O_3 en años recientes se asocian al incremento en la contribución relativa de COV oxigenados emitidos por el uso de solventes en productos cosméticos y de cuidado personal, de uso doméstico, comercial e industrial. El estudio también encontró un aumento significativo en la relación NO_2/NO, lo cual podría ocasionar cambios en la acumulación nocturna de radicales e impactar la fotoquímica durante las primeras horas de la mañana. Estos resultados muestran la necesidad de nuevos estudios de campo intensivos para investigar el comportamiento de radicales y la formación de especies secundarias, así como expandir la medición de COV y generar datos de monitoreo para apoyar estudios de modelación y el diseño de nuevas políticas de gestión de la calidad del aire.



Nota: Se muestra el perfil horario de la producción de ozono, en ppb/s.

Figura 3.30 Variación espacial de la producción de ozono en la ZMVM
Fuente: *Zavala et al. (2020).*

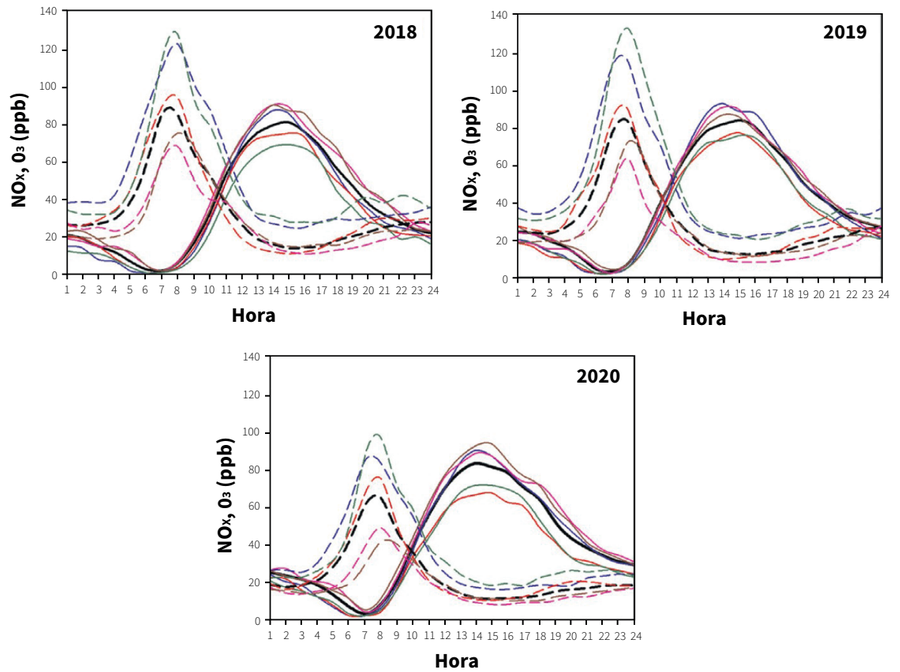
A raíz de la pandemia por COVID-19, la suspensión de actividades y las restricciones en la circulación de vehículos para limitar los contagios, se registraron reducciones en las emisiones de contaminantes del aire en todo el mundo (Bauwens *et al.,* 2020), en particular gases de combustión como los NO_X y el CO que provienen en su mayoría de fuentes móviles, así como de partículas suspendidas. No obstante, en algunas ciudades, los niveles de contaminantes secundarios no mejoraron, dada la compleja relación entre las emisiones, la meteorológica y la química atmosférica (Kroll *et al.,* 2020; Le *et al.,* 2020). Es así que esta situación representó una oportunidad excepcional para estudiar de forma naturalista las complejas interacciones entre las emisiones, la meteorología y los procesos de química atmosférica que derivan en el deterioro de la calidad del aire, con el objetivo de identificar retos y aprovechar oportunidades.

Anteriormente se resumieron los datos del monitoreo del SIMAT durante marzo y abril de 2020, meses donde se registraron las mayores reducciones en el tránsito vehicular en la ZMVM (ver sección 3.6.2)

por la contingencia sanitaria. Además, se destaca que el inicio de las restricciones empató con la temporada de O_3 en la ZMVM. El monitoreo comprobó que la concentración promedio de todos los contaminantes disminuyó, a excepción del O_3. Este comportamiento es similar a lo observado en otras megaciudades y regiones del mundo (Molina, 2021), y se puede asociar a condiciones fotoquímicas favorables para la formación de O_3, por ejemplo:

- Mayor incidencia de radiación solar por la reducción en emisiones primarias de contaminantes.
- Disminución en la concentración de NO_X, que provoca aumentos en la concentración de O_3 en atmósferas sensibles a COV.

La Figura 3.31 muestra cómo el perfil horario de O_3 entre marzo y mayo de 2020 se mantuvo prácticamente igual a lo observado en los dos años anteriores, pese a las reducciones en la concentración de NO_X. El estudio de Peralta *et al.* (2021) concluyó que la disminución en los niveles de NO_X fue tan drástica que la formación de O_3 y la relación COV/NO_X se desplazó hacia un régimen sensible a NO_X.



Nota: Los perfiles horarios se construyeron a partir de las medianas de los promedios de 1 hora de O3 y NOX , para el periodo del 1° de marzo al 31 de mayo. Se grafican datos para toda la ZMVM y para cinco estaciones selectas.

Figura 3.31 Cambios en el perfil horario de ozono y óxidos de nitrógeno en la ZMVM durante la contingencia sanitaria por COVID-19
Fuente: *Peralta et al. (2021).*

Peralta *et al.* (2021) también resaltan la importancia de evaluar los cambios en las emisiones de COV y su impacto en la relación COV/NO_X. Es claro que la contaminación por O_3 en la ZMVM no puede atribuirse exclusivamente al transporte, sino que también influyen otras fuentes que deben ser atendidas por los programas de gestión de la calidad del aire. Durante la pandemia, se puede asumir que el uso doméstico de combustibles para la cocción de alimentos aumentó, aunque se registró una disminución global en la emisión de otras fuentes, especialmente por la combustión de gasolina en fuentes móviles. Los cambios en las emisiones por la quema de diésel pudieron haber sido menores, puesto que este combustible se usa principalmente en vehículos pesados de transporte público y de carga. Asimismo, es posible que hubiesen incrementos en emisiones de COV por el uso de productos de limpieza y desinfección, y que las altas temperaturas de la temporada incrementaran las emisiones biogénicas. El estudio concluyó que, para desarrollar estrategias efectivas que reduzcan la contaminación por O_3, se deben seguir estudiando las complejas relaciones entre los COV y NO_X, así como los cambios en las emisiones urbanas y rurales. En este sentido, la falta de datos de monitoreo de COV en la ZMVM es una de las principales barreras para generar datos que faciliten el diseño de políticas focalizadas.

El INECC, la CAMe y la SEMARNAT también organizaron un taller para revisar hallazgos científicos sobre la calidad del aire durante la contingencia sanitaria por COVID-19. Además de resaltar puntos similares a lo discutido anteriormente, las memorias del taller (SEMARNAT *et al.*, 2020) puntualizaron el papel que tuvieron las fuentes fijas contaminantes y los incendios forestales como generadores de precursores de O_3 en marzo y abril de 2020, y la necesidad de diseñar acciones más eficientes para limitar la emisión de precursores, por ejemplo, a través de nuevas normas ambientales para controlar las fuentes contaminantes no vehiculares.

La ZMVM también enfrenta retos en la gestión de la calidad del aire por la contribución regional a la contaminación de fuentes externas y el transporte transfronterizo de contaminantes en cuencas de la Megalópolis (Molina, 2021). En este contexto, el monitoreo de la calidad del aire y los estudios de contaminación atmosférica son más escasos y limitados fuera de la ZMVM, lo cual complica la evaluación de la calidad del aire a nivel regional (Molina *et al.*, 2019). Por ejemplo, los incendios forestales y agrícolas en estados aledaños son una fuente de aerosoles orgánicos, COV y otras especies reactivas que afectan la calidad del aire en la ZMVM, como se describió en la sección 3.6.1. La quema de biomasa es otra fuente importante de aerosoles orgánicos primarios y secundarios, así como carbono elemental (Lei *et al.*, 2013).

No obstante, en años anteriores, el INECC ha preparado diagnósticos sobre la calidad del aire en la región centro del país y el transporte transfronterizo de contaminantes (UNAM & INECC, 2016). Las implicaciones del transporte de masas de aire contaminadas entre la cuenca del Valle de México y cuencas aledañas se describieron de forma general en la sección 1.3. Asimismo, en el Capítulo 5 se profundiza sobre el impacto en la calidad del aire de la ZMVM por la contribución regional de SO_2 transportado desde la cuenca de Tula, Hidalgo, donde la generación de electricidad y la refinación del petróleo generan volúmenes significativos de este contaminante.

También se puntualiza que es sumamente importante considerar la evidencia científica más reciente sobre las interacciones entre la calidad del aire, el cambio climático y la salud. El Capítulo 4 del ProAire presenta una revisión bibliográfica de evidencia reciente que muestra cómo el aumento de la temperatura media global, los cambios en patrones de viento y precipitación, entre otros impactos del cambio climático, pueden provocar una penalización o aumento de la contaminación por O_3 y $PM_{2.5}$, independientemente de las modificaciones en las emisiones. Por otra parte, el Capítulo 6 sintetiza evidencia epidemiológica reciente sobre los impactos a la salud por la mala calidad del aire y resume los resultados de estudios que cuantifican muertes evitables y los beneficios económicos que se observarían en caso de mejorar la calidad del aire en la ZMVM; además, presenta información sobre la relación entre la calidad del aire y el riesgo de infección por COVID-19, dado que distintos estudios han encontrado una relación directa entre los niveles de contaminación, la propagación del virus y la severidad de los síntomas de esta enfermedad.

Es importante comprender que mejorar la calidad del aire en la ZMVM requiere de un gran esfuerzo por parte de las entidades federativas involucradas y el Gobierno Federal, que deben basar sus decisiones y políticas de gestión de la calidad del aire en evidencia científica. Sin embargo, también entran en juego distintos retos institucionales, económicos y sociales que deben ser atendidos para poder desplegar cambios tecnológicos y regulatorios que reduzcan las emisiones en los sectores prioritarios según la evidencia científica. Ejemplo de estos retos es que, en 2006, el Centro Mario Molina publicó un informe para apoyar la elaboración de políticas y estrategias de mejora de la calidad del aire en la ZMVM (CMM, 2006). Muchas de las propuestas integradas en ese entonces siguen siendo vigentes, como lo demuestra la revisión de la literatura presentada y las lecciones aprendidas del ProAire anterior (ver sección 3.7). Algunas de las recomendaciones destacadas del informe son:

- Reducir las emisiones de partículas finas provenientes de procesos de combustión.
- Sustituir las unidades vehiculares más antiguas.
- Mejorar la movilidad y el transporte público de pasajeros, a través de incentivos de renovación vehicular, para reducir las emisiones de partículas finas y precursores de O_3. Se requieren normas y verificaciones más estrictas, y estandarizar los programas de detección de vehículos ostensiblemente contaminantes. Otras propuestas son el otorgamiento de certificaciones e incentivos a vehículos con mejor desempeño ambiental y rendimiento, definir requisitos tecnológicos de emisión y operativos para taxis, y aplicar programas de chatarrización. También se debe atender el tráfico inducido a causa del crecimiento urbano; esto se debe a la construcción y expansión de nuevas vialidades como resultado del crecimiento poblacional y el continuo uso de autos particulares, sin esquemas de desarrollo urbano sostenible.
- Limitar la contaminación de motocicletas, a través de su regulación y restricciones a su circulación.
- Ampliar el uso de combustibles con bajo contenido de azufre; esto requiere de vehículos con mejor tecnología y esquemas para promover la renovación de unidades.
- Controlar las emisiones de fuentes de área, como las fugas domésticas de gas L.P y emisiones evaporativas por el consumo de productos con contenido de COV (solventes, pinturas y barnices, por poner algunos ejemplos); también se deben expedir normas que regulen el contenido de COV en este tipo de productos.
- Aplicar medidas de gestión de la calidad del aire en cuencas atmosféricas alenadas a la ZMVM, especialmente en Tula.
- Reducir las emisiones de maquinaria agrícola y de construcción a través de normas y procedimientos de control de emisiones.

La siguiente sección enlista los documentos de interés consultados para integrar la presente sección:

Aiken, A.C. *et al.* 2010. Mexico city aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) – Part 2: Analysis of the biomass burning contribution and the non-fossil carbon fraction. Atmospheric Chem. Phys. 10, 5315–5341. https://doi.org/10.5194/acp-10-5315-2010

Apel, E.C. *et al.* 2010. Chemical evolution of volatile organic compounds in the outflow of the Mexico City Metropolitan area. Atmospheric Chem. Phys. 10, 2353–2375. https://doi.org/10.5194/acp-10-2353-2010

Barrett, B.S., Raga, G.B., 2016. Variability of winter and summer surface ozone in Mexico City on the intraseasonal timescale. Atmospheric Chem. Phys. 16, 15359–15370. https://doi.org/10.5194/acp-16-15359-2016

Barrett, B.S. *et al.* 2019. A Multiscale Analysis of the Tropospheric and Stratospheric Mechanisms Leading to the March 2016 Extreme Surface Ozone Event in Mexico City. J. Geophys. Res. Atmospheres 124, 4782–4799. https://doi.org/10.1029/2018JD029918

Bauwens, M. *et al.* 2020. Impact of Coronavirus Outbreak on NO2 Pollution Assessed Using TROPOMI and OMI Observations. Geophys. Res. Lett. 47, e2020GL087978. https://doi.org/10.1029/2020GL087978

Bon, D.M. *et al.* 2011. Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign: measurement comparison, emission ratios, and source attribution. Atmospheric Chem. Phys. 11, 2399–2421. https://doi.org/10.5194/acp-11-2399-2011

CMM, 2006. Elaboración de Políticas y Estrategias para la Comunicación orientadas al mejoramiento de la calidad del aire en la ZMVM. Disponible en: https://centromariomolina.org/calidad-del-aire-2/elaboracion-de-politicas-y-estrategias-para-la-comunicacion-orientadas-al-mejoramiento-de-la-calidad-del-aire-en-la-zmvm/

de Foy, B. *et al.* 2005. Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. Atmos Chem Phys 5, 2267–2288. https://doi.org/10.5194/acp-5-2267-2005

de Foy, B. *et al.* 2008. Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. Atmos Chem Phys 8, 1209–1224. https://doi.org/10.5194/acp-8-1209-2008

de Gouw, J.A. *et al.* 2009. Emission and chemistry of organic carbon in the gas and aerosol phase at a sub-urban site near Mexico City in March 2006 during the MILAGRO study. Atmospheric Chem. Phys. 9, 3425–3442. https://doi.org/10.5194/acp-9-3425-2009

Fortner, E.C. *et al.* 2009. Measurements of Volatile Organic Compounds Using Proton Transfer Reaction – Mass Spectrometry during the MILAGRO 2006 Campaign. Atmospheric Chem. Phys. 9, 467–481. https://doi.org/10.5194/acp-9-467-2009

García-Yee, J.S. *et al.* 2018. Characterization of NOx-Ox relationships during daytime interchange of air masses over a mountain pass in the Mexico City megalopolis. Atmos. Environ. 177, 100–110. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.017

Garzón, J.P. *et al.* 2015. Volatile organic compounds in the atmosphere of Mexico City. Atmos. Environ. 119, 415–429. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.014

Jobson, B.T. *et al.* 2010. Comparison of aromatic hydrocarbon measurements made by PTR-MS, DOAS and GC-FID during the MCMA 2003 Field Experiment. Atmospheric Chem. Phys. 10, 1989–2005. https://doi.org/10.5194/acp-10-1989-2010

Kroll, J.H. et al. 2020. The complex chemical effects of COVID-19 shutdowns on air quality. Nat. Chem. 12, 777–779. https://doi.org/10.1038/s41557-020-0535-z

Le, T. et al. 2020. Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China. Science 369, 702–706. https://doi.org/10.1126/science.abb7431

Lei, W., Li, G., Molina, L.T., 2013. Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City. Atmospheric Chem. Phys. 13, 2299–2319. https://doi.org/10.5194/acp-13-2299-2013

Lei, W. et al. 2008. Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City. Atmos Chem Phys 8, 7571–7581. https://doi.org/10.5194/acp-8-7571-2008

Mena-Carrasco, M. et al. 2009. Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry. Atmospheric Chem. Phys. 9, 3731–3743. https://doi.org/10.5194/acp-9-3731-2009

Molina, L.T., 2021. Introductory lecture: air quality in megacities. Faraday Discuss. 226, 9–52. https://doi.org/10.1039/D0FD00123F

Molina, L.T. et al. 2007. Air quality in North America's most populous city – overview of the MCMA-2003 campaign. Atmospheric Chem. Phys. 7, 2447–2473. https://doi.org/10.5194/acp-7-2447-2007

Molina, L.T. et al. 2010. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. Atmospheric Chem. Phys. 10, 8697–8760. https://doi.org/10.5194/acp-10-8697-2010

Molina, L.T. et al. 2019. Experience from Integrated Air Quality Management in the Mexico City Metropolitan Area and Singapore. Atmosphere 10. https://doi.org/10.3390/atmos10090512

Paredes-Miranda, G. et al. 2013. Black Carbon Aerosol Concentration in Five Cities and Its Scaling with City Population. Bull. Am. Meteorol. Soc. 94, 41–50. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00225.1

Peralta, O. et al. 2021. Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. Sci. Total Environ. 761, 143183. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143183

Querol, X. et al. 2008. PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 Campaign. Atmospheric Chem. Phys. 8, 111–128. https://doi.org/10.5194/acp-8-111-2008

Retama, A. et al. 2015. Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City. Atmospheric Chem. Phys. 15, 9693–9709. https://doi.org/10.5194/acp-15-9693-2015

Salcedo, D. et al. 2018. PM1 Chemical Characterization during the ACU15 Campaign, South of Mexico City. Atmosphere 9, 232. https://doi.org/10.3390/atmos9060232

SEMARNAT, CAMe, INECC, 2020. Taller Virtual: Hallazgos Científicos sobre la Calidad del Aire durante COVID-19. Memoria. Viernes 22 de septiembre de 2020. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/601193/MemoriaTallerHallazgosAireCOVID_dic17_2020.pdf

Song, J. et al. 2010. Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign. Atmos Chem Phys 10, 3827–3846. https://doi.org/10.5194/acp-10-3827-2010

Tie, X. *et al.* 2007. Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study. Atmos. Environ. 41, 1989–2008. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.053

UNAM, INECC, 2016. Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208883/Informe_Final_AECAME_20161230.pdf

Velasco, E. *et al.* 2007. Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns. Atmospheric Chem. Phys. 7, 329–353. https://doi.org/10.5194/acp-7-329-2007

Velasco, E. *et al.* 2021. Intensive field campaigns as a means for improving scientific knowledge to address urban air pollution. Atmos. Environ. 246, 118094. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118094

Volkamer, R. *et al.* 2006. Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: Rapid and higher than expected. Geophys. Res. Lett. 33. https://doi.org/10.1029/2006GL026899

Zavala, M. et al. 2020. Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. Atmos. Environ. 238, 117747. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117747

04

El impacto del cambio climático en la calidad del aire de la ZMVM

Los efectos del calentamiento global repercuten en procesos climáticos con consecuencias evidentes en la química atmosférica y la calidad del aire.

04



El contenido de este capítulo aborda el impacto que el cambio climático tiene en la calidad del aire, considerando la relación e influencia que ejerce sobre las concentraciones de contaminantes atmosféricos, en específico el ozono (O_3) troposférico y las partículas suspendidas $PM_{2.5}$[1]. Mediante una revisión de bibliografía especializada, se pretende analizar cómo los efectos del calentamiento global repercuten en procesos climáticos, tanto a escala regional como a nivel local en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), con consecuencias evidentes en la química atmosférica y la calidad del aire. En este contexto, el capítulo discute las bases para la adopción de acciones y políticas públicas que consideren al cambio climático como un factor integral y sinérgico en la gestión de la calidad del aire, que se traduzcan en beneficios

1 Las partículas $PM_{2.5}$ son partículas finas con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros. Se componen principalmente de iones inorgánicos como sulfato, nitrato y amonio, carbono elemental y compuestos orgánicos, metales pesados, agua y agentes patógenos como bacterias y virus. Los vehículos a diésel son una de las principales fuentes de emisión de este contaminante. Otras emisiones primarias provienen de fuentes industriales y la quema de otros combustibles fósiles. La contaminación por partículas $PM_{2.5}$ provoca efectos graves en la salud, tales como enfermedades cardiovasculares y pulmonares, especialmente en niñas y niños, personas adultas mayores y personas con enfermedades crónicas (OEHHA, 2020).

ambientales, sociales y económicos. Para un mayor entendimiento del presente capítulo, se recomienda consultar la descripción de las condiciones climáticas de la ZMVM en el Capítulo 1, así como el Capítulo 3, en donde se expone cómo el comportamiento y formación de los contaminantes atmosféricos se relaciona con distintas variables meteorológicas.

4.1 El cambio climático y sus efectos

4.1.1 Calentamiento global y sus efectos en el medio ambiente

La quema de combustibles fósiles y los cambios de uso de suelo, entre muchas otras actividades humanas, producen cambios en el sistema climático. Las emisiones antropogénicas de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero (CyGEI) y el subsecuente incremento en su concentración en la atmósfera, intensifican el efecto invernadero y contribuyen al aumento de la temperatura en la superficie terrestre y los océanos. Los últimos informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) señalan que, debido a la actividad humana, la temperatura global ha aumentado en aproximadamente 1°C en comparación con niveles preindustriales (1861–1880), aunque a nivel regional las variaciones pueden ser más importantes (Ritchie & Roser, 2019); asimismo, el calentamiento global actualmente está aumentando a un ritmo de 0.2°C cada 10 años (IPCC, 2019). En la Figura 4.1 se observa cómo ha sido la variación de la temperatura media global desde el año 1960 y su proyección hacia el año 2100 con tres escenarios distintos, marcando como límite un aumento de 1.5°C (línea horizontal). La figura muestra que, derivado de actividades antropogénicas, en el año 2017 la variación de la temperatura media global se encontraba en un rango probable de 0.8 a 1.2°C. A su vez, las proyecciones muestran cómo una reducción más rápida del CO_2 en la atmósfera permitiría limitar el calentamiento a 1.5°C con mayor probabilidad de éxito; en cambio, respuestas más lentas reducen la probabilidad de mantener la temperatura global por debajo de dicho límite.

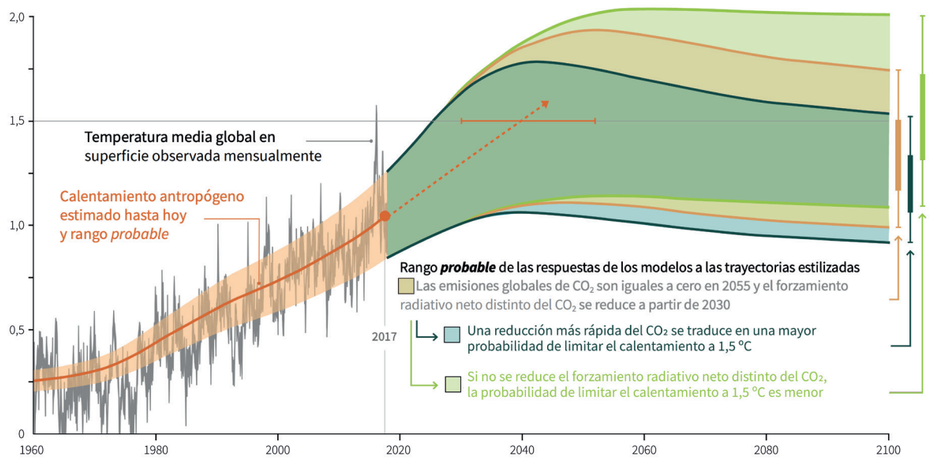


Figura 4.1 Cambio en la temperatura global observada y respuestas de modelos a trayectorias de emisiones antropogénicas
Fuente: *IPCC (2019).*

De acuerdo con la comunidad científica internacional, un aumento de la temperatura de 2°C o más, comparado con niveles preindustriales, conllevaría repercusiones climáticas catastróficas e irreversibles en los próximos siglos y milenios. En este sentido, la implementación del Acuerdo de París, firmado en el año 2015, tiene por objeto mantener el aumento de la temperatura media global *"muy por debajo de los 2°C"*, y apremia a tomar acciones que permitan limitar el incremento a 1.5°C (UNFCCC, 2015). En México, el Acuerdo de París fue ratificado por el Senado de la República en septiembre de 2016 y entró en vigor en noviembre del mismo año.

Si bien el calentamiento global es la manifestación más evidente del cambio climático, el número y la magnitud de los impactos ambientales ocasionados por este fenómeno son extensos y se prevé que continúen aumentando en intensidad y frecuencia. Entre estos impactos destacan el aumento del nivel del mar, la disminución del hielo en los polos y glaciares, el incremento de los incendios forestales y la pérdida de sistemas biológicos como bosques y ecosistemas marinos. Según un análisis reciente de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA, por su sigla en inglés), el aumento global de la temperatura ha sido y seguirá siendo responsable de cambios en patrones de precipitación, así como un incremento en la intensidad y frecuencia de sequias, olas de calor, inundaciones, huracanes, entre otros peligros climáticos (NASA, 2020). En el contexto de este Capítulo, es importante destacar que el cambio climático también influye en el comportamiento y formación de contaminantes en la atmósfera y, por ende, en la calidad del aire.

4.1.2 Impacto del cambio climático en la calidad del aire

A pesar de que el cambio climático y el deterioro de calidad del aire son temas que tradicionalmente se abordan por separado, es importante reconocer que están estrechamente relacionados. La calidad del aire es altamente sensible a la meteorología, razón por la cual el cambio en los patrones del clima, como el aumento de la temperatura, variaciones en los patrones de precipitación, la humedad, la nubosidad y la radiación solar, entre otras variables, pueden originar modificaciones relevantes en la química atmosférica e impactar en la calidad del aire (Nolte *et al.*, 2018). Además, la necesidad de abordar los dos temas de manera integral y sinérgica es muy relevante, dado que los contaminantes atmosféricos y los CyGEI comparten fuentes comunes de emisión. En específico, la quema de combustibles fósiles es una de las principales actividades antropogénicas que contribuye a incrementar el forzamiento radiativo[2] de la Tierra y deteriorar la calidad del aire (INECC, 2019). En este sentido, los esfuerzos para mitigar las emisiones de contaminantes como el dióxido de carbono (CO_2) conllevan beneficios muy importantes, tanto para limitar el aumento de la temperatura global a largo plazo, como para mejorar la calidad del aire local en el corto y mediano plazo. Lo anterior se debe a que las estrategias de reducción de CyGEI en algunas fuentes, también permiten disminuir emisiones de contaminantes locales como los óxidos de nitrógeno (NO_X), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y partículas suspendidas (West *et al.*, 2013), así como de carbono negro, metano (CH_4) y otros compuestos orgánicos volátiles (COV).

Los efectos del cambio climático alteran la concentración de contaminantes en el aire, ya que los cambios en la meteorología local, regional y sinóptica inciden en su formación, reactividad, transporte y remoción en la atmósfera (Fu & Tian, 2019). En específico, el aumento de la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación y niveles de humedad, y la alteración de la circulación de los vientos, pueden impactar significativamente sobre la calidad del aire. La evidencia científica muestra

2 Es la variación, expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2) del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente) en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático; por ejemplo, una variación de la concentración de CO_2 o de la radiación solar. En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, el forzamiento radiativo se define como la variación respecto de 1750 y denota un promedio global anual. Un forzamiento radiativo positivo contribuye al calentamiento de la Tierra, mientras que un forzamiento radiativo negativo enfría al planeta.

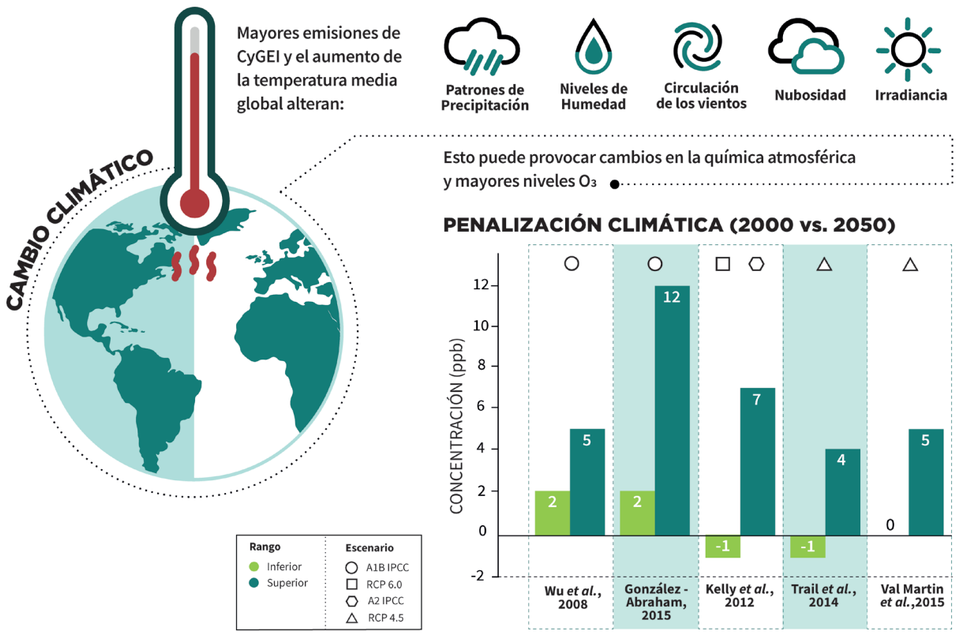
que el aumento de la temperatura incide en la formación O_3 y partículas $PM_{2.5}$ (Fiore *et al*., 2015), dos de los contaminantes que frecuentemente rebasan los límites permisibles normados en la ZMVM. Al incremento en la concentración de contaminantes atmosféricos debido a los efectos del cambio climático se le conoce como **penalización climática** (en inglés *climate change penalty*).

En otras palabras, los cambios en el clima provocados por las emisiones de CyGEI conllevan un impacto específico en las concentraciones de contaminantes a escala local. La literatura muestra que, entre 1860 y el año 2000, los niveles de O_3 troposférico aumentaron en 30 ± 0.16 ppb[3], en tanto que la concentración promedio de partículas $PM_{2.5}$ incrementó en 8 ± 0.16 µg/m^3 (Fang *et al.*, 2013). Las emisiones primarias de contaminantes de vida corta y precursores son responsables de la mayor parte de los incrementos observados, con un aporte del 94% para el aumento en los niveles de O_3 y 83% para $PM_{2.5}$. Por su parte, al cambio climático se le atribuye 5% del aumento observado en la concentración de $PM_{2.5}$ (0.4 ± 0.17 µg/m^3) y 2% del incremento en O_3 (0.5 ± 0.28 ppb). Se destaca también el papel de las emisiones de CH_4 en el aumento en la concentración de O_3 en ese mismo periodo, igual al 15% del cambio observado (4.3 ± 0.33 ppb). Cabe recordar que, en ese mismo periodo (1860-2000), la temperatura global promedio se elevó en aproximadamente 1°C. Algunos autores señalan que la magnitud de la penalización climática en los niveles de $PM_{2.5}$ necesita mayor investigación debido a la falta de consistencia en los resultados obtenidos al calcular el impacto del cambio climático en los niveles de este contaminante (Garcia-Menendez *et al.*, 2015).

Shi *et al.* (2016, 2019) analizaron los efectos del aumento de la temperatura sobre los niveles de O_3 y de partículas $PM_{2.5}$ en el sureste de Estados Unidos. Se identificó que un incremento de 1°C en la temperatura durante el verano incide en un aumento de 1.05 µg/m^3 en la concentración de $PM_{2.5}$ y un aumento de 2.9 ppb en los niveles de O_3, lo cual también se traduce en aumentos en la mortalidad prematura de la población por estar expuesta a una mayor concentración de estos contaminantes.

Wu *et al.* (2008) pronostican un aumento relevante en los niveles de O_3 en diferentes áreas de Estados Unidos, como resultado del cambio climático. Utilizando un modelo global de transporte químico (GEOS-Chem), se estimó una penalización climática de entre 2 y 5 ppb para 2050, expresado como el máximo diario de los promedios móviles de 8 horas, en los estados del medio-oeste y el noreste de Estados Unidos, principalmente debido a variaciones en los patrones de viento. Se destaca que los episodios de contaminación severa por O_3 se ven más influenciados por el cambio climático que los valores promedio, con penalizaciones que superan las 10 ppb.

Otros estudios presentan pronósticos similares bajo distintos escenarios de cambio climático. Fiore *et al.* (2015) revisaron múltiples estudios de modelación que evalúan la respuesta en la calidad del aire ante los efectos del cambio climático en Estados Unidos. Si bien los resultados varían en función de los parámetros de simulación y la región analizada, de forma general se observa que, de mantenerse los niveles actuales de emisión de contaminantes, el cambio climático impactaría en la calidad del aire al aumentar los niveles de O_3, particularmente en zonas con niveles elevados de NO_x. Por ejemplo, bajo un escenario de forzamiento radiativo RCP[4] 8.5 y un horizonte temporal hacia 2050, la penalización climática en los Estados Unidos durante el verano podría alcanzar niveles de hasta 12 ppb, expresada como el máximo diario de los promedios de 8 horas (Gonzalez-Abraham *et al*., 2015). La Figura 4.2 resume la penalización climática sobre la concentración de O_3, según diferentes investigaciones que comparten un horizonte temporal común (2000 vs. 2050), la misma área de estudio (Estados Unidos) y escenarios climáticos consistentes entre sí. Se indica el rango probable de la penalización climática sobre el máximo diario de los promedios de 8 horas para cada estudio, así como el escenario de referencia del IPCC.



Nota: La penalización climática se expresa como el cambio en el promedio de los máximos diarios de los promedios de 8 horas.

Figura 4.2 Penalización climática en la concentración de O_3
Fuente: *Elaboración propia a partir de información de Gonzalez-Abraham et al. (2015); Kelly et al. (2012); Trail et al. (2014); Val Martin et al. (2015); Wu et al. (2008).*

Para partículas $PM_{2.5}$, la respuesta de la concentración a los efectos del cambio climático es más variable. Los cambios en la temperatura, precipitación, humedad y vientos tienen diferentes efectos sobre los distintos componentes de las partículas suspendidas, lo que genera influencias opuestas sobre la penalización climática total. Por ejemplo, un aumento en la intensidad y frecuencia de incendios forestales generaría más emisiones de partículas, COV y carbono negro, en tanto que el aumento en la temperatura podría favorecer la oxidación de contaminantes atmosféricos primarios y contribuir a la formación de aerosoles secundarios. Por otro lado, el aumento en la temperatura favorece que compuestos orgánicos y nitratos de amonio se encuentren en fase gaseosa y no como partículas (Fiore *et al*., 2015).

A pesar de la evidencia sobre los impactos del cambio climático en la calidad del aire, alrededor del mundo existe una brecha de investigación en la predicción sobre los impactos de la penalización climática a futuro (West *et al*., 2013). No obstante, los datos presentados anteriormente cobran mayor relevancia si se comparan con la información obtenida durante la evaluación del ProAire ZMVM 2011-2020[5]. Este estudio estimó que la aplicación de las medidas del ProAire entre 2017 y 2020 resultaría en una disminución en los niveles de O_3 de alrededor de 2.2 ppb en la ZMVM y 1.5 ppb[6] en la Ciudad de México. Si bien las estrategias implementadas en

3 Definido como el promedio de las concentraciones diarias horarias máximas en el semestre con niveles más elevados de O_3.
4 Para más información consultar la sección 4.1.3.

5 Para más información consultar la sección 3.6.3 del ProAire.
6 Durante las horas de máxima concentración (14:00 a 16:00 horas).

la ZMVM han permitido reducir las concentraciones de algunos precursores de O_3, es posible que a futuro estos resultados sean insuficientes para cubrir la penalización por O_3 que determina la literatura. Con base en los resultados expuestos, es posible asumir que la penalización climática es suficientemente significativa como para realizar una investigación local que arroje la evidencia científica necesaria para fortalecer las decisiones de política pública en materia de calidad del aire.

4.1.3 Proyecciones del cambio climático a futuro

El IPCC proyecta en su Quinto Informe de Evaluación que la temperatura media global aumentará entre 1.5°C y 4.8ºC en comparación con niveles preindustriales; la magnitud del cambio dependerá de los niveles de emisiones que se observen durante los próximos 60 a 80 años (IPCC, 2013). Para modelar las proyecciones del cambio climático a futuro, el IPCC determinó una serie de escenarios temporales al 2100, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2014). Las RCP comprenden cuatro trayectorias que modelan diferentes esfuerzos de mitigación de concentraciones de CyGEI en la atmósfera y se asocian a cuatro niveles específicos de forzamiento radiativo positivo: 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m^2. Es importante subrayar que las RCP son escenarios de concentración de CyGEI en la atmosfera, y no de emisiones, aunque estas dos variables están estrechamente relacionadas.

Como se puede ver en la Tabla 4.1, a cada RCP le corresponden cambios específicos en la temperatura media global y un amplio margen de variación, debido a la incertidumbre sobre la política climática a futuro y el desarrollo socioeconómico (IPCC, 2014). En todo caso, si para el 2100 la concentración de CO_2 no supera las 421 ppm (RCP 2.6), lo cual es altamente improbable considerando la concentración actual[7], se prevé un aumento de la temperatura global de aproximadamente 1°C en comparación con niveles preindustriales. Bajo este mismo escenario, se prevé que el forzamiento radiativo empezará una trayectoria decreciente alrededor del año 2100. En el segundo escenario, denominado RCP 4.5, se considera que los esfuerzos de mitigación lograrían mantener la concentración de CO_2 por debajo de 538 ppm. En este caso, el forzamiento radiativo se estabilizaría en 2100 y se estima que la temperatura global alcanzaría un aumento promedio de 1.8°C, lo cual representa un valor superior al objetivo ideal de mitigación estipulado en el Acuerdo de París del año 2015.

Tabla 4.1 Proyecciones del cambio en la temperatura media global bajo diferentes escenarios climáticos

Escenario	Cambio en la temperatura media global en la superficie terrestre (°C) respecto del periodo de referencia (1986-2005)			
	2046-2065		2081-2100	
	Media	Rango probable	Media	Rango probable
RCP 2.6	1.0	0.4 a 1.6	1.0	0.3 a 1.7
RCP 4.5	1.4	0.9 a 2.0	1.8	1.1 a 2.6
RCP 6.0	1.3	0.8 a 1.8	2.2	1.4 a 3.1
RCP 8.5	2.0	1.4 a 2.6	3.7	2.6 a 4.8

Fuente: *IPCC (2013).*

7 En abril 2020, la concentración de CO_2 en la atmosfera alcanzó 416 ppm, el valor más alto desde que se empezó a medir de forma continua en 1958 (UNEP, 2020).

El tercer escenario (RCP 6.0) estima que los niveles de CO_2 aumentarán hasta 670 ppm, lo cual ocasionaría un incremento de la temperatura media global de aproximadamente 2.2°C. Bajo este modelo, el forzamiento radiativo seguiría en una trayectoria creciente hacia el 2100. El último escenario, denominado RCP 8.5, modela concentraciones de hasta 936 ppm de CO_2 en la atmósfera y prevé un aumento promedio de la temperatura de 3.7°C con respecto a niveles preindustriales, lo cual conllevaría impactos catastróficos e irreversibles.

Respecto a los riesgos futuros asociados con el cambio climático, es importante distinguir entre los diferentes sistemas que podrían verse afectados. Estos incluyen sistemas físicos, como los glaciares, los ríos, lagos y el nivel del mar; sistemas biológicos, como ecosistemas terrestres y marinos; y sistemas humanos y gestionados, como la producción de alimentos, medios de subsistencia, la salud pública y la economía. De forma general, cualquier tipo de escenario que modele cambios en la temperatura media global superiores a 2°C ocasionaría impactos muy graves sobre todos los sistemas, tales como la extinción de un alto número de especies y riesgos importantes para la seguridad alimentaria y las actividades humanas, incluidos el cultivo de alimentos y el trabajo al aire libre durante ciertas épocas del año, por la combinación de altas temperaturas y humedad (IPCC, 2014). Por ejemplo, en un escenario en el que se alcanzan los 2°C para el año 2100, la probabilidad de que el Océano Ártico esté libre de hielo marino sería, como mínimo, de una vez cada 10 años, comparada con una frecuencia de una vez cada 100 años bajo un escenario con un aumento promedio de 1.5°C. Asimismo, la duración promedio de las sequías anuales bajo el escenario de 1.5°C sería superior a 2 meses, mientras que al alcanzar los 2°C se llegaría a más de 4 meses al año. Además, si el aumento de las temperaturas llegara a exceder los 3°C, la duración promedio de las sequías sería de 10 meses al año. En este contexto, aunque los compromisos climáticos estipulados a través de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) fueran cumplidos, se estima que las temperaturas globales podrían aumentar en un rango de entre 2.5 y 3.2ºC a 2100 (Climate Action Tracker, 2020).

Como se expuso anteriormente, además de estos efectos, a nivel local también se registrarán consecuencias en la calidad del aire a causa de mayores emisiones por incendios forestales, incremento de partículas por desertificación y erosión del suelo, así como un mayor volumen de emisiones biogénicas de COV, por mencionar algunas.

4.2 Cambio climático en la Zona Metropolitana del Valle de México

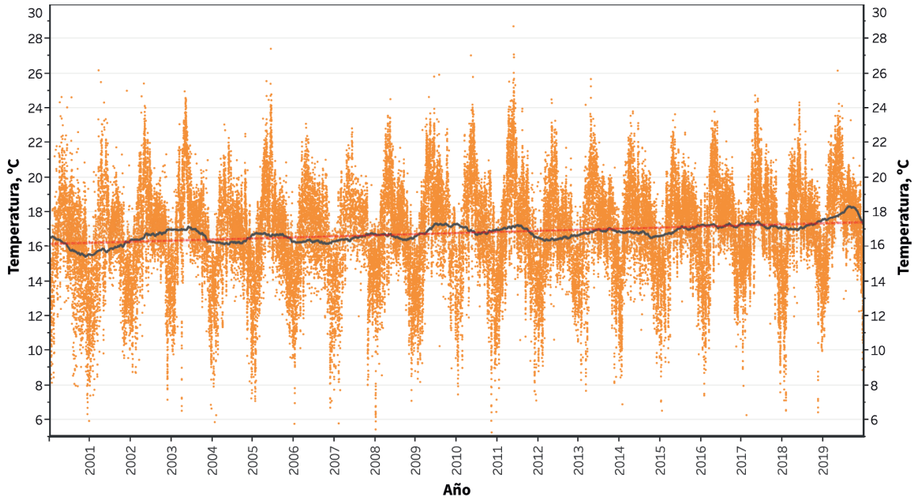
El cambio climático es un problema critico en la ZMVM. Esto se debe en gran medida a que este fenómeno exacerba problemáticas ya graves, como la calidad del aire, la escasez de agua y las inundaciones (Kimmelman, 2017). En el contexto de este capítulo, se discute cómo se ha modificado la temperatura y los niveles de precipitación en la ZMVM durante los últimos años, y cómo se espera que las normales climatológicas relevantes para la calidad del aire cambien a futuro, como consecuencia del cambio climático y escenarios específicos para la ZMVM.

A pesar de que se carece de información suficiente para determinar cuánto y cómo el cambio climático ha impactado a los patrones de viento en la ZMVM, existen registros que muestran cómo la intensidad de los vientos se ha incrementado en Norte América, Europa y Asia durante la última década (Zeng *et al*., 2019). Este fenómeno es relevante porque los vientos suelen tener un impacto positivo en la calidad del aire, independientemente de su dirección, permitiendo una mayor dispersión de los contaminantes atmosféricos. Por otro lado, la literatura indica

que el incremento de CO_2 en la atmosfera provoca mayores niveles de humedad, favoreciendo la precipitación de algunos contaminantes. A continuación, se analiza a detalle cómo han cambiado los patrones del clima en la ZMVM y su posible impacto en la calidad del aire.

4.2.1 Aumento de la temperatura

Los registros de la REDMET muestran un aumento constante en la temperatura promedio de la ZMVM entre 2001 y 2019. En específico, esta se ha incrementado en aproximadamente 0.9°C, en tanto que los valores máximos de temperatura aumentaron en ~0.4°C y los valores mínimos en ~1.2°C, tendencia que se puede observar en la Figura 4.3. Cabe resaltar que, a nivel global, 2015, 2016, 2017 y 2018 fueron los 4 años más cálidos desde 1981 en términos de la temperatura promedio (SEDEMA, 2020). A nivel nacional, todos los meses en el 2019 registraron anomalías positivas, y agosto[8] fue el mes más cálido en la historia de México desde 1953 (CONAGUA, 2019).



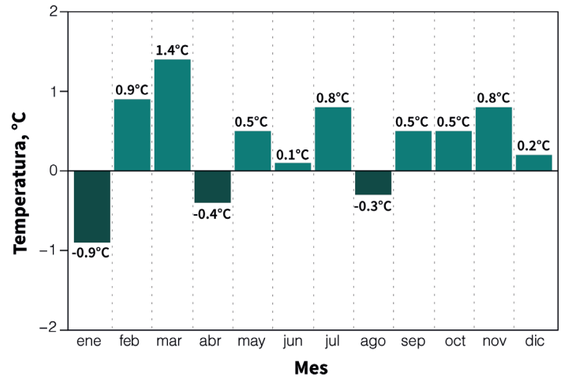
Nota: Información generada a partir de las estaciones FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL.

Figura 4.3 Serie de tiempo de la temperatura promedio diaria en la ZMVM entre 2000 y 2019
Fuente: *Informe 2018 de Calidad del Aire (SEDEMA, 2020).*

En la Ciudad de México, los datos de la REDMET de la SEDEMA muestran que en 2016, 2017 y 2018 se registraron anomalías en la temperatura a lo largo de casi todo el año. Por ejemplo, si bien en 2018 el promedio de la temperatura ambiente registrado por todas las estaciones de monitoreo en la Ciudad de México fue de 16.3°C, 0.5°C menos que en 2017, cuando se comparan los promedios mensuales en 2018 con los valores históricos de 2000-2017, se observan anomalías positivas (temperaturas más altas) durante nueve meses: febrero, marzo, mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre (ver Figura 4.4). En febrero, marzo, julio y noviembre se presentaron anomalías iguales o mayores a 0.8°C, en tanto que el aumento más importante se observó en marzo, cuando el promedio mensual se elevó en 1.4°C en comparación con los valores de 2000-2017.

8 En este mes se registró un promedio nacional de 27.0°C y una anomalía positiva de 3.3°C.

La variabilidad observada en la temporalidad de las anomalías de temperatura está estrechamente relacionada con fenómenos globales como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)[9], el cual exhibe dos fases, una cálida (El Niño) y una fría (La Niña). Por ejemplo, la presencia de sistemas anticiclónicos en el noroeste de México durante 2018 ocasionó que sistemas frontales se desplazaran hacia el Golfo de México, provocando una anomalía negativa de hasta -1°C en la Ciudad de México. Aun así, el análisis de los datos históricos de temperatura evidencia un aumento constante de esta variable meteorológica.



Nota: La gráfica compara los promedios mensuales de 2018 con los valores de 2000 a 2017. Los valores de cada barra corresponden a la diferencia de la temperatura en grados centígrados (°C). Para construir el grafico se emplearon datos históricos de las siguientes estaciones: FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL.

Figura 4.4 Anomalía de la temperatura ambiente para la Zona Metropolitana del Valle de México en 2018
Fuente: *Informe 2018 de Calidad del Aire (SEDEMA, 2020).*

Además, en la ZMVM, debido al efectos de la isla de calor urbana, las zonas centrales de la ciudad pueden experimentar un mayor impacto en la temperatura, pues esta puede llegar a ser hasta 4.6°C más cálida que en las afueras de la zona urbana (Poma, 2019). Esto se debe a que en las zonas centrales de la metrópoli del Valle de México se encuentran edificaciones y estructuras urbanas con materiales oscuros como el asfalto y el cemento, los cuales absorben calor, además de que se carece de suficiente cobertura vegetal. Este fenómeno se evidencia con los registros de la REDMET, que indican mayores promedios de temperatura en las estaciones ubicadas en el centro de la ciudad (SEDEMA, 2018a).

Las proyecciones a futuro del cambio climático para la ZMVM pronostican picos de temperatura durante la época seca-caliente, así como un aumento generalizado de la temperatura promedio en el resto del año (Lezama & Graizbord, 2012). En este contexto, los escenarios de cambio climático específicos para el país, generados en conjunto por el INECC y la UNAM, funcionan como una guía de los posibles cambios que se podrán observar en la temperatura de la ZMVM (INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017). Estos escenarios permiten comparar los resultados que arrojan cuatro Modelos de Circulación General para la anomalía de temperatura en todo el país, bajo tres horizontes temporales (2015-2039, 2045-2069 y 2075-2069) y dos RCP (4.5 y 8.5). La Tabla 4.2 resume las anomalías proyectadas para el promedio mensual de la temperatura máxima bajo distintos escenarios de cambio climático en la ZMVM.

Si se toma como ejemplo el mes de abril bajo el escenario RCP 4.5, se espera que entre 2015 y 2039 el promedio de la temperatura máxima aumente en 1.81°C. Bajo el mismo escenario, pero para el periodo 2045-2069, se estima que la anomalía será de 2.81°C. Para el escenario RCP 8.5 las anomalías se vuelven aún más significativas; por ejemplo, se proyecta que, para 2045-2069, la anomalía en el promedio mensual de la temperatura máxima para la mayoría de los meses se encuentre por encima de 3.0°C respecto de la normal meteorológica entre 1961-2000, determinada a partir de datos del Sistema Meteorológico Nacional. Para mayor detalle sobre los escenarios de cambio climático consultar el Anexo 4.1.

9 En el Capítulo 1 se proporciona más información sobre las condiciones climáticas en la ZMVM.

Tabla 4.2 Anomalía en la temperatura máxima para la ZMVM bajo distintos escenarios de cambio climático

Mes	Anomalía en la temperatura máxima (°C) respecto del periodo 1961-2000					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2015-2039	2045-2069	2075-2099	2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	1.10	2.18	2.65	1.32	2.85	5.05
Febrero	1.39	2.48	2.80	1.40	3.17	5.01
Marzo	1.80	2.81	3.42	1.50	3.59	5.74
Abril	1.81	2.81	3.59	1.58	3.84	5.95
Mayo	1.49	2.87	3.40	1.68	3.61	5.73
Junio	1.55	2.60	2.90	1.43	3.21	5.18
Julio	1.81	2.77	3.37	1.81	3.48	5.44
Agosto	1.32	2.94	3.36	1.87	3.63	5.86
Septiembre	1.67	2.75	3.23	1.69	3.44	5.75
Octubre	1.36	2.30	2.79	1.34	2.98	4.84
Noviembre	1.40	2.08	2.36	1.22	2.81	4.49
Diciembre	1.36	2.14	2.52	1.27	2.87	4.54

Nota: Los resultados corresponden a los promedios de cuatro Modelos de Circulación General (CNRMCM5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GFDL-CM3). En el Anexo 4.1 pueden consultarse los resultados desagregados por modelo.

Fuente: *Elaboración propia con datos de los escenarios de cambio climático para México (INECC & UNAM, 2015; INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017).*

4.2.2 Variación en los patrones de precipitación

De acuerdo con el IPCC, uno de los tres mayores impactos del cambio climático en América Latina será la menor disponibilidad de agua y el mayor número de inundaciones (IPCC, 2019). Estos fenómenos se ven reflejados en las proyecciones de cambio climático a futuro en la ZMVM, las cuales se resumen en la Tabla 4.3 (INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017). Estos escenarios presentan evidencia sobre la variación a futuro en los patrones de precipitación en la cuenca del Valle de México como consecuencia del cambio climático.

Es importante destacar que el fenómeno ENOS tiene un papel muy importante sobre el comportamiento de la precipitación en la ZMVM. En específico, el calentamiento aportado por la fase de El Niño modula el inicio e intensidad de la temporada de lluvias, retrasa su comienzo y ocasiona la disminución en la cantidad de lluvia. Si se toma como ejemplo un mes de lluvia importante para la ZMVM, como es el caso de agosto, los escenarios de cambio climático establecen que, en una proyección moderada (RCP 4.5) a corto plazo (2015-2039), la precipitación disminuirá en aproximadamente –11.06 mm. La tendencia general de los modelos es que a largo plazo haya una menor cantidad de precipitación acumulada a lo largo del año, pero con lluvias cuya frecuencia e intensidad será cada vez más errática. En invierno y en primavera se prevén condiciones muy variables, tanto con anomalías positivas como negativas; los escenarios reflejan esta tendencia, ya que diferentes modelos prevén anomalías tanto positivas como

negativas para un mismo mes, RCP y horizonte temporal (los resultados de los escenarios climáticos desagregados por Modelo de Circulación General se presentan en el Anexo 4.1). Dado que los niveles de variabilidad son muy altos, resulta complicado identificar patrones de disminución o aumento en la precipitación, particularmente durante la época seca-fría, que va de noviembre a febrero.

Tabla 4.3 Anomalía en la precipitación mensual para la ZMVM bajo distintos escenarios de cambio climático

Mes	Anomalía en la precipitación mensual acumulada (mm) respecto del periodo 1961-2000					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2015-2039	2045-2069	2075-2099	2015-2039	2045-2069	2075-2099
Enero	-1.06	-3.25	-5.63	-1.78	-1.55	-8.83
Febrero	-4.79	-4.27	-3.90	-1.25	-7.18	-8.48
Marzo	-7.46	-6.79	-11.07	-4.21	-10.04	-14.25
Abril	-2.07	-3.87	-6.13	-2.55	-10.40	-12.52
Mayo	2.40	1.73	3.40	0.29	-8.72	-8.15
Junio	-3.29	-0.34	-0.38	-2.28	1.88	3.17
Julio	-8.93	-17.48	-19.98	-7.27	-15.78	-26.48
Agosto	-11.06	-21.49	-23.27	-7.38	-21.64	-40.41
Septiembre	-4.29	3.91	-3.20	11.72	4.36	-6.67
Octubre	-7.97	1.58	9.51	8.21	-1.11	5.88
Noviembre	5.64	8.79	11.65	5.02	8.98	26.14
Diciembre	-3-36	1.44	2.72	-0.31	2.64	5.88

Nota: Los resultados corresponden a los promedios de cuatro Modelos de Circulación General (CNRMCM5, MPI-ESM-LR, HADGEM2-ES y GFDL-CM3). En el Anexo 4.1 pueden consultarse los resultados por desagregados por modelo.

Fuente: *Elaboración propia con datos de los escenarios de cambio climático para México (INECC & UNAM, 2015; INECC-PNUD & Hernández Grajales, 2017).*

Finalmente, es importante considerar que las proyecciones de cambio climático predicen que se intensificarán los fenómenos climáticos sinópticos (Wang *et al*., 2019). En la sección 4.3 se discuten las posibles repercusiones de la intensificación y variabilidad de ENOS sobre la gestión de la calidad del aire. Por ahora es importante recordar que, en un evento intenso de El Niño, la precipitación disminuye en verano y otoño. En cambio, durante la fase contraria –La Niña– los inviernos son aún más secos (Bravo Cabrera *et al.*, 2017, 2018; Magaña *et al*., 2003; Sheinbaum, 2003).





4.2.3 Impactos económicos y sociales

Además de los efectos negativos que el cambio climático tiene sobre el medio ambiente, este también implica repercusiones considerables a nivel económico y social. A pesar de que la estimación de este tipo de impactos resulta compleja, es posible comprender los efectos que el cambio climático tiene sobre la actividad económica, a través de estudios regionales y sectoriales que cuantifican dichos efectos. Según la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE, por sus siglas en inglés), si el ritmo actual con el que se está elevando la temperatura global continua (+0.2°C por década), para el año 2060 el efecto combinado en el PIB mundial correspondería a pérdidas económicas del 1.0 al 3.3% por año. Si el calentamiento global siguiera una trayectoria RCP 8.5 y se alcanzara un aumento promedio de 4°C en la temperatura global para el año 2100, el impacto sobre el PIB global sería mucho mayor, con pérdidas económicas en un rango probable del 2 al 10% respecto de un escenario teórico donde no se registran impactos negativos por el cambio climático (OCDE, 2015).

Debido a su situación geográfica y contexto socioeconómico, en la Ciudad de México se presentan múltiples riesgos naturales y humanos. En tiempos recientes, la ciudad ha sido afectada por diversos fenómenos como inundaciones y pandemias. Durante el periodo de 1980 a 2013, los daños reportados por fenómenos hidrometeorológicos en la ciudad, como lluvias, inundaciones y desbordamiento de aguas negras, resultaron en un impacto económico de $32.4 millones de dólares (precio promedio anual para el periodo 1980-2014), afectando a más de 49 mil personas; en el mismo periodo, los daños ocasionados por incendios forestales afectaron un total de 17 mil hectáreas en la ciudad, con un costo económico directo de $2.7 millones de dólares (SEDEMA, 2016).

En la Ciudad de México, para hacer frente a los impactos climáticos, se han puesto en marcha distintos instrumentos que definen las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático a nivel local, tales como el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2014-2020 (PACCM) y la Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México (ELAC), los cuales se encuentran en proceso de actualización. Un estudio desarrollado por C40 estimó que, al ejecutarse todas las políticas climáticas definidas para la Ciudad de México en dichos instrumentos, tales como inversiones en transporte público, movilidad activa y eficiencia energética, los beneficios socioeconómicos acumulados a 2050 ascenderían a más de $60 mil millones de pesos (M.N.) (SEDEMA & C40, 2017).

Un aumento continuo en la temperatura se traducirá en diferentes impactos en una variedad de sectores dentro de la Ciudad de México. Algunos efectos socioeconómicos particulares serían los siguientes (SEDEMA, 2018b):



Un incremento en el gasto de las familias por el aumento en el consumo eléctrico, como consecuencia del uso de aires acondiciones y equipos para la conservación de alimentos.

Mayor presión sobre los recursos hídricos, producto de un aumento en la demanda de agua para actividades agrícolas y residenciales. Esto es de especial importancia, puesto que la ZMVM ya registra actualmente un grado de presión elevado en términos de la disponibilidad de agua subterránea. Cualquier modificación en la recarga, volumen concesionado y la descarga natural comprometida afectaría negativamente la disponibilidad media anual de este recurso.

Afectaciones sobre actividades agrícolas y pecuarias, sector que si se compara con el PIB generado por el sector secundario o el terciario, no figura entre los sectores económicos predominantes en la ZMVM, representa el sustento de grupos de población con ingresos bajos y además ocupa una parte sustancial del suelo de la ZMVM, particularmente en las periferias de la mancha urbana. Con un aumento en la temperatura media de 1.5°C (RCP 4.5) las pérdidas en la producción por hectárea oscilarían entre el 10 y el 22%, en tanto que para un RCP 8.5 superarían el 30%.

Cambios en la oferta y demanda de actividades turísticas basadas en actividades recreativas al aire libre.

Pérdidas de trabajos e ingresos, reducción del desempeño escolar, efectos negativos en la productividad e ingresos futuros, como consecuencia de ajustes en hogares siniestrados por los efectos del cambio climático.

Impactos sobre la deforestación y la transformación del suelo de conservación, por condiciones climáticas cada vez más extremas y la intensificación de incendios forestales y procesos de desertificación. Asimismo, esto tiene un impacto negativo sobre la captura y almacenamiento de carbono en uno de los sumideros más importante dentro de la ZMVM.

Reducción del ritmo de crecimiento del PIB y retroceso en el combate a la pobreza. El cambio climático intensificaría desigualdades sociales al interior de la zona metropolitana. Por ejemplo, los costos en la agricultura son marginales respecto del PIB total, pero tienen un mayor impacto en alcaldías o municipios rurales con un mayor índice de pobreza. Además, los impactos que el cambio climático tiene sobre la seguridad alimentaria (reducción en la oferta de alimentos y aumento de precios) son más evidentes en poblaciones de bajos recursos socioeconómicos que dedican un mayor porcentaje de su ingreso mensual a la compra de víveres.

Tomando en cuenta lo anterior, resalta la relación que existe entre el cambio climático y la pobreza como un factor importante que se debe de considerar y priorizar para hacer frente a los impactos climáticos y económicos esperados del mismo. Con el cambio climático las áreas pobres de las ciudades se verán severamente afectadas; por ejemplo, incrementará el costo del servicio y abastecimiento de agua si, al mantenerse los mismos niveles de consumo, disminuye la precipitación y aumenta el nivel de evaporación. También, los mayores niveles de humedad y temperatura podrían estimular la propagación de ciertas enfermedades infecciosas y aquellas transmitidas por vectores, como moscos, bacterias y otros microorganismos, entre la población más vulnerable. Además se debe de considerar el impacto a largo plazo e implicaciones del cambio climático a largo en fenómenos asociados a la pobreza, tales como la seguridad alimentaria, la productividad y la propia viabilidad de los ecosistemas agrícolas mundiales (Sánchez *et al.,* 2011).

Asimismo, es importante resaltar que el cambio climático afecta de manera diferente a las mujeres y a los hombres, por lo cual es fundamental incorporar un enfoque de género. Esto se debe a que el 70% de las personas que viven en pobreza en el mundo son mujeres; además, por las persistentes desigualdades derivadas de los roles de género,

las mujeres siguen teniendo un papel fundamental en actividades económicas, en el cuidado del hogar y en procurar el bienestar de los integrantes de las familias. En un estudio realizado a hombres y mujeres en la Ciudad de México para identificar los impactos del cambio climático en sus actividades diarias y en hábitos de uso y consumo de recursos y servicios, las mujeres participantes aseguraron que cuando se enferman por manifestaciones del clima difícilmente son cuidadas por sus parejas; por el contrario, reconocieron que el cuidado principal se los brindan otras mujeres (SEDEMA, 2017). La intensificación en las cargas de cuidado tiene un impacto negativo en el desarrollo de las mujeres, ya que puede restarles tiempo disponible para su educación, descanso, generación de ingresos, participación política, así como para contribuir a los procesos comunitarios de toma de decisiones.

4.3 Impacto del cambio climático en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México

En 1992, la ONU clasificó a la Ciudad de México y su zona metropolitana como la ciudad más contaminada en el planeta. Desde entonces, a pesar de los cambios en los patrones climáticos a nivel global, y del crecimiento poblacional y económico, la calidad del aire ha mejorado de manera significativa en la ZMVM. Esto se debe, en gran medida, al despliegue y la ejecución de los Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire o ProAire, a la coordinación entre los gobiernos estatales y el gobierno federal, y a la reducción de emisiones en sectores clave, como el transporte urbano (C40, 2013). Sin embargo, en el Capítulo 3 se detalla cómo los niveles de contaminación del aire siguen presentando concentraciones altas; el ritmo de mejora se ha desacelerado, en específico para O_3 y partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$, contaminantes que de manera frecuente superan los límites permisibles de las normas de salud ambiental, por lo que suponen un riesgo a la salud de la población.

Un nuevo reto en la gestión de la calidad del aire es incorporar nuevos factores, como el cambio climático, en el diseño de políticas públicas, e incluir un enfoque que considere cómo los diferentes cambios en los patrones de clima y sus proyecciones a futuro perjudicarán o beneficiarán el estado de la contaminación atmosférica en la ZMVM. A continuación se describen los principales efectos proyectados en la calidad del aire de la ZMVM, como consecuencia del cambio climático (ver Figura 4.5).

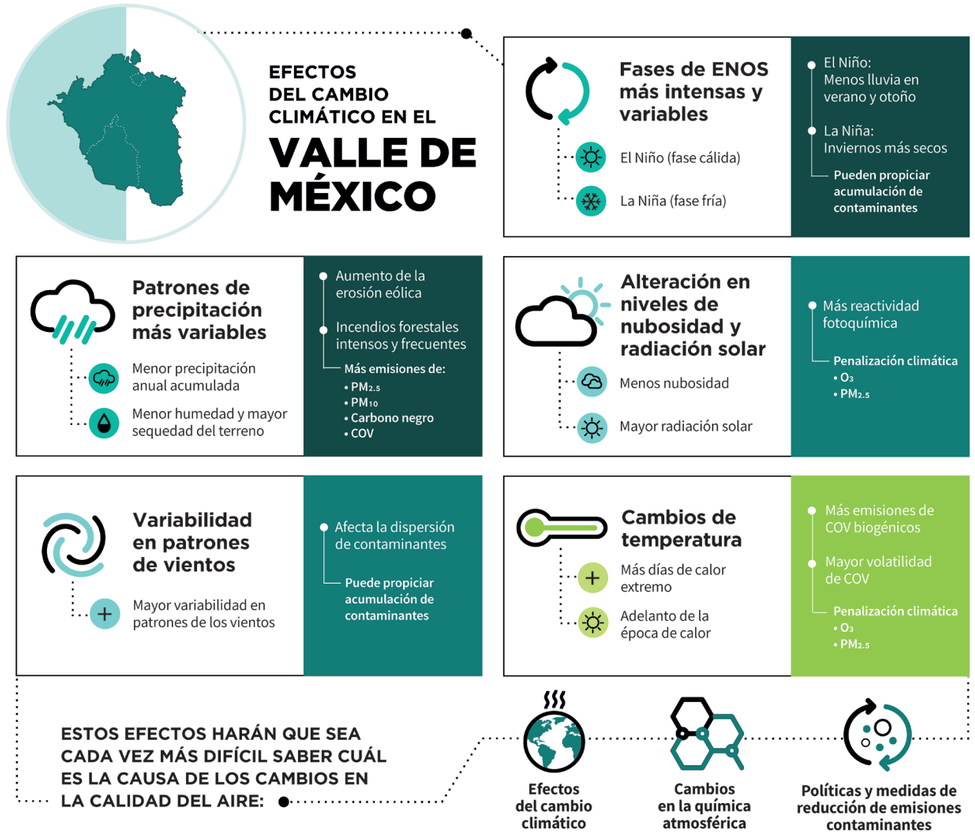


Figura 4.5 Impactos del cambio climático en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Elaboración propia.*

Adelanto en las épocas de calor, aumento de la temperatura promedio y días de calor extremo

En las últimas dos décadas (2000-2017), los promedios mensuales y anuales de la temperatura en la ZMVM han incrementado de manera sostenida y significativa (aproximadamente en 1°C). Además de este fenómeno, se registra un mayor número de días de calor extremo, los cuáles se ven exacerbados en las ciudades por el efecto de la isla de calor urbana (Poma, 2019). De esta manera, en algunas zonas de la Ciudad de México la temperatura se ha incrementado en casi 4°C (SEMARNAT, 2016). A pesar de que la relación entre la variación de los patrones climáticos y la calidad del aire es compleja, y que las interacciones necesiten investigarse a nivel regional, existen estudios que han demostrado cómo el aumento de la temperatura se relaciona con una concentración más alta de O_3 y aerosoles secundarios.

Como se detalló anteriormente, la formación de O_3 troposférico se ha visto afectada por el aumento de la temperatura promedio a nivel global. A título ilustrativo y con base en las investigaciones expuestas anteriormente, en la ZMVM se podría estimar que el incremento en la temperatura media anual, igual a 1°C entre 2000 y 2017, ha penalizado las concentraciones máximas horarias de O_3, particularmente durante el verano; en específico, este cambio implicaría un aumento en el nivel de O_3 de 2.9 ppb, mientras que la afectación en los niveles de partículas $PM_{2.5}$ sería de 1.05 µg/m^3 (Shi *et al.*, 2019).

Sin embargo, las condiciones fisiográficas y meteorológicas de la cuenca del Valle de México son diferentes que las del sureste de Estados Unidos donde se determinó este valor (Shi *et al.*, 2019). Cabe destacar que en la ZMVM el impacto del aumento de la temperatura podría ser más relevante que en el sureste de Estados Unidos, debido a la altitud de la ZMVM (2240 m s.n.m.), lo que provoca que la región esté expuesta a un 20% más de radiación solar con respecto al nivel del mar. En este contexto, las altas temperaturas y la mayor radiación solar incrementan la actividad fotoquímica en la atmósfera y favorecen la formación de O_3 troposférico (Bento *et al.*, 2017). Con las proyecciones a futuro del adelanto de las épocas de calor, el aumento de la temperatura promedio y la mayor frecuencia e intensidad de días de calor extremo a causa del cambio climático, es muy probable que la penalización climática también sea cada vez más significativa.



Otro factor por considerar es un posible aumento en la tasa de emisión de COV de origen natural. Está ampliamente documentado que las emisiones biogénicas de COV son altamente sensibles a la temperatura y se espera que aumenten con el cambio climático. Los flujos de COV hacia la atmósfera provenientes de la vegetación son significativos; por ejemplo, el isopreno es el segundo flujo más grande de carbono reactivo hacia la atmósfera, detrás del metano (Heald & Spracklen, 2015). Temperaturas más altas también implican una mayor evaporación de COV de origen antropogénico, una mayor reactividad fotoquímica y un aumento en la tasa de oxidación de los compuestos orgánicos, cuya prevalencia en la atmósfera contribuye a la formación de O_3 y aerosoles secundarios. Asimismo, como se expuso en el Capítulo 3, la formación de O_3 en la ZMVM está limitada por COV, por lo que mayores emisiones naturales y antropogénicas de este tipo de compuestos representan un obstáculo para la gestión de la calidad del aire.

Finalmente, es importante reconocer que otros factores como la orografía de la región, los fenómenos meteorológicos a escala local, regional y sinóptica, y cambios en la química atmosférica (por ejemplo, por modificaciones en la relación COV/NO_X) pueden tener efectos significativos y no lineales en el comportamiento de los contaminantes en el aire ambiente, con mecanismos que amplifican o amortiguan las perturbaciones iniciales. Por esta razón es que se debe priorizar la modelación de los efectos del cambio climático en la calidad del aire a escala local, para precisar la penalización climática a nivel de cuenca en la ZMVM.

Variabilidad en los patrones de precipitación

Los patrones de precipitación en la ZMVM han cambiado en las últimas décadas; uno de los mayores cambios observados ha sido la mayor variabilidad estacional y la disminución en la cantidad de lluvia en verano. Como se indica en el Capítulo 1, la precipitación suele tener un impacto positivo en la calidad del aire, puesto que tanto la fracción fina (<2.5 µm) como gruesa (2.5-10 µm) de las partículas suspendidas son removidas por acción del agua.

Además, una mayor variabilidad en la precipitación durante la época seca, y una disminución en la precipitación anual acumulada, también podrán incidir en cambios en los niveles de humedad. Si bien resulta complicado identificar patrones de variación de precipitación claros en la época seca, una menor humedad relativa podría propiciar la resuspensión de partículas y favorecer la propagación de incendios forestales. Las características orográficas de la zona y la presencia de sistemas anticiclónicos durante esta misma época del año contribuyen también a exacerbar la problemática, puesto que inhiben el movimiento ascendente del aire y la dispersión de contaminantes, lo cual intensifica la contaminación del aire.

Cambios en la intensidad de El Niño – Oscilación del Sur

Las proyecciones de cambio climático predicen que se intensificarán fenómenos como ENOS (Wang *et al*., 2019). Eventos inusualmente intensos de la fase caliente (El Niño) podrían generar disminuciones significativas en las precipitaciones durante el verano y otoño, por lo que podría ser más probable que se presenten concentraciones elevadas de contaminantes durante esta época del año, la cual históricamente registra los niveles más bajos de contaminación. Durante la fase fría (La Niña), los inviernos son aún más secos, agravando los problemas de contaminación en esta temporada, durante la cual son comunes las inversiones térmicas, condiciones de estabilidad atmosférica y alturas bajas de la capa de mezclado, variables que en conjunto propician la acumulación de contaminantes en el aire.

De manera general, es probable que con la intensificación de ENOS, la gestión de la calidad del aire se complique durante años con fases particularmente intensas o anormales; al presentarse condiciones extremas o fuera del rango de variabilidad anual, se vuelve más difícil determinar si los cambios y variaciones en la calidad del aire se deben a los impactos de las políticas de reducción de emisiones o a los cambios asociados al clima y modificaciones en la química atmosférica. Asimismo, condiciones meteorológicas inusuales podrían favorecer episodios de contaminación severa donde es necesario tomar medidas adicionales para reducir la exposición de la población y proteger su salud.

Afectaciones por incendios forestales y erosión eólica

Con menor precipitación, el aumento de la temperatura anual promedio y un mayor número de días con calor extremo, incrementa también la sequedad de los terrenos y de la vegetación. Este fenómeno incide en la activación, propagación e intensidad de un mayor número de incendios forestales, los cuales son una fuente importante de $PM_{2.5}$, carbono negro y COV. Cuando las emisiones inusuales se conjugan con condiciones meteorológicas desfavorables, el resultado puede ser un deterioro importante de la calidad el aire.

Por ejemplo, incendios forestales dentro de la ZMVM y fuera de esta han sido responsables de la activación de contingencias ambientales extraordinarias, a causa de la mala calidad del aire por concentraciones elevadas de partículas suspendidas. Por ejemplo, en mayo de 2019, incendios simultáneos en la ZMVM y los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, ocasionados por malas prácticas en el uso de fuego, una temporada intensa de estiaje y temperaturas elevadas, generaron emisiones de contaminantes que se transportaron hacia el centro del país por acción de vientos desde la costa del Pacífico. Los contaminantes se acumularon en la región debido a condiciones de estabilidad atmosférica, y el impacto se sumó a las emisiones que se generan de forma cotidiana por actividades antropogénicas. Muestreos al suroeste de la Ciudad de México durante mayo de 2019 corroboraron el impacto de los incendios sobre la calidad del aire de la ZMVM; se observó un claro incremento en la presencia de dos trazadores de la quema de biomasa en $PM_{2.5}$, el levoglucosan y el reteno (SEMARNAT *et al*., 2019).

Las condiciones de sequedad también favorecen la erosión eólica, la resuspensión de partículas y la formación de polvaredas. Estos fenómenos son una fuente natural de partículas suspendidas gruesas que pueden afectar a la salud de la población y disminuir la visibilidad. En la ZMVM, tres zonas se ven impactadas de forma más recurrente por la erosión eólica, el lago de Texcoco y las zonas agrícolas al norte de la ZMVM y entre Chalco y Tenango del Aire, por lo que requieren especial atención.

Disminución en la nubosidad

Cabe destacar que la ZMVM se ve impactada por sistemas anticiclónicos, localizados tanto en el Golfo de México como en el océano Pacifico. Dichos sistemas inhiben la formación de nubes y propician altos niveles de radiación solar que, combinados con la altitud de la ZMVM, inciden en una mayor tasa de formación de O_3. Del Genio & Wolf (2000), investigadores de la NASA, señalan cómo el aumento de la temperatura puede reducir el espesor de las nubes bajas y, en consecuencia, incrementar también la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie (irradiancia). La mayor intensidad de luz solar favorece la actividad fotoquímica, e incrementa la formación de O_3 a partir de sus precursores (NO_X y COV) y de partículas suspendidas secundarias que se forman por la oxidación fotoquímica de COV y otros compuestos. Asimismo, la altitud de la ZMVM, que se encuentra por encima de los 2000 m s.n.m., es otro factor adicional que también incide en la formación de O_3, ya que es directamente proporcional a la irradiancia. Por ejemplo, a nivel de mar la concentración de fondo de O_3 es de 20 a 40 ppb, en tanto que a altitudes mayores puede alcanzar niveles de hasta 70 ppb (Jacobson, 2012).

4.4 Conclusiones

Mediante una revisión de bibliografía especializada, este capítulo muestra que hay evidencia científica sobre la afectación que el cambio climático puede causar en la calidad del aire. Este concepto, conocido como penalización climática, sugiere que los cambios en el sistema climático, como el aumento de la temperatura media global, la modificación de los patrones de precipitación y la variación en los patrones de los vientos, conllevan un impacto en los niveles de contaminación atmosférica, independientemente de las emisiones locales de contaminantes y precursores. Debido al efecto negativo que tienen en la salud pública, la literatura se ha enfocado en modelos que relacionan al cambio climático con la formación de O_3 troposférico y partículas $PM_{2.5}$. Se destaca que estos dos contaminantes son las principales preocupaciones en materia de gestión de la calidad del aire en la ZMVM.

En la ZMVM, el incremento de la temperatura media ha sido consistente con los niveles observados a escala global; en tan solo 17 años, la temperatura media anual ha incrementado en aproximadamente 1°C. Diferentes estudios muestran como un aumento de esta magnitud puede derivar en mayores niveles de concentración de O_3 y $PM_{2.5}$. Por ejemplo, el estudio de Shi *et al.* (2019) para el sureste de Estados Unidos concluyó que un aumento de 1°C en la temperatura media provoca un incremento de 2.9 ppb en la concentración de O_3 y de 1.05 µg/m^3 para $PM_{2.5}$. Si bien las condiciones de la región estudiada son distintas a las de la ZMVM, se podría suponer que la penalización climática en esta última podría tener una magnitud similar. Es así que el aumento de la temperatura a nivel local puede estar degradando de manera significativa la calidad del aire y contrarrestar los esfuerzos por mejorarla. Se destaca que esta penalización climática es de magnitud comparable con los beneficios ambientales obtenidos por la aplicación del ProAire ZMVM 2011-2020. En la evaluación más reciente se estimó que la aplicación de las medidas del ProAire entre 2017 y 2020 resultarían en una disminución en los niveles[10] de O_3 de 2.2 ppb en la ZMVM y 1.5 ppb en la Ciudad de México, valores que, con sus respectivas limitantes, podrían ser atenuados por la penalización climática para O_3 reportada en la literatura.

Si bien existe evidencia sobre los efectos que el aumento de la temperatura y el cambio climático tienen sobre los niveles de O_3 y $PM_{2.5}$, es importante que el impacto se analice local y regionalmente, de manera que las políticas públicas a futuro incorporen esta evidencia en el diseño y ejecución de estrategias para mejorar la calidad del aire. En la ZMVM, la afectación en la calidad del aire por el aumento de la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación, el incremento en la intensidad y frecuencia de ondas de calor, el mayor número e intensidad de incendios forestales, entre otros impactos del cambio climático, necesita investigarse con mayor detalle. Además, es muy probable que, con la intensificación de fenómenos sinópticos como ENOS, la gestión de la calidad del aire se haga más complicada y la percepción sobre la efectividad de las medidas de control de contaminantes se vea afectada. Esto se debe a que, al presentarse condiciones anómalas, se vuelve más difícil determinar si los cambios y variaciones en la calidad del aire se deben a los impactos de las políticas de reducción de emisiones, a los cambios asociados al clima y/o a la modificación de la química atmosférica.

Para estimar los impactos de las políticas públicas y los esfuerzos en la gestión de la calidad del aire, se requiere modelar las interacciones entre los contaminantes locales y el cambio climático, de forma que se puedan estimar los impactos a futuro. Estas simulaciones requieren de distintos insumos que ya se incorporan en el sistema de pronóstico de la calidad del aire de la Ciudad de México (AQFS-Mex); sin embargo, es importante actualizar los insumos del sistema, que incluyen un modelo meteorológico a escala regional, un modelo fotoquímico y un modelo de emisiones, para representar de manera más precisa los posibles impactos que el cambio climático tendrá en la contaminación a nivel local, simular las transformaciones químicas que ocurren en la atmósfera y la influencia de la dinámica meteorológica en estos procesos. De esta forma, será posible considerar fenómenos meteorológicos a escala local y regional, las características orográficas de la ZMVM, los cambios en los patrones de emisiones y las modificaciones en la química atmosférica, para cuantificar una penalización climática específica para la ZMVM.

Es fundamental que el diseño y el despliegue de políticas públicas para la gestión de la calidad del aire estén basados en evidencia científica, y que tomen en cuenta los impactos diferenciados del cambio climático sobre esta. Con base en la revisión bibliográfica de este capítulo, se recomienda investigar y elaborar modelos que incorporen los impactos antes mencionados sobre la formación de O_3 y partículas $PM_{2.5}$. De esta forma se podrá hacer frente a la incertidumbre sobre las consecuencias del cambio climático a futuro y sus efectos en la calidad del aire, al mismo tiempo que se nutre con mejor información a los funcionarios públicos y demás actores relevantes, para mejorar el diseño de políticas públicas, programas de gobierno y la comunicación del desempeño de los mismos.

Finalmente, se destaca que si bien el cambio climático conlleva una penalización en las concentraciones de ciertos contaminantes locales, el IPCC reconoce que las medidas de mitigación de emisiones tanto de CO_2 como de otros CyGEI, tales como el carbono negro o el CH_4, inciden de manera directa e inmediata en la mejora de la calidad del aire y se traducen en beneficios a la salud de la población. Asimismo, medidas de adaptación como el reverdecimiento de las zonas urbanas y otras soluciones basadas en la naturaleza también pueden contribuir a mejorar la calidad del aire. Es así que la implementación de acciones sinérgicas e integradas de mitigación y adaptación al cambio climático con políticas de gestión de la calidad del aire, es una estrategia lógica para generar beneficios sociales, ambientales y económicos que contribuyan de manera significativa a mejorar la calidad de vida de la población de la ZMVM.

10 Durante las horas de máximas concentraciones (14:00 a 16:00 horas).

05

Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México

Un inventario de emisiones detecta las principales fuentes contaminantes que afectan la calidad del aire y orienta el diseño de políticas públicas para reducir las emisiones que afectan a la salud.

05



El presente capítulo se elaboró a partir del inventario de emisiones de contaminantes criterio, compuestos tóxicos y compuestos y gases de efecto invernadero de la Zona Metropolitana del Valle de México, año 2018, elaborado por la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México.

Un inventario de emisiones es un registro de la cantidad de contaminantes generados por las distintas actividades y fuentes de emisión dentro de un espacio geográfico y durante un periodo de tiempo determinados. Los inventarios de emisiones son instrumentos útiles para la gestión de la calidad del aire; permiten caracterizar las principales fuentes contaminantes que afectan la calidad del aire, detectar actividades que tienen una contribución significativa en el volumen total de emisiones y orientar el diseño de políticas públicas de reducción de emisiones hacia las prioridades identificadas. Todo esto con el objetivo de disminuir los impactos de la contaminación atmosférica en la salud de la población y del ambiente. Además, los inventarios de emisiones se utilizan para evaluar y dar seguimiento a los ProAire, en relación con su efectividad para li-

mitar las emisiones contaminantes, y hacen posible el cumplimiento del derecho de la población a estar informada, coadyuvando en la búsqueda de lograr una buena calidad del aire a lo largo de todo el año.

El presente Capítulo resume la información de los resultados del inventario de emisiones de contaminantes criterio, compuestos tóxicos y compuestos y gases de efecto invernadero (CyGEI) para la ZMVM en el año 2018. Asimismo, se contextualiza la magnitud de las emisiones provenientes de fuentes externas a la zona de estudio, pero que juegan un papel importante en la calidad del aire local; estas son el corredor industrial Tula-Vito-Apasco y el volcán Popocatépetl.

El lector debe considerar que el Capítulo no es una descripción exhaustiva de los resultados del Inventario de Emisiones 2018, su objetivo es puntualizar los hallazgos que sustentan la selección de medidas y acciones de reducción de emisiones del ProAire ZMVM 2021-2030. Para más información sobre las emisiones por entidad federativa, jurisdicción y categoría emisora, así como memorias de cálculo, se sugiere revisar el documento completo del inventario (SEDEMA, 2021).

5.1 Alcance del Inventario de Emisiones 2018

En la ZMVM, la composición química del aire se ve modificada por compuestos que son emitidos por diversas actividades realizadas en la industria, los establecimientos comerciales y de servicios, los hogares y los automotores; así como por la producción de estos contaminantes asociada a procesos desarrollados en la naturaleza. Estos compuestos son las partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_X) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), estos dos últimos son conocidos por ser los principales contaminantes generadores de ozono; además, también se generan gases y compuestos de efecto invernadero (CyGEI) y compuestos tóxicos.

En el sector doméstico, comercial e industrial, así como en los automotores, la quema de combustibles es responsable de la formación de CO, NO_X, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2 y de CyGEI, en tanto que el uso de productos químicos para limpieza, desengrasantes, lacas y pinturas, entre otros, contribuyen notablemente a la emisión de COV, los cuales participan en la formación secundaria de O_3 y pueden ser tóxicos al ser humano. Asimismo, la gestión de residuos sólidos y aguas residuales, las vialidades, las actividades agropecuarias, los incendios forestales, la vegetación y los suelos, entre otras fuentes, tienen una contribución significativa en la emisión de contaminantes criterio, tóxicos y CyGEI. El inventario reporta las emisiones que son producidas por las actividades que se realizan dentro de la ZMVM, la cual está integrada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo. Estas actividades se agrupan en cuatro tipos de fuentes de emisión:



Fuentes móviles: cualquier vehículo automotor que circula por vialidades. Las fuentes no carreteras, como aeronaves y maquinaria agrícola o de construcción, se incluyen en las fuentes de área.



Fuentes puntuales o fijas: instalaciones de ubicación fija, como procesos industriales, comerciales o de servicios, que generen emisiones contaminantes y están sujetas a regulación ambiental a nivel federal o local.



Fuentes de área: instalaciones o fuentes de contaminantes que, si bien son pequeñas, numerosas y dispersas, en conjunto pueden generar emisiones considerables. Incluyen fuentes domésticas, comercios y servicios no regulados, la distribución y almacenamiento de combustibles, el uso de solventes, la gestión de residuos, actividades agrícolas y ganaderas, fuentes móviles no carreteras, vialidades e incendios, entre otras.



Fuentes naturales: procesos naturales que generan emisiones contaminantes.

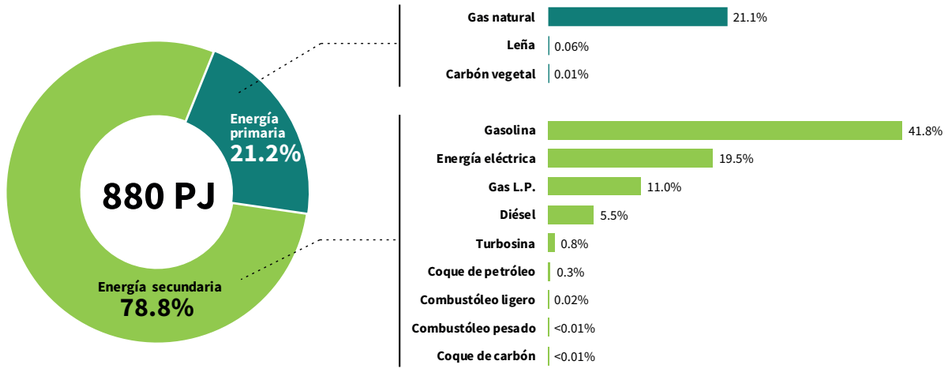
Estas fuentes de emisión se subdividen en 94 categorías, las cuales se enlistan en el Anexo 5.1. Los contaminantes evaluados en el Inventario de Emisiones 2018 se presentan en la Figura 5.1. En el presente capítulo se abordan las emisiones por fuente para los contaminantes regulados y atendidos a partir de la gestión de la calidad el aire local: NO_X y COV, por ser precursores de O_3, y partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$, CO y SO_2. No obstante, se destacan categorías emisoras relevantes cuando estas tienen una contribución significativa en las emisiones totales.



Figura 5.1 Contaminantes estimados en el Inventario de Emisiones 2018
Fuente: *Elaboración propia.*

5.1.1 Matriz energética

De acuerdo con la matriz energética de la ZMVM, se consume principalmente energía secundaria que se obtiene mediante algún proceso de transformación, como la gasolina, el diésel y la energía eléctrica. En el año 2018 se tuvo un gasto total de 880 petajoules (PJ), del cual 59.3% provino del procesamiento de petrolíferos, 19.5% de energía eléctrica y 21.2% de fuentes primarias (ver Figura 5.2). Este consumo equivale a 40.6 gigajoules (GJ) per cápita, lo que es igual a que cada persona utilice anualmente aproximadamente 1051 litros equivalentes de gasolina.



Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Figura 5.2 Matriz energética de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2018
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

El transporte es el sector de mayor demanda, con un gasto de casi la mitad de la energía total (438 PJ), seguido de la industria (275 PJ) y el sector habitacional (105 PJ). En cambio, los comercios y servicios tuvieron un consumo de 61 PJ, mientras que el aporte del sector agropecuario es mínimo (1 PJ). El consumo de combustibles fósiles está directamente relacionado con la generación de contaminantes atmosféricos y de CyGEI, pues cuando este aumenta, también lo hacen las emisiones.

5.2 Emisiones de contaminantes criterio y precursores de ozono

En esta sección se presentan las emisiones de contaminantes criterio y precursores en la ZMVM. La Tabla 5.1 resume las toneladas emitidas en 2018 para partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, SO_2, CO, NO_X, COV y amoniaco (NH_3), así como la contribución porcentual que cada tipo de fuente tiene en las emisiones totales por contaminante.

Tabla 5.1 Emisiones anuales de contaminantes criterio y precursores por tipo de fuente, 2018

	Emisiones (t/año)						
Tipo de fuente	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**SO_2**	**CO**	**NO_X**	**COV**	**NH_3**
Fuentes puntuales	4184 **12.0%**	3174 **19.2%**	1019 **33.2%**	5739 **0.8%**	9506 **6.6%**	19 003 **4.6%**	140 **0.3%**
Fuentes de área	15 385 **44.2%**	5906 **35.8%**	991 **32.3%**	33 898 **4.6%**	10 624 **7.4%**	271 133 **65.5%**	44 219 **94.2%**
Fuentes móviles	13 763 **39.6%**	7098 **43.0%**	1059 **34.5%**	689 254 **94.6%**	124 115 **85.8%**	91 771 **22.2%**	2572 **5.5%**
Fuentes naturales	1447 **4.2%**	322 **2.0%**	N/A	N/A	353 **0.2%**	31 914 **7.7%**	N/A
Total	**34 779**	**16 500**	**3068**	**728 891**	**144 598**	**413 821**	**46 931**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

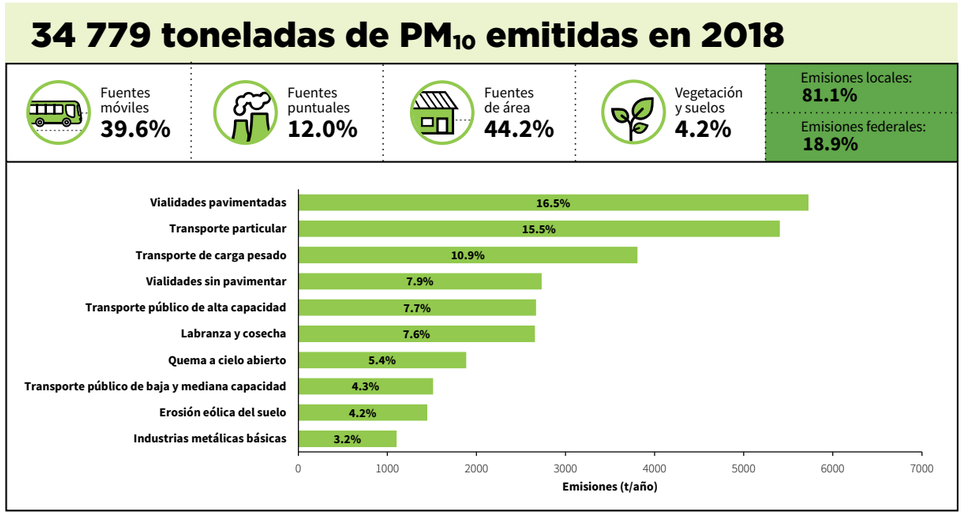
Como se expuso en el Capítulo 3, la problemática de la contaminación atmosférica en la ZMVM se asocia principalmente a las partículas suspendidas y O_3. Por esta razón, en las siguientes secciones se especifican las categorías de mayor emisión de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como NO_X y COV como principales precursores de O_3 en la ZMVM. En específico, se reportan las categorías clave que tienen una contribución individual superior al 3% o que en conjunto contribuyen con más del 80% de las emisiones totales. Es en estas actividades en donde deberán enfocarse las acciones e instrumentos regulatorios y de mercado para prevenir, controlar y reducir las emisiones, para así impactar positivamente en la mejora de la calidad del aire y, por consiguiente, en la salud de la población.

5.2.1 Partículas suspendidas

Además de los impactos ambientales, la cuantificación y caracterización de las partículas suspendidas es importante por las repercusiones que pueden tener en la salud de los habitantes de la ZMVM. Debido a sus pequeñas dimensiones, las partículas entran fácilmente al sistema respiratorio, provocando afecciones en los sistemas cardiovascular y pulmonar, entre otros. A continuación, se describen los resultados para las categorías que más contribuyen a las emisiones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$.

Partículas PM_{10}

La Figura 5.3 muestra las emisiones de PM_{10} por fuente contaminante y jurisdicción. Se observa que las fuentes de área son las fuentes de emisión predominantes de PM_{10}, aportando el 44.2% de las emisiones totales. Las vialidades pavimentadas se colocan como la categoría principal de emisión de PM_{10} con un 16.5%, debido a la suspensión de polvo causada por el intenso recorrido de los vehículos sobre las vialidades de la zona. Otras categorías que destacan son las vialidades sin pavimentar, la labranza y la cosecha, así como la quema a cielo abierto de desechos.



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.3 Emisiones de PM_{10} por fuente, categoría y jurisdicción, 2018
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

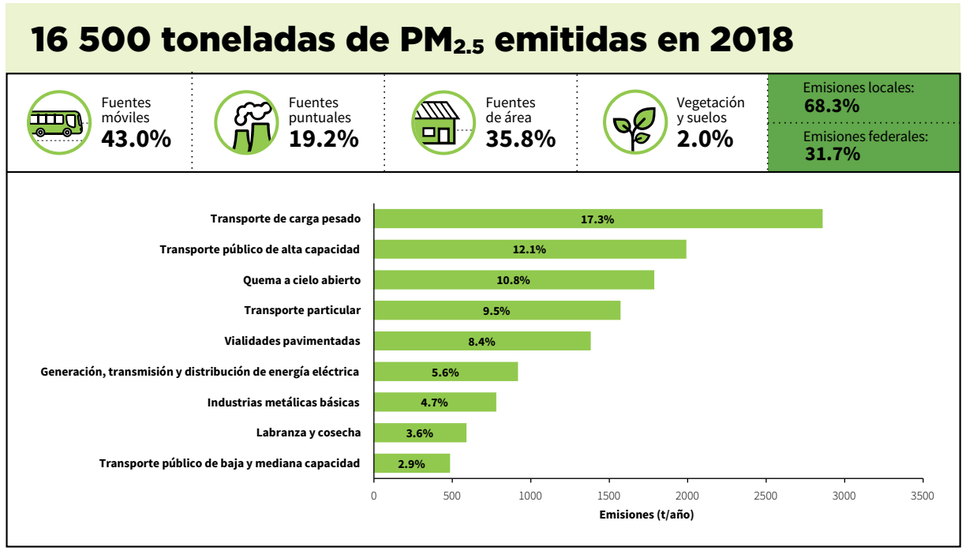


Por otro lado, las fuentes móviles se colocan como la segunda fuente con mayor emisión de PM_{10}, con un 39.6% de las emisiones totales. Los vehículos particulares (que incluyen autos particulares, camionetas SUV y motocicletas), vehículos de carga (mayores de 3.8 toneladas y tractocamiones) y el transporte público de alta capacidad (autobuses, Metrobús y Mexibús) y el de baja y mediana capacidad (taxis, vagonetas y microbuses) son las categorías que más contribución tienen en esta fuente de emisión. También se observa un aporte importante por parte de la erosión eólica del suelo y de las industrias metálicas básicas. Otra actividad importante generadora de PM_{10} es la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, con un aporte individual del 2.6%.

Partículas $PM_{2.5}$

Las partículas $PM_{2.5}$ son de gran importancia por los impactos que generan en la salud de la población, ya que por sus pequeñas dimensiones pueden penetrar al sistema respiratorio e incluso al torrente sanguíneo, y generar daños significativos. La Figura 5.4 muestra las emisiones de $PM_{2.5}$ por fuente contaminante y jurisdicción. Se observa que en el 2018 se emitieron más de 16 mil toneladas de partículas $PM_{2.5}$ en la ZMVM.

El sector transporte destaca como el mayor emisor de $PM_{2.5}$ en la ZMVM, representando un 43.0% de las emisiones totales. Dentro de este tipo de fuentes de emisión, los vehículos de carga pesados, el transporte público de alta capacidad y los vehículos particulares se identifican como los mayores contribuidores de partículas $PM_{2.5}$. Estos resultados se deben al uso de diésel como principal combustible en la flota pesada (autobuses, vehículos de carga mayores a 3.8 toneladas y tractocamiones) y a la alta cantidad de automóviles particulares que circulan en la zona. También es importante destacar que las emisiones de $PM_{2.5}$ causadas por la quema de diésel son más tóxicas en comparación con aquellas emitidas por la quema de gasolina (Benbrahim-Tallaa *et al*., 2012; California Air Resources Board, 2020; Robinson, 2017), y son consideradas carcinogénicas por la Organización Mundial de Salud (OMS). Por lo anterior, existe un área de oportunidad en la transición hacia tecnologías más limpias y eficientes como autos eléctricos y vehículos con trampas de partículas de última generación.



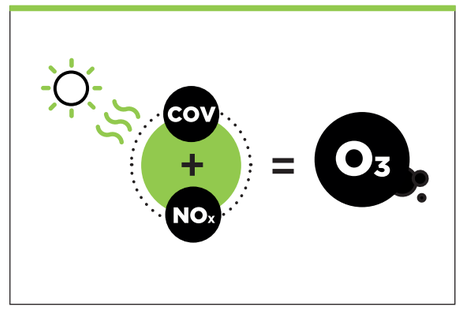
Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.4 Emisiones de $PM_{2.5}$ por fuente, categoría y jurisdicción, 2018
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Por otro lado, las fuentes de área se colocan como la segunda fuente de mayor contribución con un 35.8% de las emisiones totales del contaminante. La quema a cielo abierto, las vialidades pavimentadas, la labranza y la cosecha destacan como categorías con una fuerte incidencia en el nivel de partículas $PM_{2.5}$ emitidas. También se observa una ligera contribución de fuentes puntuales, especialmente por parte del proceso de generación y distribución de energía eléctrica y la industria metálica básica.

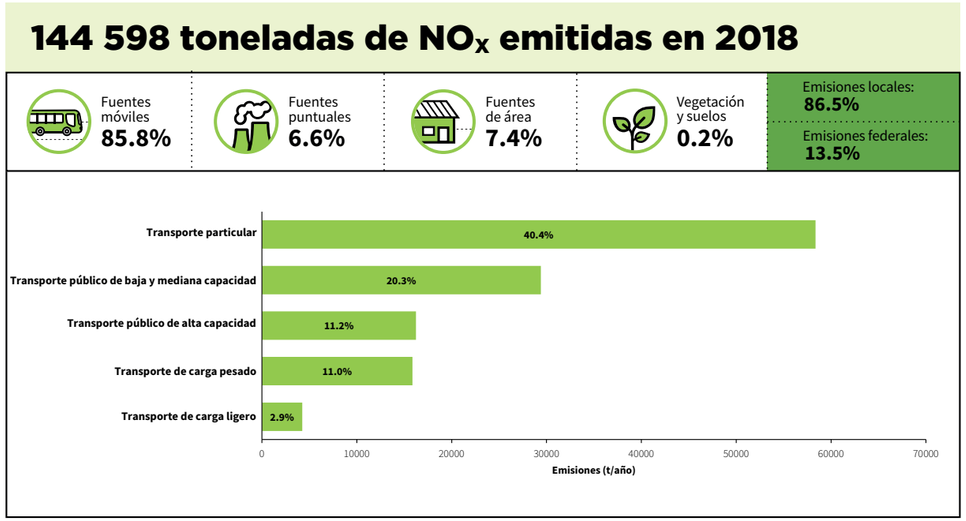
5.2.2 Precursores de ozono

El O_3 es uno de los contaminantes que supera constantemente los límites normados tanto en la Ciudad de México como en su zona metropolitana. Los COV y los NO_X son los principales contaminantes primarios que participan en la formación del O_3 troposférico, por lo que son denominados precursores. Las reacciones atmosféricas de formación de O_3 dependen de la proporción entre las concentraciones de estos contaminantes, por lo que resulta pertinente caracterizar las emisiones tanto de COV como de NO_X.



Óxidos de nitrógeno

La Figura 5.5 muestra que se emitieron más de 144 mil toneladas de NO_X en la ZMVM en 2018. Se observa claramente que las fuentes móviles son aquellas que aportan la gran mayoría de las emisiones, contribuyendo con un 85.8% del total para este contaminante. Dentro de esta fuente de emisión se aprecia una contribución igualmente importante del transporte público, privado, automóviles particulares y transporte de carga. Estos resultados se deben principalmente a los procesos de combustión a alta temperatura en todos los vehículos.

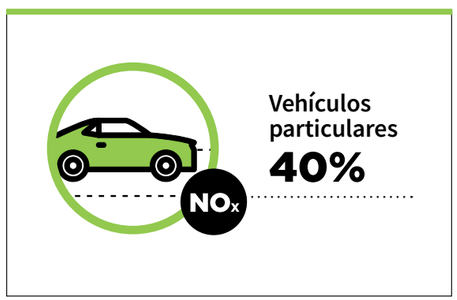


Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte de carga ligero corresponde a unidades de hasta 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.5 Emisiones de NO_X por fuente, categoría y jurisdicción, 2018
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

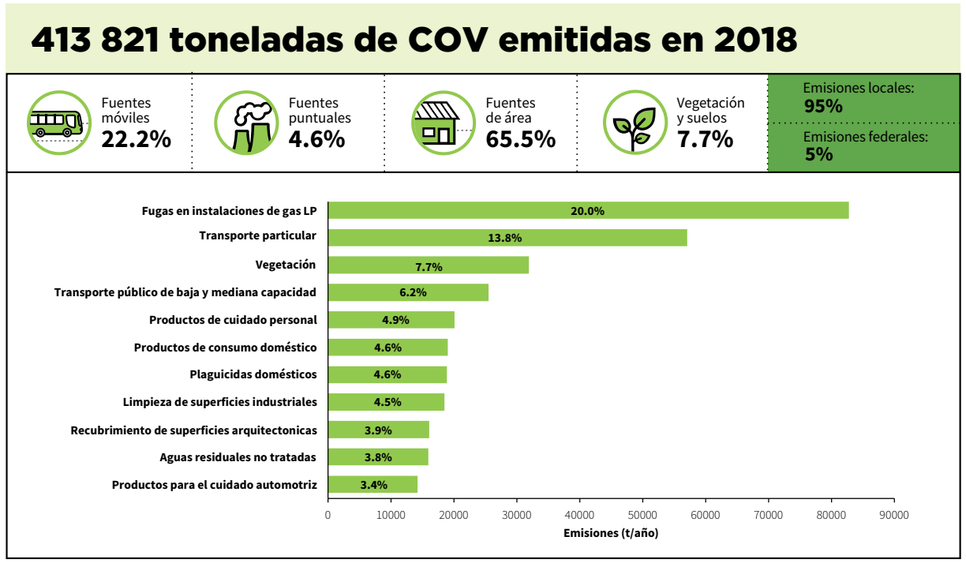
Dentro de los resultados resalta la contribución de los vehículos particulares a la emisión de NO_X, los cuales representan poco más de 40% de las emisiones.

Las cifras apuntan a que las posibles soluciones para la regulación de los NO_X son la inclusión de nuevas tecnologías en los vehículos para regular la emisión de este tipo de compuestos, regulaciones más estrictas en cuanto a los límites de emisión y medidas para lograr un mantenimiento constante y renovación de los vehículos con tecnologías menos contaminantes. Por ejemplo, los convertidores catalíticos son una tecnología que transforma estos contaminantes en compuestos menos dañinos antes de su emisión completa, en tanto que los vehículos eléctricos evitan la emisión en sí.



Compuestos Orgánicos Volátiles

La Figura 5.6 muestra las emisiones de COV por fuente contaminante y jurisdicción, señalando que en el 2018 se emitieron más de 413 mil toneladas en la ZMVM. Se observa que las fuentes de área representan alrededor de dos tercios de las emisiones totales con un 65.5%. Las fugas en instalaciones de gas L.P. es la categoría con mayor contribución, representando el 20.0% de las emisiones totales; esta actividad engloba todas las posibles fugas del gas en instalaciones fijas como comercios y viviendas. Dichos resultados indican que se deben implementar políticas para el control de fugas, tanto en el sector residencial como en los establecimientos que utilizan el combustible, al igual que incentivos para promover la transición hacia el uso de combustibles más limpios como el gas natural, o tecnologías como calentadores solares o estufas eléctricas.



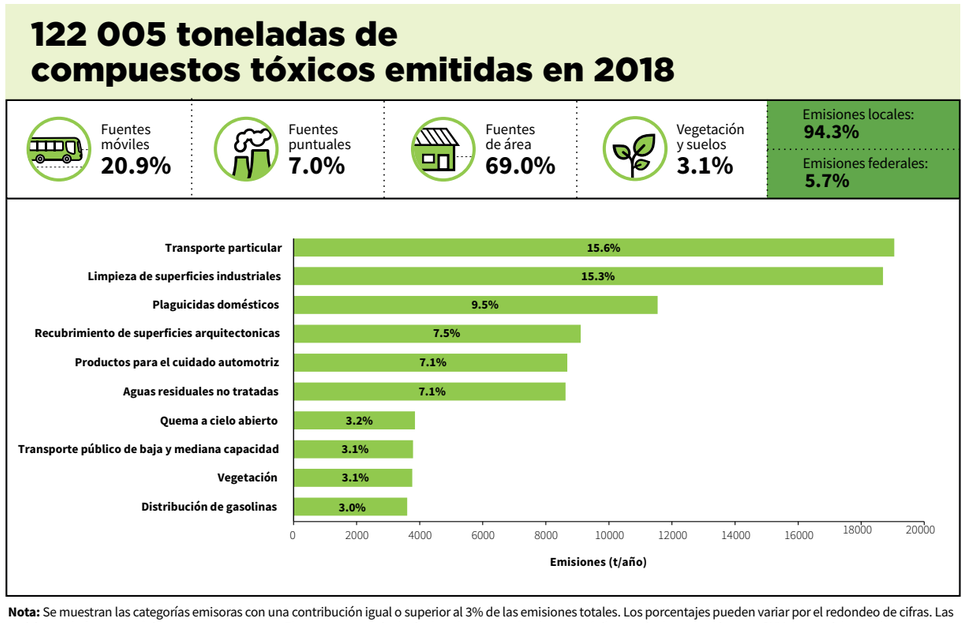
Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.6 Emisiones de COV por fuente, categoría y jurisdicción, 2018
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

El uso de solventes en productos comerciales y domésticos contribuye significativamente a la emisión de COV hacia la atmósfera, con un aporte del 31.6%. En específico, las categorías que más aportan son el uso de productos de cuidado personal, de consumo doméstico, plaguicidas, productos de limpieza para superficies industriales, recubrimientos arquitectónicos y productos para el cuidado automotriz. Estos resultados indican que es importante la elaboración de normas que regulen la composición de COV en estos productos, el cambio a solventes de menor impacto ambiental y la adopción de buenas prácticas para la reducción de las emisiones en todos los sectores. Finalmente, el transporte es otra fuente importante de emisión de COV, básicamente por los autos particulares y el transporte público de mediana y baja capacidad, grupos donde predomina el uso de unidades a gasolina. También es importante destacar la emisión natural de COV por la vegetación y otras actividades humanas como el tratamiento y disposición de residuos orgánicos sólidos y líquidos.

5.3 Emisiones de contaminantes tóxicos

Resulta necesario identificar las principales fuentes generadoras de tóxicos y caracterizar sus emisiones, para después diseñar acciones de reducción de emisiones que beneficien a la salud de la población. En el Inventario de Emisiones 2018 se cuantificaron las emisiones de 172 contaminantes tóxicos, que aportaron poco más de 122 mil toneladas. La Figura 5.7 muestra las emisiones por fuente y jurisdicción, así como las categorías que contribuyen de forma individual con 3% o más de las emisiones totales. Las diez categorías mostradas aportan el 74.5% de las emisiones de tóxicos.



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.7 Emisiones de compuestos tóxicos por fuente, categoría y jurisdicción, 2018
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Se destaca el aporte de las fuentes móviles, en concreto por los vehículos particulares (camionetas SUV, autos particulares y motocicletas), dado que son los más numerosos y las emisiones provienen en su mayoría de la gasolina. Si bien la emisión de estos compuestos puede ser reducida a través de acciones de disminución de COV, es necesario actuar directamente sobre los altos emisores de tóxicos.

Las fuentes de área son las de mayor contribución; estas están asocia das al uso y manejo de productos químicos en industrias, comercios y servicios y viviendas. Re saltan la limpieza de superficies industriales, el uso de plaguicidas domésticos, los recubrimientos arquitectónicos y el uso de productos para el cuidado automotriz.

Los compuestos tóxicos que más se emiten, en orden de magnitud, son:

- El tolueno (16.9%) y los isómeros de xileno (12.5%). Ambos provienen en su mayoría de fuentes de área, al ser insumos en la fabricación de pinturas arquitectónicas y automotrices, diluyentes y otros productos de uso comercial y doméstico, aunque también tienen un aporte importante de fuentes móviles.
- El alcohol metílico o metanol (8.5%), que se evapora durante su uso en el repintado automotriz y se produce naturalmente por procesos biogénicos en la vegetación, entre otras categorías.
- El 1,1,1-tricloroetano (7.4%), que se utiliza particularmente en la limpieza de superficies industriales.
- El metil ter-butil éter o MTBE (5.0%), cuya principal fuente son los vehículos automotores al ser empleado como aditivo en la gasolina.

En este contexto, resulta apremiante la regulación del contenido de COV en productos de uso industrial, comercial y doméstico, toda vez que la literatura sugiere que, en la mayoría de los inventarios, estas emisiones pueden estar subestimadas entre dos y tres veces.

5.4 Emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero

Los CyGEI tienen la capacidad de absorber la radiación solar y cumplen una función esencial al mantener estable la temperatura del planeta. Sin embargo, las actividades humanas han incrementado considerablemente sus emisiones, provocando el calentamiento global y ocasionando cambios en el sistema climático.

Dentro del Inventario de Emisiones 2018, se contabilizan las emisiones de CyGEI que ocurren físicamente dentro de la ZMVM como resultado de las actividades descritas en la sección 5.1. Es necesario enfatizar que el presente ejercicio se diferencia de otros inventarios de emisiones de CyGEI, ya que cumplen con estándares internacionales como las directrices del IPCC 2006 o el Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria (GPC, por sus siglas en inglés). La estimación es un complemento del inventario de contaminantes criterio, para así identificar sinergias y compensaciones que las medidas y acciones del ProAire ZMVM 2021-2030 puedan tener tanto en la mitigación del cambio climático como en la reducción de contaminantes de vida corta (por ejemplo, carbono negro y CH_4).

La Tabla 5.2 presenta las toneladas emitidas en 2018 para cuatro gases de efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e hidrofluorocarbonos (HFC) y un compuesto de efecto invernadero, el carbono negro. Se puede observar que el CO_2 es el GEI de mayor emisión en la ZMVM, seguido del CH_4. Como cada uno de los GEI tiene un impacto distinto en el calentamiento global, en función de su capacidad para absorber el calor y su tiempo de vida en la atmósfera, para poder comparar emisiones entre distintos GEI, se cuantifican las toneladas en CO_2 equivalente (CO_2eq). El reporte de CO_2eq contempla las emisiones de CO_2, CH_4, N_2O y HFC.

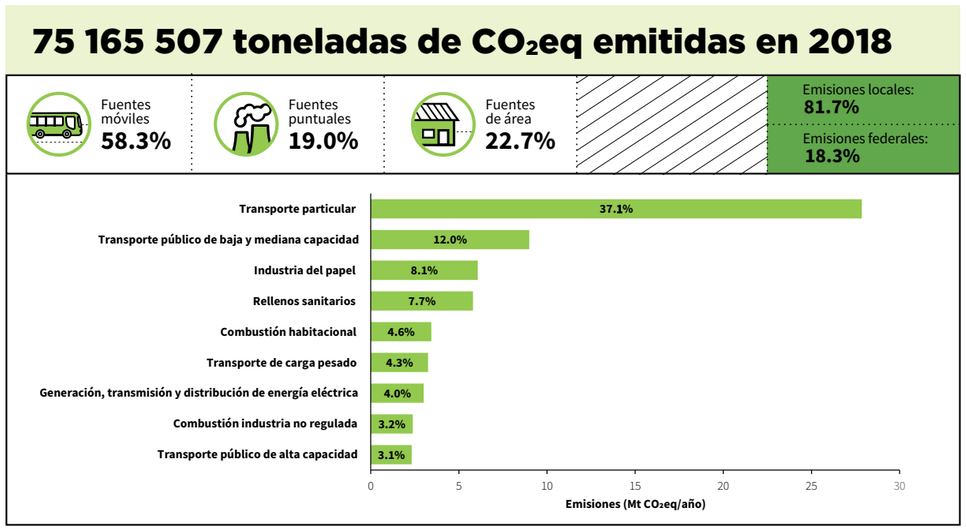
Tabla 5.2 Emisiones anuales de compuestos y gases de efecto invernadero por tipo de fuente, 2018

Tipo de fuente	Emisiones de GEI (t/año) CO_2	CH_4	N_2O	HFC	CO_2eq	Emisiones de carbono negro (t/año)
Fuentes puntuales	14 122 262 **21.4%**	332 **0.1%**	405 **15.9%**	0.4 **0.3%**	14 239 552 **19.0%**	534 **20.4%**
Fuentes de área	8 692 279 **13.2%**	290 798 **98.3%**	880 **34.6%**	1.2 **0.9%**	17 069 895 **22.7%**	555 **21.2%**
Fuentes móviles	43 217 059 **65.4%**	4570 **1.6%**	1260 **49.5%**	136.3 **98.8%**	43 856 060 **58.3%**	1526 **58.4%**
Fuentes naturales	N/A **N/A**	N/A **N/A**	N/A **N/A**	N/A **N/A**	N/A **N/A**	0.3 **<0.1%**
Total (t GEI/año)	**66 031 600**	**295 700**	**2544**	**138**		**2615**
Total (tCO_2eq/año)	**66 031 600 87.8%**	**8 279 595 11.0%**	**674 199 0.9%**	**180 113 0.3%**	**75 165 507 100%**	

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras. Para la estimación del CO_2eq se consideran los potenciales de calentamiento global a 100 años del quinto informe de evaluación del IPCC (Myhre *et al.*, 2013): 1 para CO_2, 28 para CH_4 y 265 para N_2O; para los HFC, el potencial varía en función del gas específico, con rangos de 100 a más de

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

La Figura 5.8 muestra las emisiones de CO_2eq por fuente contaminante y jurisdicción, además de destacar las nueve categorías principales que aportan de forma individual más del 3.0% de las emisiones y que en conjunto suman el 84% del CO_2eq. La mayoría de las categorías son fuentes móviles, como vehículos particulares, el transporte público y unidades de carga pesadas. También hay un aporte importante de fuentes puntuales en giros como la industria del papel y la generación de electricidad, así como procesos de combustión en fuentes de área (viviendas e industrias no reguladas).



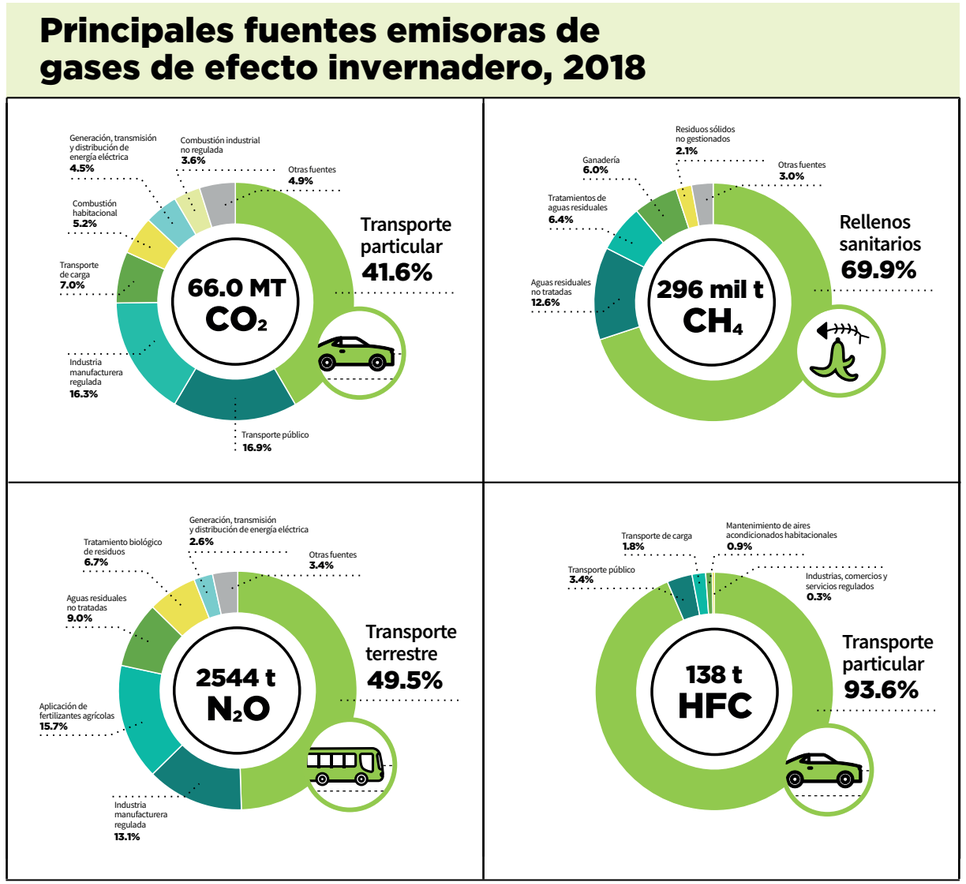
Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.8 Emisiones de CO_2eq por fuente, categoría y jurisdicción, 2018

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

De manera general, el uso de combustibles fósiles en fuentes móviles, industrias y viviendas es la principal fuente de CO_2. Para CH_4, la mayoría de las emisiones se deben a la disposición y tratamiento de residuos, junto con actividades ganaderas. La Figura 5.9 destaca las categorías principales para cada uno de los GEI contabilizados en el Inventario de Emisiones 2018.

Estos resultados permiten ver que, en actividades como el transporte, la combustión doméstica, comercial e industrial, y la gestión de residuos, es importante identificar sinergias entre la reducción de emisiones de contaminantes criterio y la mitigación de emisiones de GEI. Esto se puede lograr promoviendo la descarbonización del transporte y la red eléctrica, así como el uso de tecnologías y combustibles más limpios para reducir emisiones por la quema de combustibles fósiles. Además, la prevención y gestión integral de residuos sólidos y líquidos es fundamental, en especial porque reducir emisiones de CH_4 favorece no solo la mitigación del cambio climático, sino que tiene potencial para limitar la formación de O_3 troposférico (West *et al.*, 2006).



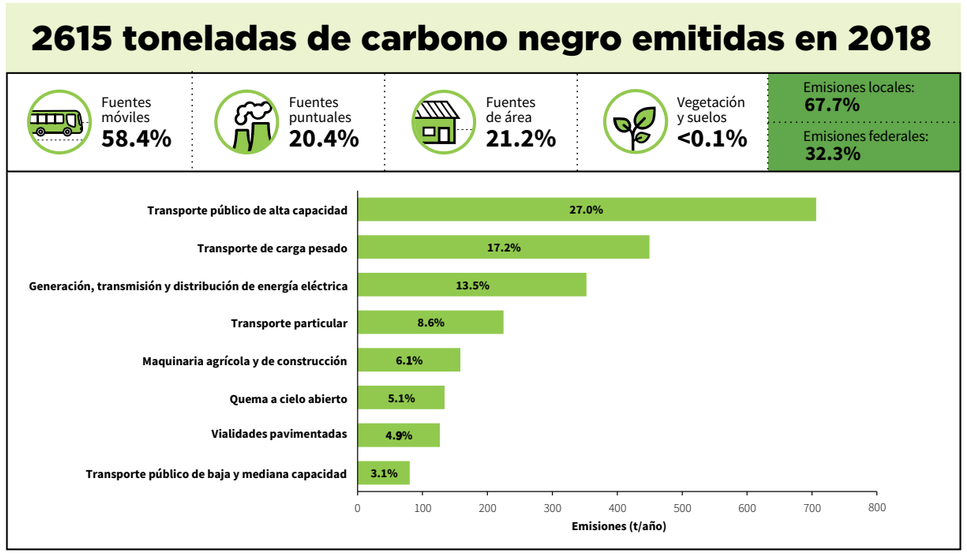
Nota: Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras.

Figura 5.9 Principales fuentes emisoras de gases de efecto invernadero, 2018

Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Además de los GEI, en el Inventario de Emisiones 2018 se estiman las emisiones de carbono negro. Este es un contaminante de vida corta que forma parte de las partículas finas, tiene la capacidad de generar efectos en la salud de la población y también contribuye al calentamiento global. Si bien este contaminante no se integra en la estimación de CO_2eq, en la literatura se reportan valores de potencial de calentamiento de 120 y hasta 1800 veces más que el del CO_2 (Bond *et al*., 2013; Hill, 2009).

Su fuente de emisión es la combustión incompleta de combustibles fósiles. Como se puede observar en la Figura 5.10, existen ocho principales categorías de fuentes emisoras de carbono negro, destacando el aporte de vehículos pesados que utilizan diésel, otras fuentes móviles, la generación de electricidad, así como la quema a cielo abierto de desechos y la maquinaria agrícola y de construcción.



Nota: Se muestran las categorías emisoras con una contribución igual o superior al 3% de las emisiones totales. Los porcentajes pueden variar por el redondeo de cifras. Las emisiones de fuentes móviles se agrupan por uso. El transporte particular incluye las categorías de automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas; el transporte de carga pesado incluye tractocamiones y vehículos mayores a 3.8 toneladas; el transporte público de alta capacidad agrupa autobuses y unidades de Metrobús/Mexibús; y el transporte público de baja y mediana capacidad incluye taxis, vagonetas y microbuses.

Figura 5.10 Emisiones de carbono negro por fuente, categoría y jurisdicción, 2018
Fuente: *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

5.5 Emisiones externas

La interacción entre la cuenca atmosférica del Valle de México y cuencas aledañas es relevante en términos del transporte transfronterizo de contaminantes. El impacto de este fenómeno depende de los niveles de emisiones provenientes de fuentes externas a la ZMVM, por lo que resulta importante contar con estimaciones de la masa de contaminantes generada por estas actividades. En este sentido, se detectan dos fuentes que, por la magnitud de sus emisiones, pueden incidir significativamente en la calidad del aire local: el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, en el estado de Hidalgo, y el volcán Popocatépetl en el límite oriental de la ZMVM con el estado de Puebla. En las siguientes secciones se resume la evidencia disponible sobre la emisión de contaminantes criterio provenientes de dichas fuentes.

Finalmente, es importante destacar que las emisiones de incendios forestales en entidades vecinas pueden tener una contribución puntual significativa y provocar eventos de alta contaminación. Esto se ejemplifica en la sección 3.6.1 del Capítulo 3.

5.5.1 Corredor industrial Tula-Vito-Apasco

En la zona metropolitana de Tula, Hidalgo, al noroeste de la ZMVM, se concentra una importante actividad industrial que resulta en la emisión de cantidades considerables de contaminantes criterio. En específico, se destacan dos fuentes fijas de jurisdicción federal:

- La refinería Miguel Hidalgo de PEMEX, la segunda más grande del país, que en 2016 procesó aproximadamente 202 mil barriles diarios de crudo de petróleo (PEMEX, 2018).
- La planta termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la CFE, la cual cuenta con una central de generación de ciclo combinado y una central de generación termoeléctrica convencional. En conjunto, las dos centrales tienen una capacidad total instalada de 2095 MW y en 2018 aportaron una generación anual bruta de 9874 GWh (SENER, 2018).

El consumo de combustóleo pesado y gas natural en estas instalaciones, entre otras actividades, resulta en la emisión de contaminantes criterio. La Tabla 5.3 resume las emisiones contaminantes de la termoeléctrica y la refinería, y su contribución porcentual al total de emisiones en el estado de Hidalgo. Se destacan las elevadas emisiones de SO_2, que representan el 93.1% en la entidad, debido al contenido de azufre en el combustóleo pesado; en ese sentido, la NOM-016-CRE-2016 especifica que el combustóleo de uso industrial puede contener hasta 2% de azufre en peso[1].

Tabla 5.3 Emisiones anuales de contaminantes criterio en el corredor Tula-Vito-Apasco, 2016

	Emisiones (t/año)					
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NO_x	COV
Inventario de emisiones del estado de Hidalgo (2016)	44 657	21 579	149 429	174 091	99 834	171 477
Refinería Miguel Hidalgo	1907	1101	29 929	1091	3103	2589
Termoeléctrica F.P.R.	6301	4900	109 237	3190	15 295	233
Total	**8208**	**6001**	**139 167**	**4281**	**18 398**	**2822**
Aporte al inventario 2016	18.4%	27.8%	93.1%	2.5%	18.4%	1.6%

Fuente: *Elaboración propia con datos del Inventario de emisiones del estado de Hidalgo (SEMARNATH, 2016) y la base de datos de fuentes puntuales de jurisdicción federal DATGEN.*

1 En el Anexo 2 de la NOM-016-CRE-2016 se especifica que en la zona industrial Tula-Vito-Apasco se dispondrá de combustible con un contenido máximo de azufre de 2% en masa. Esta zona está integrada por los municipios de Tula de Allende, Tepeji del Río de Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan y Apaxco, en los estados de Hidalgo y de México.

Al comparar las emisiones con las cifras del presente inventario, la refinería y la termoeléctrica generan 45 veces más SO_2 que toda la ZMVM. Para partículas, las emisiones de estas dos fuentes puntuales en 2016 equivalen a 23.6% de las emisiones de PM_{10} en la ZMVM y 36.4% de las partículas $PM_{2.5}$ en el año 2018.

En la ZMVM los vientos predominantes soplan del norte hacia el sur durante la mayor parte del año, por lo que la ZMVM se ubica viento abajo del corredor industrial. Es así como la dispersión y transporte de los contaminantes emitidos puede afectar a la población de la ZMVM. Por ejemplo, como se expuso en el Capítulo 3, las estaciones de monitoreo atmosférico localizadas en el noroeste de la ZMVM registran los mayores niveles de SO_2.

Distintos autores han cuantificado la influencia de las emisiones de la refinería y la planta termoeléctrica en la composición atmosférica de la ZMVM. La mayoría de estos resultados se han obtenido de campañas de campo en la zona de estudio. Por ejemplo, de Foy *et al*. (2009) estimó a través de simulaciones numéricas que aproximadamente la mitad de la concentración promedio de SO_2 en la ZMVM durante la campaña MILAGRO se debió a las actividades en el corredor industrial antes referido. El mismo autor sugiere en otro estudio que el complejo industrial de Tula es responsable de los picos de concentración de SO_2 observados en la ZMVM, aunque solo contribuye con 20% de las concentraciones promedio a lo largo del año (de Foy *et al*., 2007).

Estos resultados son congruentes con otras evaluaciones que reportan un aporte significativo de las emisiones del corredor de Tula en la concentración de SO_2 en la ZMVM, especialmente cuando las emisiones se combinan con condiciones meteorológicas desfavorables. Por ejemplo, Sosa *et al*. (2013) reporta que las concentraciones más altas de SO_2 en estaciones septentrionales, como Villa de las Flores (VIF), se asocian con vientos del Norte. Por otro lado, Almanza *et al*. (2012) encontró que actividades de quema en antorcha pueden contribuir entre el 10 y el 27% de los niveles totales de SO_2 en sitios urbanos de la ZMVM, con los valores más altos durante episodios de frentes fríos que impiden la dispersión de contaminantes (ver Figura 1.15 en el Capítulo 1).

Por último, otros estudios modelan el impacto a futuro que podría tener la reducción de emisiones en el corredor industrial sobre la calidad del aire de la ZMVM. García-Escalante *et al.* (2014) muestra cómo una reducción del 40% en las emisiones de SO_2 tiene un impacto positivo en la calidad del aire de la ZMVM respecto a un escenario base. En específico, se observa una disminución del 10% en la concentración de SO_2 en la ZMVM.

Con base en esta evidencia, las acciones de gestión de la calidad del aire en la ZMVM se deben ampliar hacia otras cuencas aledañas, con el fin de reducir las emisiones provenientes de actividades industriales en los sectores de generación de electricidad, petróleo y petroquímica. No obstante, se destaca que estos son giros de jurisdicción federal, por lo que la cooperación entre el gobierno nacional y las entidades respectivas es de suma importancia.

5.5.2 Actividad volcánica

El Popocatépetl, con una elevación de 5419 m s.n.m., es el segundo volcán más activo de México y está ubicado entre los límites del Estado de México, Puebla y Morelos. El volcán representa un riesgo considerable a la salud de la población de los estados mencionados debido a la emisión y dispersión de cenizas y dióxido de azufre (SO_2).

El volcán se caracteriza por ser una fuente de emisión constante de SO_2, generando algunas de las columnas más grandes de este contaminante registradas a nivel mundial (Khokhar *et al*., 2005; Loyola *et al*., 2008). Por efecto de los patrones de viento en la región, estas fumarolas pasivas pueden dispersarse hasta la Ciudad de México y su zona metropolitana, representando un problema de salud pública.

Debido a la naturaleza dinámica del volcán, es complicado cuantificar la cantidad exacta de SO_2 emitido por el Popocatépetl e identificar su contribución a los niveles de contaminación en la ZMVM. A través de modelos numéricos, el estudio MILAGRO realizado por de Foy *et al*. (2009) indicó que alrededor del 10% de los niveles de SO_2 en la ZMVM pueden atribuirse al volcán, pero es variable y dependiente de los patrones de viento y de lluvia. Otro estudio por el mismo autor estima que el volcán emite alrededor de 316 mil toneladas de SO_2 al año (de Foy *et al*., 2007) pero que este valor puede incrementar hasta 100 veces de acuerdo con las emisiones históricas reportadas para el volcán.

06

Salud pública y calidad del aire

9 de cada 10 personas en el mundo respiran mala calidad del aire, lo cual conlleva impactos negativos que afectan la salud y reducen la productividad de las personas.

06



El presente capítulo se elaboró con las aportaciones y revisiones de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, en específico de la Dirección General de Calidad del Aire, la cual validó los resultados de las Evaluaciones de Impactos a la Salud (EIS) y complementó la información que a continuación se presenta. Se agradece también el apoyo del Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE) para la selección de un Valor de una Vida Estadística apropiado para la cuantificación de los impactos económicos por la contaminación atmosférica, y la colaboración del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) en la revisión del capítulo y la integración de EIS específicas para la zona de estudio, para los años 2016, 2017 y 2018.

La mala calidad del aire es reconocida como una amenaza global a la salud pública. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), 9 de cada 10 personas en el mundo respiran mala calidad del aire (OMS, 2018d), lo cual conlleva impactos negativos al ser causa de muertes prematuras, afectar la salud de millones de habitantes y generar pérdidas económicas asociadas a gastos

en los sistemas de salud y la reducción de la productividad de las personas (Organización Panamericana de la Salud, 2016).

De acuerdo con el Instituto para la Métrica de Salud y Evaluación (IHME, por sus siglas en inglés), la contaminación del aire interior y exterior es el 5.º factor de riesgo de mortalidad más alto a nivel mundial, por encima de la desnutrición, el consumo del alcohol y el sedentarismo. A nivel global, en el 2017 contribuyó con aproximadamente 4.9 millones de muertes, por delante de cualquier otro factor ambiental, incluyendo la contaminación del agua y el saneamiento deficiente (Health Effects Institute, 2019), lo cual representa un aporte del 7.6% a la carga mundial de mortalidad (Cohen *et al*., 2017). En específico, en 2017 la contaminación del aire ambiente por partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) fue responsable de 2.9 millones de muertes, mientras que el ozono (O_3) provocó alrededor de 0.5 millones. La exposición a la contaminación del aire se vincula con el aumento de hospitalizaciones y muertes prematuras por enfermedades cardiopulmonares y otros padecimientos crónicos no transmisibles, así como por enfermedades infecciosas (ver Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Muertes globales atribuibles a la contaminación del aire

Causa de muerte asociada a la calidad del aire		Carga atribuible a la mala calidad del aire*	Millones de muertes globales asociadas a la calidad del aire	
Enfermedades crónicas no transmisibles	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)	**41%**	**1.31**	**27%**
	Diabetes mellitus tipo 2	**20%**	**0.28**	**6%**
	Cáncer de pulmón	**19%**	**0.35**	**7%**
	Enfermedad isquémica del corazón	**16%**	**1.39**	**28%**
	Accidente cerebrovascular	**11%**	**0.68**	**14%**
Enfermedades infecciosas	Infecciones en las vías respiratorias bajas	**35%**	**0.89**	**18%**

*Porcentaje de la mortalidad global total atribuible a la mala calidad del aire (interior y exterior), como consecuencia de la causa de muerte respectiva.

Fuente: *State of Global Air (Health Effects Institute, 2019) y Global Burden of Disease (Institute for Health Metrics and Evaluation, 2018a).*

La protección a la salud es la motivación principal de la elaboración e implementación del presente ProAire. La magnitud de los impactos de la contaminación del aire en la salud de la población de la ZMVM justifica la atención prioritaria que debe recibir el diseño de políticas públicas dirigidas a mejorar la calidad del aire y reducir la exposición a concentraciones que impliquen un riesgo a la salud, de tal forma que se procure el derecho humano a un medio ambiente sano. Asimismo, es de suma importancia que la percepción colectiva de la población con respecto a la calidad del aire corresponda a la gravedad de los impactos que esta puede provocar en su salud. Aumentar la conciencia pública es un paso esencial para que tanto la ciudadanía en general, como diferentes instituciones y actores clave, sean partícipes de los esfuerzos por reducir los niveles de contaminación en el aire.

Una gestión exitosa de la calidad del aire implica una colaboración intersectorial que fortalezca la función rectora de las autoridades ambientales al mismo tiempo que se involucra a otras dependencias gubernamentales, actores privados y a la sociedad civil. Una de las responsabilidades institucionales en materia de salud pública es optimizar el uso de instrumentos técnicos destinados a caracterizar la realidad local para poder seleccionar y ejecutar las mejores soluciones posibles. En este contexto, es fundamental describir el estado actual de los efectos que tiene la contaminación del aire en la salud de la población que habita en la ZMVM, de tal forma que se establezca un adecuado punto de partida y una ruta de acción que se traduzca en beneficios tangibles. El ProAire ZMVM 2021-2030 debe procurar la aplicación de estrategias eficaces que conduzcan a una mejora

sustancial en la calidad del aire y, con ello, priorizar la salud de la población.

Este capítulo presenta información sobre los efectos que tienen los principales contaminantes atmosféricos en la salud humana, con base en evidencia científica. Se resumen los resultados de Evaluaciones de Impactos a la Salud (EIS) y otros estudios recientes que cuantifican y monetizan la mortalidad evitable por la exposición a contaminantes atmosféricos en la ZMVM, en específico aquellos que más contribuyen al deterioro de la calidad del aire: el O_3 y las partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Estos resultados pueden interpretarse como los beneficios que se podrían alcanzar a nivel de sociedad y sistema de salud por mejorar el estado de la calidad del aire.

6.1 Factores sociodemográficos y condicionantes de la salud

Los impactos a la salud por la contaminación atmosférica se presentan de forma diferenciada, en función de factores como la edad, sexo y nivel socioeconómico de la población. Estas condicionantes pueden aumentar la vulnerabilidad de las personas, de tal forma que los beneficios en la reducción de la contaminación llegan a distribuirse de manera desigual en una población dada (Makri & Stilianakis, 2008).

Desde esta perspectiva, el conocimiento sobre los patrones sociodemográficos de la incidencia de enfermedades y problemas de salud es útil en la medida que contribuye a precisar los factores de riesgo relevantes y a tomar un enfoque de género e interseccional (Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal, 2008; Link & Phelan, 1996). A su vez, esto ayuda a diseñar estrategias y políticas públicas eficaces que se traducen en acciones específicas para reducir la exposición de los grupos más vulnerables. Estas distinciones son particularmente relevantes para el diseño de estrategias de comunicación y difusión de información sobre posibles medidas para disminuir el riesgo en virtud de la vulnerabilidad individual o de una población particular.

A continuación se describe la vulnerabilidad de grupos de población específicos y se establecen relaciones con indicadores sociodemográficos y económicos de la ZMVM. Posteriormente se presentan datos y estadísticas sobre la incidencia general de morbilidad y mortalidad en la zona de estudio para el año 2018.

6.1.1 Grupos de población vulnerables

La OMS especifica grupos de población vulnerable en función de factores intrínsecos, factores adquiridos como resultado de condiciones ambientales, sociales o de conducta, o simplemente por exposiciones inusualmente elevadas. Estos grupos incluyen a niñas y niños, personas adultas mayores y población con condiciones médicas preexistentes, así como grupos que viven en condiciones socioeconómicamente desfavorables (OMS, 2004). Adicionalmente, son potencialmente vulnerables las personas expuestas ocupacionalmente, grupos étnicos y económicos con un alto grado de prevalencia de enfermedades crónicas, mujeres embarazadas, mujeres adultas mayores y géneros con diferentes grados de exposición y/o susceptibilidad a la contaminación del aire (Bell *et al*., 2002). Otros estudios también consideran como factores que inciden en la vulnerabilidad a las actividades en exteriores, el lugar de residencia y el modo predominante de transporte utilizado. Cuando distintas variables se combinan, los efectos pueden ser aditivos o multiplicativos; el concepto de riesgo acumulativo considera diversos factores con el fin de evaluar la vulnerabilidad específica de una persona

o una población a los efectos perjudiciales de la contaminación del aire. La Figura 6.1 resume gráficamente las principales variables que pueden influir en la vulnerabilidad de una persona.

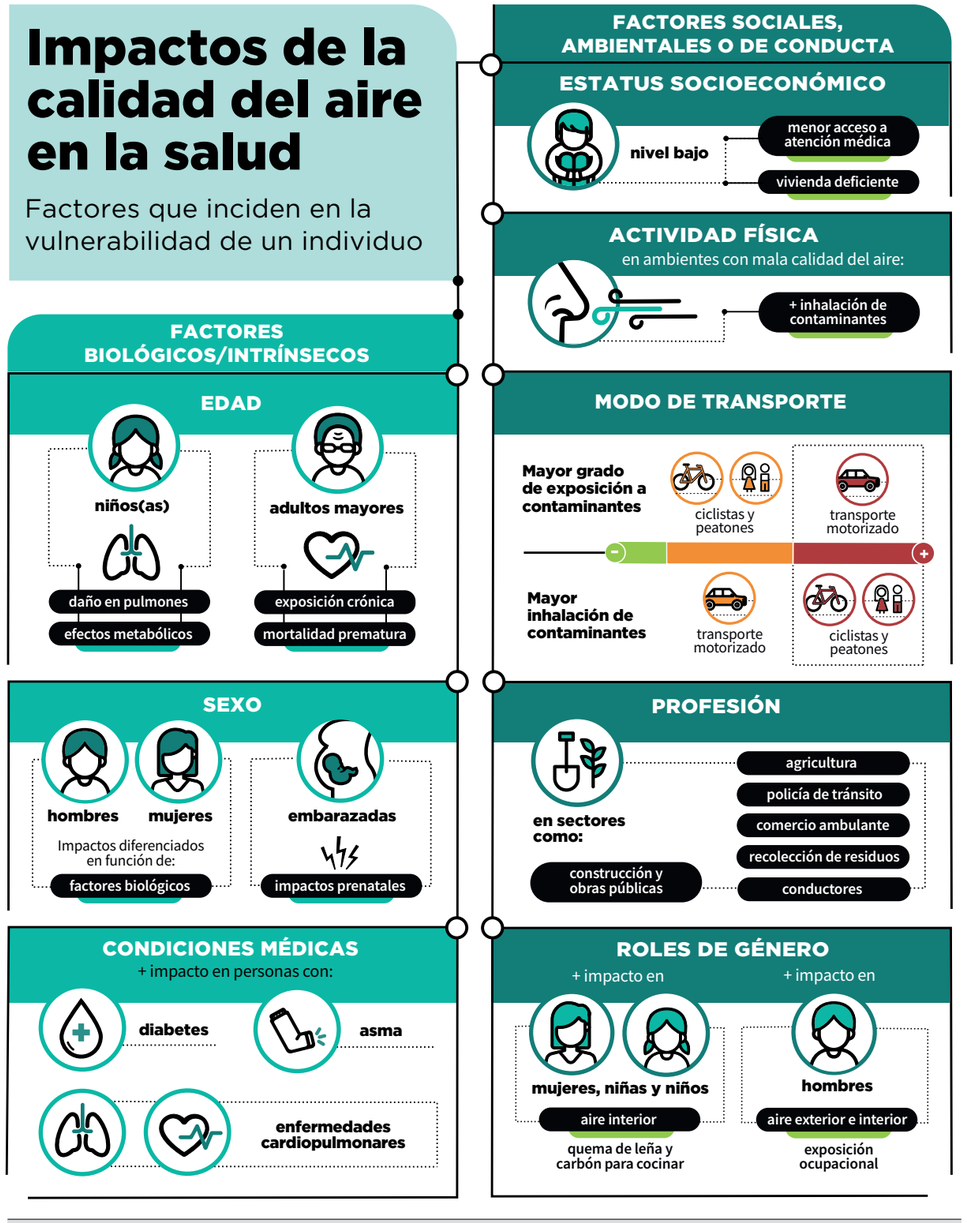


Figura 6.1 Factores que inciden en la susceptibilidad de la población a los efectos de la mala calidad del aire
Fuente: *Elaboración propia.*

Edad

Las niñas y niños son especialmente perjudicados por la mala calidad del aire por razones tanto biológicas como conductuales. En primera instancia, respiran más aire por unidad de peso corporal, por lo que inhalan una mayor proporción de sustancias tóxicas presentes en el aire ambiente en comparación con personas adultas expuestas a la misma concentración de contaminación. En general, este grupo de población también pasa más tiempo haciendo actividades físicas en exteriores, lo que puede conllevar una mayor exposición (Schraufnagel *et al*., 2019a).

El desarrollo de los sistemas respiratorio e inmunológico comienza durante la embriogénesis y continua por muchos años después del nacimiento. La exposición a contaminantes atmosféricos durante la infancia puede provocar efectos dañinos e irreversibles en los pulmones y otros órganos (Gauderman *et al*., 2015), impactos que se asocian a una capacidad pulmonar reducida y a otros problemas respiratorios y de salud durante la edad adulta (Gauderman *et al*., 2004). Por otro lado, la mala calidad del aire puede tener impactos sobre otros sistemas de órganos; por ejemplo, un estudio específico para la Ciudad de México encontró que las niñas y niños que viven en áreas más contaminadas tienen un peor desempeño cognitivo y una mayor incidencia de lesiones en el cerebro (Calderón-Garcidueñas *et al*., 2008). La contaminación también puede incidir en índices de masa corporal más elevados, como consecuencia de cambios metabólicos, que incluyen la resistencia a la insulina en respuesta a la exposición a sustancias tóxicas presentes en la atmósfera (Jerrett *et al*., 2014).

Los grupos de edad avanzada sufren de efectos perjudiciales en la función pulmonar por la exposición crónica a la contaminación atmosférica. Diferentes estudios evidencian que las personas adultas mayores tienen un riesgo más elevado de experimentar incrementos en la morbilidad, ingresos hospitalarios, visitas a las salas de emergencia y mortalidad, principalmente por la exacerbación de enfermedades crónicas cardiopulmonares o infecciones de las vías respiratorias (Simoni *et al*., 2015). Además, la mala calidad del aire puede tener otros efectos como el deterioro de funciones cognitivas, mayor riesgo de padecer demencia y derrames cerebrales (Schraufnagel *et al*., 2019b; Wellenius *et al*., 2012), reducción de la densidad mineral ósea y una mayor incidencia de fracturas (Alver *et al*., 2007, 2010).

El Consejo Nacional de Población (CONAPO) estima que, dentro de la ZMVM, en 2020 habitaban 4.67 millones de personas menores de 15 años y 2.86 millones de personas con 60 años o más, lo cual representaba el 34.3% de la población. Asimismo, como se indicó en el Capítulo 1, las dinámicas de transición demográfica muestran que el peso relativo de la población de edad avanzada será cada vez mayor. Si bien las demarcaciones con más población concentran grandes cantidades de personas vulnerables, como es el caso de las alcaldías Iztapalapa y Gustavo A. Madero en la Ciudad de México y los municipios mexiquenses de Ecatepec de Morelos, Nezahualcóyotl y Naucalpan de Juárez, la alta densidad poblacional en la Ciudad de México hace que otras alcaldías como Venustiano Carranza y Cuauhtémoc tengan una elevada cantidad de población vulnerable por unidad de área. Finalmente, se destaca que los municipios periféricos tienen un mayor peso de grupos de población vulnerable debido a su edad, respecto del total de habitantes (ver Figura 6.2); este es un fenómeno que requiere especial atención, ya que, como se describe más adelante, estas demarcaciones presentan generalmente condiciones socioeconómicas desfavorables que también aumentan la vulnerabilidad de la población; asimismo, la cobertura limitada del SIMAT en las periferias de la ZMVM dificulta la evaluación de la exposición a la mala calidad del aire y los impactos a la salud.

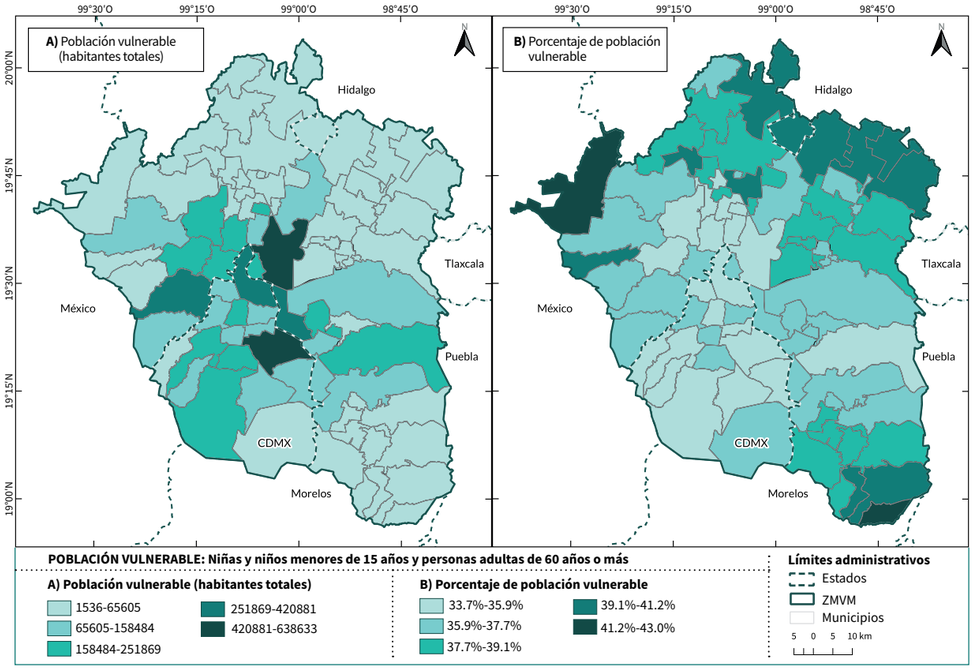


Figura 6.2 Distribución de grupos de población vulnerable (niñas, niños y personas adultas mayores) en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2013).*

Género

Diferentes estudios sugieren que mujeres y hombres, así como niñas y niños, pueden experimentar impactos distintos por la contaminación atmosférica. Este fenómeno resulta de una combinación de dos factores: diferencias en respuestas biológicas que hacen más susceptibles a un sexo en específico (por ejemplo, regulaciones hormonales y tamaño corporal), y diferencias en patrones conductuales y de actividad en función de roles de género que influyen en la posible exposición a contaminantes (Clougherty, 2010). Estudios epidemiológicos han encontrado un mayor nivel de riesgo de experimentar afecciones respiratorias en mujeres jóvenes, y mayores niveles de mortalidad en mujeres de edad avanzada, aunque los resultados son limitados e inconsistentes (Makri & Stilianakis, 2008). Dado que 51.6% de la población de la ZMVM son mujeres, el diseño de intervenciones efectivas para reducir la exposición y comunicar los riesgos asociados a la mala calidad del aire requiere claridad sobre cómo factores ligados al sexo y al género, así como la distribución espacial de estos, pueden generar impactos diferenciados en la salud.

La estratificación ocupacional es una de las principales causas de los impactos diferenciados entre el género femenino y el masculino. Los hombres conforman un mayor porcentaje de la fuerza laboral (62% de la población económicamente activa de la ZMVM, según datos del Censo de Población y Vivienda 2010) por lo que pueden dominar efectos asociados a la inhalación de contaminantes específicos durante actividades industriales o agrícolas. Por otro lado, las mujeres involucradas en actividades del cuidado del hogar pueden presentar mayores índices de exposición a contaminantes generados durante la cocción de alimentos, en especial cuando se utilizan combustibles como la biomasa y el carbón, o actividades de limpieza (Bose & Diette, 2016; OMS, 2016a), lo cual puede exacerbar los impactos por la mala calidad del aire exterior (Gordon *et al*., 2014). En la ZMVM, las periferias de la mancha urbana registran una mayor relación entre mujeres y hombres, además de presentar un mayor porcentaje de población femenina económicamente inactiva que se dedica principalmente a quehaceres del hogar, por lo que esta población puede verse más expuesta a contaminación del aire interior.

Nivel socioeconómico

Las poblaciones socioeconómicamente desfavorecidas comúnmente son identificadas con base en el nivel de ingresos o el nivel educativo – atributos que pueden reflejar más de un factor potencial de riesgo a la salud (Makri & Stilianakis, 2008). Algunas variables a considerar en cuanto a la vulnerabilidad de la población de bajo nivel socioeconómico son las limitaciones físicas para minimizar la exposición, ya sea por la ubicación de áreas residenciales y centros de trabajo en zonas con peor calidad del aire, características deficientes de las viviendas o por los modos de transporte dominantes en función del nivel socioeconómico; a estas condiciones se suma la habilidad para hacer frente a los impactos de la contaminación en términos del acceso a la atención médica y servicios sociales.

Diferentes estudios reconocen a la población que vive en situación de pobreza como un grupo expuesto con mayor frecuencia a la contaminación del aire, mientras que otros sugieren lo contrario. El Estudio de Salud y Contaminación del Aire en Latinoamérica ESCALA (Romieu *et al*., 2012), cuyo objetivo era estimar el efecto de la exposición a PM_{10} y O_3 en la mortalidad para nueve ciudades de América Latina, entre ellas la Ciudad de México, evaluó si un nivel socioeconómico bajo podría incrementar la susceptibilidad de diferentes grupos de edad a los efectos de la contaminación atmosférica. Si bien se reportaron patrones de mayor riesgo de mortalidad respiratoria entre la gente de bajo nivel socioeconómico y mayor riesgo de mortalidad cardiovascular entre la población con nivel socioeconómico medio o alto, los resultados observados no fueron consistentes entre las ciudades analizadas, por lo que se concluyó que no había evidencia convincente al respecto.

Otros estudios que exploran la vulnerabilidad por factores socioeconómicos (Deguen & Zmirou-Navier, 2010; Romero-Lankao *et al*., 2013) sugieren que los riesgos de exposición a la contaminación existen sin límites o distinciones sociales, e incluso señalan que afectan a todas las personas por igual. Sin embargo, también destacan que poblaciones de bajo nivel socioeconómico a menudo viven en condiciones que pueden elevar su exposición, especialmente en áreas con altos niveles de contaminación y viviendas de baja calidad que ofrecen poca protección contra la infiltración interior de tóxicos en el aire ambiente. Además, las poblaciones de bajo nivel socioeconómico generalmente presentan una mayor prevalencia de enfermedades que predisponen a otros impactos o que pueden ser exacerbadas por la contaminación del aire, tales como enfermedades cardiovasculares y asma; esto se relaciona con la disponibilidad y el acceso a servicios de salud, educación, estilo de vida y factores ligados al trabajo y al modo de transporte.

La ausencia de un consenso sobre la metodología utilizada para investigar las desigualdades ambientales y sociales hace que la mayoría de los resultados no sean comparables entre sí, lo que podría explicar, en parte, las discrepancias observadas. Sin embargo, un patrón general es que, independientemente de la exposición, las poblaciones con bajo nivel socioeconómico experimentan mayores efectos en la salud debido a que tienen menor acceso a la atención médica. Esto indica que la vulnerabilidad por el nivel socioeconómico de la población no está necesariamente vinculada con una mayor exposición a la mala calidad del aire, sino que el acceso limita-

do a servicios de salud de calidad es uno de los factores de riesgo principales, ya que no pueden atenderse adecuadamente en caso de padecer alguna enfermedad.

En específico para la ZMVM y según datos del Índice de Rezago Social del Consejo Nacional de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), en 2015 alrededor del 22% de la población de la ZMVM no era derechohabiente a servicios de salud (CONEVAL, 2015). Por otro lado, es importante considerar la cobertura hospitalaria con la que cuenta la ZMVM y determinar si existe una relación entre zonas que concentran población de bajo nivel socioeconómico y el acceso a servicios de salud. El Instituto de Geografía de la UNAM elaboró un Atlas de Vulnerabilidad[1] en el que se visualiza la accesibilidad de la población a servicios de salud (UNAM, 2020): la mayor cobertura (acceso a camas hospitalarias, personal de enfermería, médicos generales y especialistas, unidades médicas) se concentra en la zona de hospitales de Tlalpan, al sur de Coyoacán, y en las alcaldías Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Venustiano Carranza; por otro lado, conforme un hogar se aleja de la zona centro de la Ciudad de México disminuye la cobertura. De forma coincidente, los rangos de pobreza en la ZMVM aumentan en medida que se avanza hacia las periferias de la metrópoli (CONEVAL, 2017).

Embarazo y vulnerabilidad prenatal

La exposición a contaminación del aire durante la gestación se asocia a resultados adversos del embarazo y un crecimiento fetal reducido (Schraufnagel *et al*., 2019a). Por ejemplo, la exposición a partículas suspendidas representa un mayor riesgo de nacimientos con bajo peso (Fleischer *et al*., 2014; Huang *et al*., 2015). La contaminación del aire también incrementa el riesgo de partos prematuros, independiente de otros factores de vulnerabilidad y con impactos sinérgicos cuando se asocia con otros agravantes como condiciones socioeconómicas desfavorables, diabetes, hipertensión y el hábito de fumar (Yorifuji *et al*., 2013). Los efectos adversos de la mala calidad del aire sobre mujeres embarazadas y la vulnerabilidad prenatal han sido observados aun en niveles bajos de contaminantes; bebés recién nacidos también tienen un mayor riesgo de presentar problemas de salud que pueden persistir durante su vida entera, como una menor capacidad pulmonar y problemas cognitivos.

Condiciones médicas preexistentes

Los efectos de la exposición aguda a contaminantes atmosféricos incluyen la exacerbación de enfermedades preexistentes del sistema respiratorio, como asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), así como aquellas del sistema cardiovascular, incluyendo isquemia, arritmias e insuficiencia cardíaca. La exposición crónica está ligada a una mayor tasa de mortalidad, a una mayor incidencia de cáncer de pulmón y neumonía, y al desarrollo de aterosclerosis (Abelsohn & Stieb, 2011). Otras condiciones médicas como la diabetes mellitus, la obesidad y factores genéticos y epigenéticos pueden incrementar la susceptibilidad a los efectos de la contaminación del aire (Schraufnagel *et al*., 2019a; Vecoli *et al*., 2016). En muchos casos, estas vulnerabilidades coinciden con otros agentes sociales estresores como la pobreza, vivienda deficiente, acceso reducido a alimentos nutritivos y servicios de salud, y estrés psicosocial (Koman *et al*., 2018). Finalmente, factores conductuales como el hábito de fumar (Sood *et al*., 2010) y el sedentarismo, que derivan en padecimientos médicos particulares, también inciden en un mayor nivel de riesgo.

1 El Atlas de Vulnerabilidad corresponde a la plataforma "iCOVID-19", un esfuerzo impulsado por la UNAM a través del Instituto de Geografía como respuesta al contexto derivado de la pandemia de la COVID-19, enfermedad causada por el virus SARS-CoV-2.

Exposición ocupacional

Otro factor adicional que incrementa la susceptibilidad a los efectos de la mala calidad del aire es la exposición a otras sustancias tóxicas con las que interactúa la población a lo largo de sus prácticas laborales, que suman a los impactos de los contaminantes del aire (OMS, 2004). La exposición ocupacional a la mala calidad del aire ambiente afecta a un gran número de personas; el problema es de especial interés porque las medidas convencionales implementadas en ambientes interiores, como la buena ventilación, no son aplicables bajo estas condiciones, además de que las personas empleadas pueden tener poco o ningún control sobre las fuentes externas de contaminación. Algunos sectores cuyo personal se ve expuesto a la contaminación del aire ambiente por cuestiones ocupacionales son el transporte de mercancías, el transporte público, la agricultura, el comercio ambulante, la policía de tránsito, la industria de la construcción y reparación de caminos, entre otros (OMS, 2018c). Es fundamental revisar las normas de exposición laboral en giros industriales donde se utilizan sustancias tóxicas, así como establecer límites para actividades que no cuentan actualmente con alguna regulación.

Actividad física en exteriores

Realizar actividad física al aire libre en un ambiente contaminado es un factor preponderante que genera impactos perjudiciales sobre la salud. Hacer ejercicio en ambientes urbanos puede conducir a que las personas inhalen mayores dosis de contaminantes, afectando al sistema respiratorio y cardiovascular (Sharman *et al*., 2004). Varios estudios evalúan los impactos negativos de hacer ejercicio en ambientes contaminados y cómo se comparan los resultados con conductas sedentarias. Conclusiones opuestas sugieren inquietudes sobre las consecuencias negativas de realizar ejercicio al aire libre en ambientes altamente contaminados, en términos de si se contrarrestan los efectos positivos que el ejercicio tiene en la salud general de un individuo (Laeremans *et al*., 2018) o si la actividad física se considera benéfica independientemente (Wong *et al*., 2007).

Este tema es relevante considerando la prevalencia de elevadas concentraciones de algunos contaminantes en la ZMVM, aunado a que cada vez se promueven en mayor medida los viajes activos (caminar o usar la bicicleta). Es necesario que existan políticas de salud pública que indiquen cuándo sí, cuándo no, en dónde y qué actividades físicas se pueden realizar en exteriores durante episodios de alta contaminación, así como dictámenes para poner o cancelar eventos deportivos masivos en caso de una contingencia ambiental atmosférica.

Se sabe que una adecuada actividad física previene la mortalidad prematura e incrementa la calidad de vida (Hallal *et al*., 2012). La movilidad activa se ha introducido como un medio innovador y accesible para promover la actividad física en las ciudades; sin embargo, cuando esta se lleva a cabo en entornos urbanos, las personas pueden inhalar más contaminantes. Por ejemplo, la deposición de partículas ultrafinas (< 0.1 µm) durante la respiración bucal aumenta al realizar actividad física; en particular, se ha estimado que esta suele ser 4.5 veces mayor durante el ejercicio que en reposo, debido al aumento combinado de la fracción de deposición y el volumen respiratorio por minuto (Daigle *et al*., 2003).

Investigaciones detalladas del balance riesgo-beneficio entre los viajes activos y la exposición a la contaminación, bajo diferentes escenarios de concentración de contaminantes y nivel de actividad física, sugieren que los beneficios de esta última compensan los daños por la contaminación atmosférica en todos menos los escenarios de contaminación más extremos. Por ejemplo, bajo una concentración de 100 µg/m^3 de $PM_{2.5}$[2], los efectos

2 Para el año 2018, solamente el 25 de diciembre se alcanzaron niveles de concentración de 100 µg/m^3 como promedio de 24 horas. Durante este día, siete estaciones automáticas de la ZMVM presentaron promedios diarios mayores a 90 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ (umbral que no fue superado en ningún otro día). Como referencia, el límite de concentración que indica la NOM-025-SSA1-2014 para el promedio diario es de 45 µg/m^3.

dañinos por realizar actividad física en exteriores superarían los beneficios generales después de andar en bicicleta por más de 1.5 horas o caminar más de 10 horas al día (Tainio *et al*., 2016).

Los efectos también pueden variar en función de la edad. Un estudio reciente en 135 personas adultas mayores, con y sin EPOC o cardiopatía isquémica preexistente, evaluó las respuestas cardiorrespiratorias agudas después de una caminata de dos horas en concentraciones altas y bajas de contaminación (Sinharay *et al*., 2018). Se demostró que los efectos positivos de caminar, en cuanto a la rigidez arterial y la función pulmonar, se pierden en un ambiente contaminado, lo cual ilustra que la mala calidad del aire puede atenuar los beneficios de realizar actividad física en la población de edad avanzada.

Modo de transporte y exposición a nivel de calle

La exposición a contaminantes generados por fuentes móviles, como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_X), partículas suspendidas y carbono negro, varía entre viajantes o *commuters* que se transportan de forma activa (peatones y ciclistas) y quienes utilizan algún tipo de transporte motorizado, como automóviles particulares, motocicletas, autobuses públicos y sistemas de transporte masivo (por ejemplo, el STC Metro, el Metrobús o el Mexibús), entre otros (ver Figura 6.3).

Una revisión sistemática de 39 estudios (Cepeda *et al*., 2017), que compara la exposición a distintos contaminantes atmosféricos en función del modo de transporte, concluyó que las y los usuarios de automóviles, autobuses y transporte colectivo de baja capacidad son quienes están expuestos a niveles más altos de contaminación atmosférica, seguidos por quienes utilizan automóviles con ventilación controlada, ciclistas y peatones. La menor exposición se registra para aquellas personas que viajan a través de sistemas de transporte masivo y motociclistas. La población ciclista, segui-da por los peatones, inhala y asimila las mayores dosis de contaminantes debido a un incremento de la ventilación minuto[3] y mayores tiempos de traslado; sin embargo, el efecto negativo de una mayor dosis inhalada no se sobrepone a los impactos positivos que el transporte activo tiene sobre la salud física, en términos de la esperanza de vida y en comparación con personas que usan un modo de transporte motorizado.

Si bien estas son tendencias generales, clasificar y jerarquizar los distintos modos de transporte requiere una consideración detallada de múltiples factores como la meteorología local, las características del tráfico vehicular, la ruta elegida y el tipo de vialidad, el combustible utilizado, la ventilación del vehículo, tecnologías para la reducción de emisiones provenientes del escape, entre otras (Knibbs *et al*., 2011). Por ejemplo, la exposición a carbono negro cerca de vialidades es mayor cuando el flujo vehicular presenta tanto velocidades bajas (<30 km/h) como elevadas (>80 km/h), lo cual coincide con los factores de emisión de vehículos. Asimismo, un mayor aforo vehicular también contribuye a incrementar la exposición, en particular cuando se transita en vialidades primarias (Dons *et al*., 2013). La evidencia disponible sugiere que, en general, la zona de mayor exposición a contaminación proveniente de fuentes móviles se encuentra a una distancia de 300 a 500 metros de las vialidades primarias, con variaciones asociadas a las concentraciones de fondo, las condiciones meteorológicas y la temporada del año (Health Effects Institute, 2010). Estudios específicos en la Ciudad de México determinaron mayores niveles de concentración de $PM_{2.5}$ dentro de un radio de 50 metros desde vialidades con alto tránsito vehicular y con vehículos a diésel; asimismo, los niveles de $PM_{2.5}$ decrecen en 7% (interva-lo de confianza o IC[4] al 95%: 0.9 a 14%) por cada 100 metros de incremento en la distancia hacia las avenidas de alto tráfico (Cortez-Lugo *et al*., 2013).

3 Volumen de aire inhalado o exhalado por minuto, desde los pulmones de una persona.

4 Intervalo de confianza. Representa un rango de valores entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido con un determinado nivel de confianza.

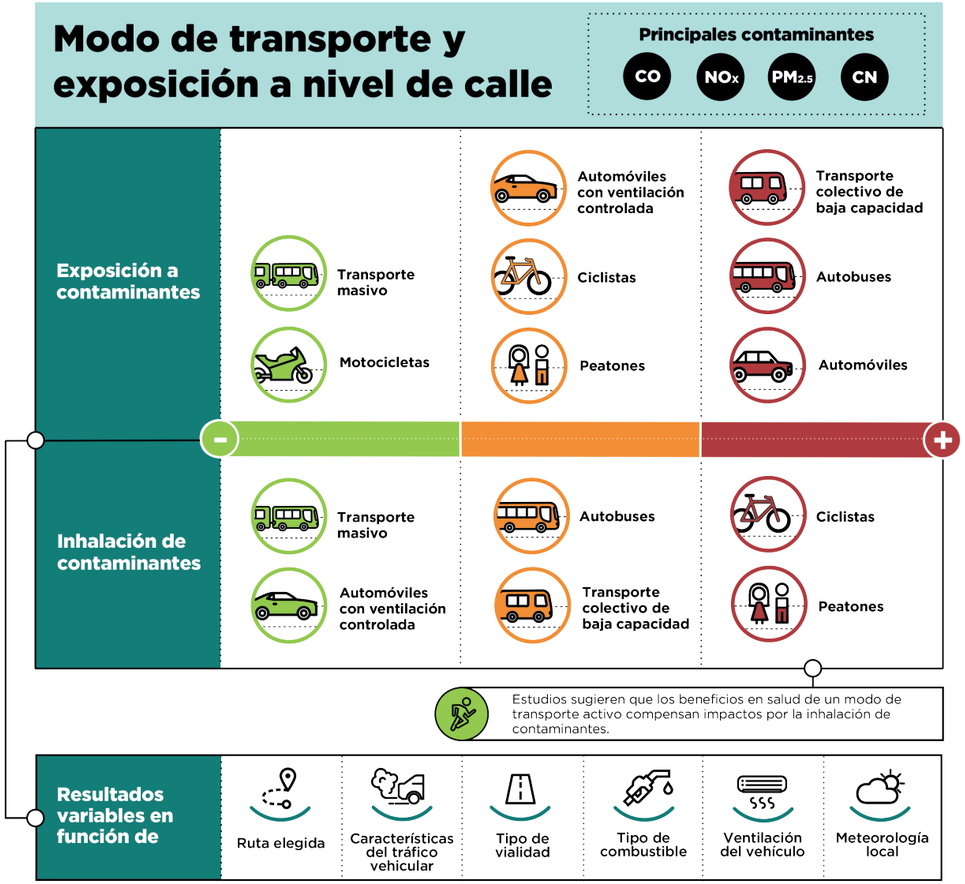


Figura 6.3 Cambios en la exposición e inhalación de contaminantes atmosféricos según el modo de transporte
Fuente: *Elaboración propia.*

Gran parte de la exposición de la población a partículas ocurre cuando esta se desplaza dentro de la ciudad, con una marcada heterogeneidad dependiendo de múltiples factores (F. Yang *et al*., 2015). Por ejemplo, los picos de concentración de partículas muchas veces se registran en intersecciones altamente transitadas, durante horas pico y en especial cuando predomina el uso de unidades a diésel (Moreno *et al*., 2015). Por otro lado, ciclistas pueden reducir su exposición a más de la mitad si evitan vialidades principales (Ragettli *et al*., 2013). Es evidente que transitar hacia una ciudad verde, social, activa y saludable requiere un diseño urbano más amigable con peatones y ciclistas. Para esto, es necesario retomar enfoques intersectoriales en la toma de decisiones, junto con nuevas herramientas para la investigación y el monitoreo de exposición a contaminantes a nivel de calle y en microambientes dentro de diferentes modos de transporte (Nieuwenhuijsen, 2016).

Estudios específicos para la Ciudad de México han determinado conclusiones similares. Velasco *et al*. (2019) demuestran que, después de considerar la actividad física y el tiempo de traslado, ciclistas y peatones son quienes inhalan las mayores dosis de contaminantes por viaje, respirando aproximadamente dos veces más partículas que las personas que usan el Metrobús o el STC Metro, y pese a que este último modo de transporte registra las mayores concentraciones en el aire. Asimismo, se determinó que los gases generados por la cocción de alimentos en puestos de comida ambulantes, cuya presencia es generalizada en las paradas de transporte público en toda la ZMVM, incrementan significativamente las concentraciones de partículas suspendidas en microambientes.

Por otro lado, Hernández-Paniagua *et al*. (2018) encontraron que los mayores picos de concentración de $PM_{2.5}$ coinciden con puntos donde se intersectan varios modos de transporte en presencia de densidades altas de tráfico vehicular. Se observaron niveles máximos de exposición e inhalación de contaminantes para ciclistas, aunque con una marcada heterogeneidad dependiente de la ruta, mientras que los más bajos fueron para peatones y automovilistas particulares. En autobuses públicos y colectivos de baja capacidad hay una mayor inhalación de partículas $PM_{2.5}$ por kilómetro recorrido en comparación con automóviles particulares, probablemente por la recirculación de las emisiones del escape dentro de la cabina, las cuales se infiltran a través de ventanas abiertas.

Exposición a mala calidad del aire interior

Aunque el ProAire no tiene como objetivo específico el regular y controlar la calidad del aire interior, es importante tomar en cuenta esta problemática al diseñar políticas de calidad del aire exterior, pues la población expuesta a la contaminación del aire en espacios cerrados, particularmente en hogares, es susceptible a impactos importantes a la salud. Un gran porcentaje de viviendas rurales en Latinoamérica usa combustibles sólidos para cocinar, en especial leña y carbón, lo cual libera una gran cantidad de contaminantes atmosféricos como $PM_{2.5}$ y CO. La inhalación de humo dentro de las viviendas duplica el riesgo de neumonía y otras infecciones respiratorias agudas (IRA) en niñas y niños menores de 5 años, en tanto que triplica el riesgo de EPOC y casi duplica el de cáncer de pulmón en mujeres mayores de 30 años (Organización Panamericana de la Salud, 2016).

Los efectos a la salud derivados de esta exposición no están distribuidos equitativamente en la población y conducen a incrementar el riesgo por la contaminación del aire exterior. La quema de biomasa dentro de los hogares es una amenaza particularmente grande para las mujeres que se dedican a quehaceres del hogar y que cocinan diariamente, ya que realizar esto puede ser equivalente a inhalar dos cajetillas de cigarros al día (OMS, 2006a). La quema doméstica de biomasa es una problemática importante en el Estado de México; de acuerdo con el último inventario de emisiones de esta entidad, la quema doméstica de combustibles (leña y gas L.P.) contribuye con el 34% y 42% de las emisiones totales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (SMAGEM, 2018), respectivamente; caso contrario, en la Ciudad de México las fuentes móviles son el principal emisor de partículas suspendidas (SEDEMA, 2018).

Al comparar los efectos entre la contaminación del aire en ambientes interiores y exteriores, el nivel de riesgo de desarrollar diferentes enfermedades, como infecciones de las vías respiratorias, EPOC y asma, es más alto por la exposición a mala calidad del aire en interiores. Esto se debe a que la quema ineficiente de combustibles sólidos en fogones abiertos o fogatas libera una gran cantidad de contaminantes, lo cual provoca que las concentraciones en interiores de partículas y CO alcancen niveles 10 a 50 veces más elevados que los registrados en ciudades (Organización Panamericana de la Salud, 2016; Smith, 1993).

6.1.2 Morbilidad y mortalidad general en la Zona Metropolitana del Valle de México

Padecimientos principales

A nivel nacional, las IRA, como la faringitis y la bronquitis agudas, son la principal causa de enfermedad. En la Ciudad de México y el Estado de México se observa una situación similar: las IRA son la principal causa de morbilidad, con aportes del 54.1% y 58.9%, por encima de otros padecimientos como las infecciones intestinales y las infecciones en vías urinarias, y con una tasa de incidencia de 198 y 158 afectados por cada 1000 habitantes, respectivamente. La Tabla 6.2 enlista los padecimientos principales en la Ciudad de México y el Estado de México, indicando el número total de casos y los porcentajes que representan las 15 principales causas de enfermedad en cada entidad.

Tabla 6.2 Padecimientos principales en la Ciudad de México y el Estado de México durante 2018

Ciudad de México		Estado de México	
Total de casos	**3 213 374**	**Total de casos**	**4 736 503**
Padecimientos principales (% de casos)		Padecimientos principales (% de casos)	
Infecciones respiratorias agudas	**54.1%**	Infecciones respiratorias agudas	**58.9%**
Infección en vías urinarias	**11.2%**	Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas	**11.8%**
Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas	**11.0%**	Infección en vías urinarias	**10.1%**
Úlceras, gastritis y duodenitis	**3.2%**	Úlceras, gastritis y duodenitis	**2.9%**
Gingivitis y enfermedad periodontal	**3.2%**	Conjuntivitis	**2.5%**
Conjuntivitis	**2.8%**	Vulvovaginitis	**1.9%**
Obesidad	**2.3%**	Gingivitis y enfermedad periodontal	**1.6%**
Vulvovaginitis	**1.3%**	Obesidad	**1.5%**
Otitis media aguda	**1.1%**	Diabetes mellitus no insulinodependiente (tipo 2)	**1.1%**
Hipertensión arterial	**1.1%**	Hipertensión arterial	**1.1%**
Insuficiencia venosa periférica	**1.0%**	Otitis media aguda	**1.0%**
Diabetes mellitus no insulinodependiente (tipo 2)	**1.0%**	Insuficiencia venosa periférica	**0.6%**
Asma	**0.7%**	Candidiasis urogenital	**0.4%**
Depresión	**0.6%**	Mordeduras de perro	**0.4%**
Mordeduras de perro	**0.5%**	Asma	**0.3%**

Fuente: *Anuario de Morbilidad 2018 (Dirección General de Epidemiología de la Secretaría de Salud, 2018).*



Es importante comprender la asociación entre el agravamiento de las infecciones de las vías respiratorias y la mala calidad del aire. A nivel mundial, las partículas $PM_{2.5}$ se relacionan con un incremento en la morbilidad y mortalidad general por enfermedades cardiopulmonares (Pope & Dockery, 2006), mientras que otros estudios identifican su potencial contribución en la exacerbación de infecciones respiratorias en personas adultas e infantes (Croft *et al*., 2018). Estudios específicos en la Ciudad de México también sugieren que la exposición a O_3 y dióxido de nitrógeno (NO_2) incide significativamente sobre el número de consultas por motivos respiratorios (Téllez-Rojo *et al*., 1997).

Se destaca también la incidencia de padecimientos crónicos no transmisibles como la diabetes mellitus tipo 2 y el asma dentro de las 15 principales causas de morbilidad en las dos entidades. Existe evidencia que liga a la calidad del aire con la diabetes mellitus tipo 2; por un lado, la exposición a $PM_{2.5}$ y NO_2 se asocia a una prevalencia de esta condición médica (Eze *et al*., 2015; Honda *et al*., 2017), mientras que también se han documentado incrementos en la morbi-mortalidad por contaminación atmosférica en pacientes con diabetes (Raaschou-Nielsen, Sørensen, *et al*., 2013).

La exposición crónica a la contaminación del aire durante la infancia, en especial aquella proveniente de fuentes móviles, se relaciona con un mayor riesgo de desarrollar asma (Carlsten *et al*., 2011; McConnell *et al*., 2010), además de que otros estudios también vinculan a la mala calidad del aire con mayores tasas de incidencia en personas adultas (Young *et al*., 2014). Las partículas suspendidas pueden interactuar con alérgenos en el aire y actuar como reservorios que después desencadenan episodios de asma alérgico (Baldacci *et al*., 2015). Asimismo, la exposición prenatal a la contaminación del aire también se asocia con sibilancias y asma en la infancia temprana (Schraufnagel *et al*., 2019b). Estudios específicos para la Ciudad de México han determinado relaciones estadísticamente significativas entre la contaminación del aire por $PM_{2.5}$, NO_2 y O_3, y un aumento en las sibilancias y el uso de broncodilatadores, por la exposición a emisiones provenientes del escape de vehículos a diésel (Escamilla-Núñez *et al*., 2008).

Mortalidad general

A nivel de zona metropolitana, la causa principal de mortalidad son las enfermedades del sistema circulatorio (26.8%), seguidas de las enfermedades endocrinas, nutricionales y metabólicas (17.8%) y las neoplasias (13.6%). El cuarto y quinto lugar lo ocupan las enfermedades del aparato digestivo (10.6%) y las enfermedades del aparato respiratorio (9.7%), respectivamente. No obstante, se destaca que del total de muertes naturales entre la población de la ZMVM en 2018, que suman 116 mil, más de la mitad fue a causa de alguna enfermedad o padecimiento que puede ser directamente atribuido o exacerbado por la mala calidad del aire, incluyendo múltiples enfermedades del sistema respiratorio, enfermedades cardiovasculares, cáncer de pulmón y diabetes mellitus tipo 2 (ver Tabla 6.3).

Tabla 6.3 Mortalidad en la Zona Metropolitana del Valle de México por causas relacionadas a la mala calidad del aire

Causa	Clave CIE-10 (a)	Muertes en 2018 (b)	Aporte total
Muertes naturales	**A00-R99**	**116 447**	**92.1%**
Muertes por causas externas	**S00-Z99**	**9929**	**7.9%**
Causas de muerte relacionadas con la mala calidad del aire			
Cáncer de pulmón	**C33-C34**	**1187**	**0.9%**
Diabetes	**E10-E14**	**20 326**	**16.1%**
Enfermedades del sistema respiratorio	**J00-J99**	**12 242**	**9.7%**
Infecciones agudas de las vías respiratorias superiores	**J00-J06**	**31**	**<0.1%**
Gripe aviaria	**J09**	**32**	**<0.1%**
Influenza y neumonía	**J10-J18**	**5681**	**4.5%**
Enfermedades respiratorias inferiores agudas	**J20-J22**	**223**	**0.2%**
Otras enfermedades de las vías respiratorias superiores	**J30-J39**	**33**	**<0.1%**
Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC)	**J40-J44**	**4698**	**3.7%**
Asma	**J45-J46**	**154**	**0.1%**
Bronquiectasia	**J47**	**10**	**<0.1%**
Otras enfermedades del sistema respiratorio	**J60-J99**	**1380**	**1.1%**
Enfermedades del sistema circulatorio	**I00-I99**	**33 846**	**26.8%**
Fiebre reumática aguda y enfermedades cardíacas reumáticas	**I00-I09**	**210**	**0.2%**
Enfermedad hipertensiva	**I10-I15**	**4313**	**3.4%**
Enfermedad isquémica del corazón	**I20-I25**	**19 916**	**15.8%**
Enfermedad de la circulación pulmonar y otras enfermedades del corazón	**I26-I51**	**2492**	**2.0%**
Enfermedad cerebrovascular	**I60-I69**	**6133**	**4.8%**
Otras enfermedades del sistema circulatorio	**I70-I99**	**802**	**0.6%**

(a) Décima revisión de la Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud (CIE-10).
(b) Se contabilizaron las muertes ocurridas y registradas en 2018, de personas cuya residencia habitual reportada era una de las 76 demarcaciones de la ZMVM, independientemente de si el hecho vital ocurrió o fue inscrito en cualquier otro Estado o Municipio.

Fuente: *Elaborado a partir de estadísticas de defunciones para el año 2018 (INEGI, 2018).*

6.2 Efectos de la contaminación del aire en la salud humana

Los contaminantes del aire tienen distinto potencial para generar daños en la salud humana en función de sus propiedades químicas y físicas, la concentración en la cual se manifiesten, la intensidad y frecuencia de la exposición, y también, como se revisó anteriormente, de las condiciones de vulnerabilidad de las personas expuestas.

La Figura 6.4 describe la incidencia y severidad de los impactos a la salud por la mala calidad del aire. Los efectos en la base de la pirámide, como el asma y los efectos cardíacos, son menos severos, pero afectan a una proporción más grande de la población. En la punta se concentran impactos más severos, como los ingresos hospitalarios e infartos no fatales, los cuales afectan a una menor cantidad de personas. En general, la frecuencia de ocurrencia de un efecto a la salud es inversamente proporcional a su severidad; esto sugiere que el impacto total de la mala calidad del aire excede la contribución que tienen los efectos más severos. No obstante, más del 90% de los beneficios económicos por mejorar la calidad del aire se relacionan con evitar muertes prematuras que reducen la expectativa de vida de la población, lo que justifica que las EIS se enfoquen en cuantificar dicha mortalidad evitable.

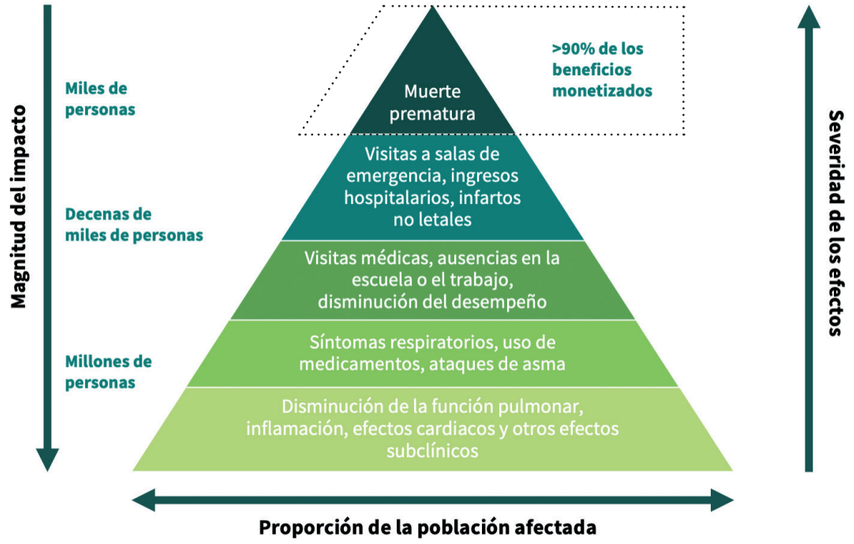


Figura 6.4 Pirámide de los efectos a la salud asociados a la mala calidad del aire
Fuente: *US EPA (2018).*

En esta sección se describen los impactos a la salud de los principales contaminantes atmosféricos a corto (agudos) y largo (crónicos) plazo, así como los mecanismos fisiológicos que provocan las afectaciones. La Figura 6.5 resume evidencia científica de los efectos a la salud que provocan los diferentes contaminantes criterio, con base en información generada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) para la actualización de sus estándares de calidad del aire (US EPA, 2020b).

Efectos a la salud humana

Evaluación Integrada de la Ciencia (Integrated Science Assessment US EPA)		Año	2017	2016	2020	2010	2019		
		Contaminante	SO_2	NO_2	O_3	CO	Partículas suspendidas		
							$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	Ultrafinas
Impacto en salud	Mortalidad	Exposición a corto plazo							
		Exposición a largo plazo							
	Respiratorios	Exposición a corto plazo							
		Exposición a largo plazo							
	Cardiovasculares	Exposición a corto plazo							
		Exposición a largo plazo							
	Reproductivos	Exposición a largo plazo	Fertilidad, embarazo y reproducción	Fertilidad, embarazo y reproducción	Fertilidad y reproducción		Fertilidad y reproducción	Fertilidad y reproducción	Fertilidad y reproducción
			Efectos en el parto	Efectos en el parto	Embarazo y parto		Embarazo y parto	Embarazo y parto	Embarazo y parto
			Efectos de desarrollo	Efectos de desarrollo	Efectos de desarrollo		Efectos de desarrollo	Efectos de desarrollo	Efectos de desarrollo
	Cáncer	Exposición a largo plazo							
	Efectos metabólicos	Exposición a corto plazo							
		Exposición a largo plazo							
	Efectos en el sistema nervioso central	Exposición a corto plazo							
		Exposición a largo plazo							

RELACIÓN EPIDEMIOLÓGICA: Causal; Probablemente causal; Sugestiva; Inadecuada; Poco probable; No evaluada

Figura 6.5 Efectos a la salud humana por exposición a contaminantes criterio
Fuente: *Evaluaciones Integradas de la Ciencia (Integrated Science Assessments) de la US EPA (2020b).*

A lo largo de los siguientes apartados se hace referencia a las Guías de Calidad del Aire (GCA) de la OMS, las cuales son una serie de recomendaciones internacionales que buscan orientar el establecimiento de límites permisibles de concentración de contaminantes en el aire ambiente, y a los límites permisibles establecidos en las NOM de salud ambiental; para más información sobre ambas directrices se puede consultar la sección 3.3 del Capítulo 3. Se destaca que tanto las GCA como las NOM de salud ambiental, con excepción de la norma para SO_2 que entró en vigor en 2020, se encuentran en proceso de revisión y actualización. Finalmente, también se evalúa la relación existente entre la mala calidad del aire y enfermedades infecciosas; en específico, se abordan casos de estudio que demuestran cómo concentraciones elevadas de contaminantes pueden exacerbar las complicaciones que conllevan estas enfermedades y/o incrementar el riesgo de contagio.

6.2.1 Efectos del dióxido de azufre

La exposición a SO_2 afecta al sistema respiratorio, causando una reducción en el funcionamiento de los pulmones, particularmente en grupos vulnerables como infantes y personas con enfermedades cardiovasculares, pulmonares y asma. Este contaminante se absorbe cuando se disuelve en el revestimiento líquido que cubre a las vías respiratorias superiores; su inhalación incrementa el riesgo de contraer infecciones respiratorias (OMS, 2020) y puede causar daños a los ojos y membra-

nas mucosas, la piel y el tracto respiratorio. Los broncoespasmos, edemas pulmonares, neumonitis y la obstrucción aguda de las vías respiratorias son algunos de los hallazgos clínicos más comunes asociados con la exposición a SO_2 (Ghorani-Azam *et al*., 2016).

Un estudio realizado por la US EPA sobre los efectos crónicos del SO_2 puntualizó que la población con una exposición prolongada a este contaminante tiene mayor prevalencia de enfermedades respiratorias y deficiencia pulmonar (National Research Council (US) Committee on Toxicology, 1984). De igual manera, se asocia con la presencia de tos, flemas, hiperreactividad bronquial, conjuntivitis, enteritis, enfermedad de Crohn, isquemias no hemorrágicas, accidentes cerebrovasculares y autismo por exposición prenatal (Schraufnagel *et al*., 2019b). Algunos trabajos han reportado un aumento en la mortalidad por cáncer de pulmón por SO_2; Yang *et al.* (2016) encontraron que el riesgo de morbi-mortalidad por este padecimiento incrementa en 14.76% (intervalo de confianza al 95%: 1.04 a 30.34) por cada 10 ppb.

Las GCA de la OMS establecen como límite de exposición una concentración de 20 µg/m³, promedio de 24 horas, y 500 µg/m³, promedio de 10 minutos (OMS, 2006b); mientras que la NOM de salud ambiental establece como valor límite una concentración de 40 ppb (83 µg/m³ a 17°C y 585 mmHg [5]), promedio de 24 horas, y un límite horario de 75 ppb (155 µg/m³ a 17°C y 585 mmHg). Sin embargo, la OMS sugiere que los valores de la GCA sean reevaluados; la exposición a corto plazo depende fuertemente de las fuentes locales de emisión y las condiciones meteorológicas, lo que hace difícil establecer un valor guía que ofrezca un grado de protección adecuado. También se sugiere incluir una recomendación para exposición a largo plazo (OMS, 2015). Sin embargo, es necesario considerar la incertidumbre acerca de si el SO_2 es el responsable de los efectos observados o si es algún otro contaminante que guarda correlación con él (como las partículas suspendidas). Anteriormente, la NOM-022-SSA1-2010 incluía límites para el promedio móvil de 8 horas y el promedio anual; no obstante, estos solo estaban definidos en la normatividad mexicana y no tenían referencia o comparación con la normatividad de la US EPA o la Unión Europea (NOM-022-SSA1-2019).

6.2.2 Efectos de los óxidos de nitrógeno

Los NO_X, en específico el NO_2 y el óxido nítrico (NO), son importantes gases a nivel toxicológico. La exposición a NO_2 puede exacerbar los síntomas de la bronquitis y el asma, además de asociarse a una mayor incidencia de infecciones respiratorias y reducciones en el crecimiento y capacidad pulmonar. Evidencia epidemiológica también sugiere que es responsable de una importante carga de enfermedad, ligada a la mortalidad prematura y morbilidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias (OMS, 2020).

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos (ATSDR, por sus siglas en inglés), señala que niveles bajos de NO_X pueden causar irritación en los pulmones, los ojos, la nariz y la garganta, además de tos, estornudos, cansancio, náuseas y falta de aliento o disnea. Inclusive, las concentraciones bajas pueden ocasionar que se acumule líquido en los pulmones (edema pulmonar). Niveles altos de concentración[6] pueden producir espasmos, quemaduras e inflamación de la garganta, así como de las vías respiratorias superiores, aumentando la acumulación de líquido en los pulmones y llegando a provocar la muerte por reducción en la oxigenación de los tejidos del cuerpo (ATSDR, 2016). Otras complicaciones comunes son el dolor torácico, diaforesis, fiebre y broncoespasmos (Ghorani-Azam *et al*., 2016).

Para proteger la salud de la población, la OMS establece recomendaciones para la exposición crónica y aguda al NO_2. Las GCA definen dos métricas, una concentración de 40 µg/m³ como promedio anual, y un valor de 200 µg/m³ para el promedio horario (OMS, 2006b); la NOM de salud ambiental establece un límite del promedio horario de 210 ppb (312 µg/m³ a 17°C y 585 mmHg). Es importante mencionar que las GCA se están actualizando para incorporar evidencia reciente de distintos estudios epidemiológicos. Asimismo, la OMS sugiere evaluar la posibilidad de desarrollar recomendaciones por separado para los niveles de NO (OMS, 2015).

6.2.3 Efectos del monóxido de carbono

La inhalación de CO puede causar daño permanente en el corazón y el cerebro (ATSDR, 2012). La toxicidad de este contaminante se debe a que interfiere con las reacciones químicas internas de las células; algunos mecanismos subyacentes conocidos son la hipoxia, apoptosis e isquemia (Ghorani-Azam *et al*., 2016). La toxicidad del CO depende, esencialmente, de la capacidad que tiene esta molécula para unirse a la hemoglobina, responsable del transporte de oxígeno a los tejidos del cuerpo humano. El CO tiene una afinidad aproximadamente 250 veces superior a la que tiene el oxígeno, por lo que, dependiendo de la concentración y el tiempo de exposición, pueden suscitarse diferentes grados de intoxicación en detrimento de la oxigenación del cuerpo. Debido a que la intoxicación puede llegar a matar las células del cuerpo, particularmente cuando llega al cerebro, existe el riesgo de que provoque problemas neurológicos a largo plazo en personas que han tenido una intoxicación grave (Harvard Medical School, 2019). Algunos síntomas sistémicos de la intoxicación por CO son dolores de cabeza, mareo, náuseas, vómito, diarrea, astenia, impotencia muscular, debilidad y rabdomiólisis; en casos extremos, una persona puede morir de intoxicación por CO. En mujeres embarazadas puede inducir aborto o alteraciones fetales.

A pesar de que las GCA vigentes de la OMS no cuentan con valores de referencia para este contaminante, anteriormente se establecieron los siguientes límites: 100 mg/m³ para 15 minutos, 60 mg/m³ para 30 minutos, 30 mg/m³ para una hora y 10 mg/m³ para 8 horas. Estos valores garantizan que las concentraciones de carboxihemoglobina estén por debajo del 2.5%, lo cual se ha demostrado protege la salud de personas adultas con problemas cardíacos, así como el desarrollo fetal (OMS, 1999). Por su parte, el valor límite que señala la NOM de salud ambiental para CO es de 11.00 ppm (9.96 mg/m³ a 17°C y 585 mmHg) para el promedio de 8 horas.

6.2.4 Efectos del ozono

El O_3 es una sustancia altamente reactiva, capaz de oxidar a biomoléculas como proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. Cuando reacciona con macromoléculas y estructuras celulares, genera radicales libres y otros intermediarios reactivos que pueden inducir más efectos negativos. Este contaminante también es capaz de provocar aberraciones cromosómicas y peroxidación lipídica; esta última es una reacción en cadena que degrada a las membranas celulares (Lerner & Eschenmoser, 2003). En conjunto, estos mecanismos se traducen en alteraciones morfológicas, funcionales, inmunológicas y bioquímicas con efectos diversos sobre tejidos y órganos del cuerpo humano, particularmente del sistema respiratorio (Ghorani-Azam *et al*., 2016).

La US EPA ha determinado que los grupos más vulnerables ante la exposición de O_3 troposférico son niña y niños, personas adultas mayores, personas con asma y quienes realizan actividades deportivas o trabajan al aire libre. El O_3 puede provocar que los músculos de las vías respiratorias se contraigan; esto genera que el aire en los alvéolos quede atrapado y que se experimenten sibilancias o falta de aliento. Además, se asocia con dificultades para respirar, dolor al inhalar profundamente, tos,

5 Condiciones locales en la ZMVM.

6 En Estados Unidos, la US EPA indica que la concentración promedio de NO_2 en el aire ambiente no debe exceder 53 ppb como promedio anual y establece un límite horario de 100 ppb (US EPA, 2016). En comparación, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos establece límites ocupacionales de 25 ppm para NO durante un día de trabajo de 8 horas, y un límite de 5 ppm para la exposición a NO_2 en 15 minutos (ATSDR, 2016).

dolor o picazón en la garganta, así como inflamación y daños en las vías respiratorias. El O_3 también agudiza enfermedades pulmonares crónicas como el asma, haciendo que los episodios o ataques se presenten con mayor frecuencia e intensidad, así como el enfisema y la bronquitis crónica. Por otro lado, el O_3 ocasiona que los pulmones sean más susceptibles a infecciones y puede causar o exacerbar EPOC, tanto en personas de por sí vulnerables como en población sana. Además, la exposición a largo plazo está vinculada con la posibilidad de desarrollar asma, así como un desarrollo pulmonar anormal en infantes (US EPA, 2019a).

La exposición a O_3 se relaciona con incrementos en la mortalidad. De acuerdo con la revisión de la literatura científica más reciente realizada por la US EPA (2020a), se han encontrado asociaciones positivas entre exposición a corto plazo y mortalidad respiratoria y cardiovascular en estudios epidemiológicos. En el caso de mortalidad respiratoria, dicha asociación es apoyada por fuerte evidencia (estudios de exposición humana controlada y estudios toxicológicos) que sustenta los mecanismos biológicos a través de los cuales dicha exposición puede generar efectos en el sistema respiratorio, que a su vez pueden derivar en la muerte. En cambio, al evaluar la relación entre la exposición a O_3 y mortalidad cardiovascular, aunque existe algo de evidencia que apoya plausibilidad biológica, esta no es consistente entre los diferentes tipos de estudios.

En el caso de exposición a O_3 a largo plazo, aunque existe algo de evidencia de la asociación con mortalidad por todas las causas y mortalidad respiratoria, esta tampoco es consistente entre distintos estudios. En el caso de mortalidad cardiovascular y por diabetes, se han encontrado asociaciones positivas y consistentes en estudios recientes. Sin embargo, al tomar en cuenta la evidencia de morbilidad respiratoria y de enfermedades metabólicas, esta provee mecanismos biológicos a través de los cuales la exposición a O_3 puede resultar en mortalidad, en tanto que para morbilidad cardiovascular, la evidencia es más limitada e inconsistente entre estudios epidemiológicos y experimentales.

Las GCA de la OMS inicialmente establecieron un valor guía de 120 µg/m³ como promedio de ocho horas. Sin embargo, estudios posteriores en países europeos y en América del Norte identificaron que el O_3 produce efectos en la salud de la población por debajo de este umbral y se procedió a reducir el nivel a 100 µg/m³ (ver Tabla 6.4); el límite equivalente en la NOM de salud ambiental respectiva es de 70 ppb (109 µg/m³ a 17°C y 585 mmHg) y también se incluye un límite de 95 ppb (147 µg/m³ a 17°C y 585 mmHg) para el promedio horario. La OMS también señala que es posible que personas más sensibles puedan manifestar cuadros clínicos de salud por debajo de este indicador (OMS, 2006b).

Tabla 6.4 Guías de Calidad del Aire de la OMS para el promedio de 8 horas de ozono

	Máximo diario de los promedios de 8 horas (µg/m³)	Observaciones
Niveles altos	**240**	Tiene efectos en la salud para la mayor parte de la población, particularmente grupos vulnerables. Da lugar a un incremento entre el 5-9%* en la mortalidad diaria.
Objetivo intermedio-1	**160**	Persisten efectos importantes en la salud: • Efectos fisiológicos e inflamatorios en los pulmones de personas adultas jóvenes y sanas que hacen ejercicio (periodo de exposición de 6.6 horas). • Efectos en la salud de infantes. • Incremento de 3-5%* en la mortalidad diaria.
GCA	**100**	Se considera un nivel óptimo para proteger la salud pública; sin embargo, aún pueden generarse efectos debajo de este umbral; a esta concentración se tiene un aumento estimado de un 1-2%* en la mortalidad diaria.

*De acuerdo con estudios de series tiempo, la mortalidad diaria incrementa en un rango de 0.3-0.5% por cada 10 µg/m³ de O_3 por encima de una concentración base de 70 µg/m³.

Fuente: *Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006b).*

6.2.5 Efectos de las partículas suspendidas

Los efectos a la salud de las partículas suspendidas incluyen una gama amplia de impactos nocivos en el sistema respiratorio y cardiovascular. Estas consecuencias son de las más severas registradas y hay pocas pruebas que indiquen un umbral seguro por debajo del cual no se registran daños a la salud (OMS, 2006b).

El tamaño de las partículas suspendidas se encuentra directamente vinculado con el potencial para provocar problemas de salud, ya que, de forma general, la capacidad de penetración que estas tienen en las vías respiratorias aumenta conforme disminuye su dimensión (ver Figura 6.6). Como se puede observar en la Tabla 6.5, las partículas gruesas, con diámetro aerodinámico de 2.5 a 10 µm, penetran la nasofaringe y se depositan en las vías respiratorias superiores, como la tráquea. Las partículas finas (diámetro aerodinámico entre 0.1 y 2.5 µm) logran alcanzar las vías respiratorias inferiores y, dependiendo de su tamaño, pueden llegar a depositarse en los alvéolos (US EPA, 2017), de tal forma que tienen un mayor potencial de provocar enfermedades cardiopulmonares. Las partículas ultrafinas (diámetro aerodinámico menor a 0.1 µm) llegan al torrente sanguíneo y se pueden translocar a otros sistemas y órganos como el corazón o el cerebro (Health Effects Institute, 2013). Para fines de monitoreo y el establecimiento de límites permisibles para proteger la salud de la población, a la fracción de partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 µm (esto es, la suma de partículas finas y ultrafinas) se le denomina $PM_{2.5}$, en tanto que el conjunto de todas las partículas ultrafinas, finas y gruesas se conoce como PM_{10}.

Tabla 6.5 Penetrabilidad de las partículas en el tracto respiratorio según su tamaño

Tamaño de las partículas (µm)	Región hasta donde puede ocurrir la penetración
> 11.0	Capturados en orificios nasales
7.0 – 11-0	Pasaje nasal
4.7 – 7.0	Región de la laringe
3.3 – 4.7	Tráquea y región primaria bronquial
2.2 – 3.3	Región bronquial secundaria
1.1 – 2.1	Región bronquial terminal
0.65 – 1.1	Bronquiolos
0.43 – 0.65	Alvéolos

Fuente: *Borja-Aburto et al. (2000).*

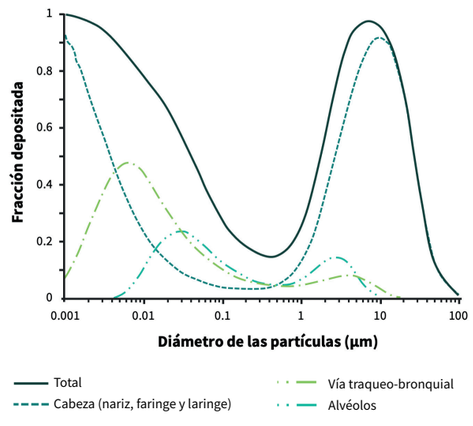


Figura 6.6 Modelo de la deposición de partículas suspendidas en el sistema respiratorio en función de su tamaño
Fuente: *US EPA (2017).*

Las afectaciones por la exposición a partículas suspendidas son el resultado de una serie de mecanismos fisiológicos que actúan en conjunto. Uno de los principales mecanismos propuestos para comprender el efecto de las partículas en la salud, por su potencial de deterioro en el organismo, es el estrés oxidativo. Este último produce una inflamación sistémica que afecta a órganos críticos como el corazón, el cerebro, los pulmones y el sistema vascular (Pope & Dockery, 2006). La Figura 6.7 esquematiza algunos de los mecanismos fisiológicos que ligan a las partículas suspendidas con la incidencia de enfermedades cardiopulmonares.

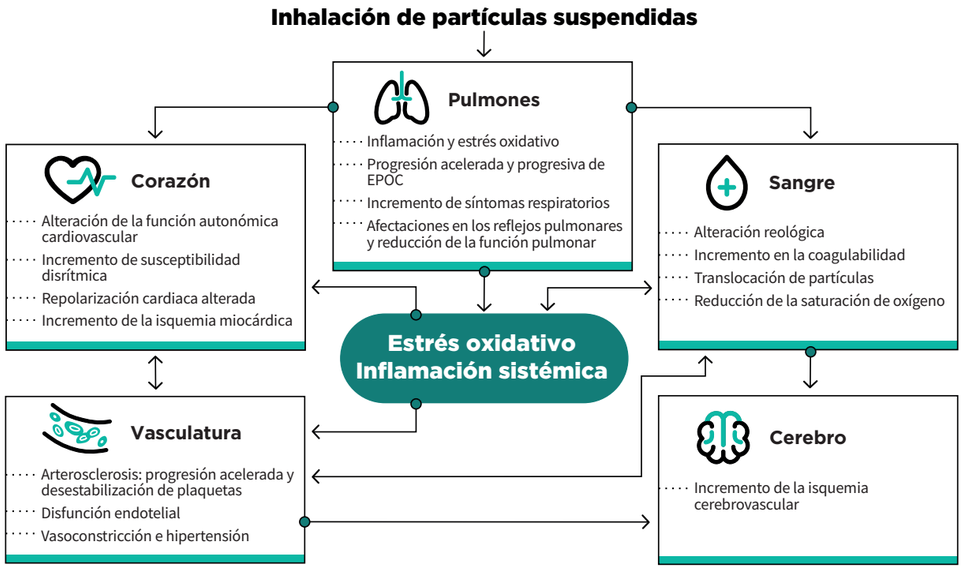


Figura 6.7 Mecanismos fisiológicos involucrados en la morbilidad y mortalidad cardiopulmonar por exposición a partículas suspendidas

Fuente: *Elaborado a partir de Pope & Dockery (2006).*

Además del impacto en enfermedades de los sistemas circulatorio y respiratorio, la exposición a partículas puede provocar o exacerbar enfermedades metabólicas como la diabetes tipo 2, así como impactos neurológicos. La inflamación sistémica en respuesta a la exposición a partículas suspendidas puede causar una disfunción vascular y llegar a generar trastornos vasculares cerebrales (Tamagawa *et al*., 2008). Las partículas suspendidas también pueden propiciar la acumulación de tejido adiposo visceral y agravar la resistencia a la insulina (Schraufnagel *et al*., 2019b).

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS clasifica a la contaminación del aire, y en específico a las partículas suspendidas, como un carcinógeno del grupo 1, esto es, una sustancia cuyo efecto cancerígeno en el ser humano es conocido y está ampliamente documentado (Loomis *et al.*, 2013). La composición de las partículas, la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (Raaschou-Nielsen, Andersen, *et al.*, 2013) y otros genotóxicos como compuestos N-nitroso y metales de transición (Hoek & Raaschou-Nielsen, 2014) pueden incrementar el riesgo de cáncer de pulmón al provocar aberraciones cromosómicas en las células del sistema respiratorio.

Además, no solo el tamaño y la concentración de partículas están vinculados con el grado de impacto en la salud de la población, sino que también la composición de estas provoca que sean más o menos tóxicas. La evidencia reciente apunta a que el contenido de carbono elemental y orgánico generado por las emisiones de vehículos y quema de biomasa tienen un mayor aporte en el riesgo de mortalidad prematura e incidencias en la morbilidad cardiovascular y respiratoria (Robinson, 2017). Las emisiones del escape de vehículos a diésel se clasifican como un carcinógeno del grupo 1, en tanto que las emisiones de vehículos a gasolina entran dentro del grupo 2B (posible carcinógeno al ser humano) (Benbrahim-Tallaa *et al*., 2012). Por ejemplo, en California se ha determinado que alrededor de 70% del riesgo total conocido de cáncer por contaminación del aire es atribuible a partículas generadas por la quema del diésel (California Air Resources Board, 2020).

Partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$

La exposición aguda y crónica a PM_{10} puede agudizar el asma y otros síntomas respiratorios, así como causar mortalidad prematura por enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón (OMS, 2013), además de que se relacionan con síndromes metabólicos y la prevalencia de conjuntivitis (Schraufnagel *et al*., 2019b). Por otro lado, las partículas $PM_{2.5}$ provocan enfermedades cardiovasculares como insuficiencia cardíaca, enfermedad coronaria y, en casos graves, muertes prematuras; también se asocian con morbilidad y mortalidad prematura por enfermedades respiratorias agudas y crónicas, como la neumonía y la bronquitis crónica (Pope *et al*., 2002). A nivel mundial, cada año alrededor de 220 000 muertes por cáncer de pulmón y 3.5 millones de muertes por enfermedades cardiopulmonares son atribuidas a la exposición a $PM_{2.5}$ (Anenberg *et al*., 2010). Estas partículas presentan un mayor riesgo a la salud que las PM_{10} debido a que tienen la capacidad de penetrar a regiones más profundas de los pulmones y del sistema circulatorio (INE-SEMARNAT, 2011).

Además, se ha asociado a las partículas $PM_{2.5}$ con cáncer de riñón y vejiga, embolia pulmonar, infartos de miocardio, accidente cerebrovascular, insuficiencia cardíaca, hipertensión y diabetes tipo 2; afectan la formación de hemoglobina, pueden causar un desarrollo psicomotor retardado y derivar en problemas cognitivos tanto en niñas y niños como en personas adultas; también se relacionan con una mayor incidencia de fracturas óseas, osteoporosis y enfermedades reumáticas autoinmunes sistémicas (Schraufnagel *et al*., 2019b). Otras investigaciones señalan que la exposición a partículas $PM_{2.5}$ tiene efectos en la piel, causando daño y envejecimiento prematuro (Verdin *et al*., 2019).

Las partículas procedentes de fuentes móviles están asociadas con incrementos en la morbi-mortalidad de la población expuesta y al aumento en la incidencia del asma y alergias entre la población infantil. En la Ciudad de México se llevó a cabo un estudio en niñas y niños sanos expuestos a altos niveles de $PM_{2.5}$. El estudio se fundamenta en que la exposición a altas concentraciones de $PM_{2.5}$ coincide con los tiempos de recreo y de educación física en las escuelas; los resultados muestran que la contaminación por $PM_{2.5}$ se asocia a hiperleptinemia, alteración de los niveles de péptidos reguladores del apetito, incrementos en los niveles de endotelina-1 y deficiencia de vitamina D. Estos cambios pueden contribuir al desarrollo a futuro de resistencia a la insulina, obesidad, diabetes tipo 2, enfermedad cardiovascular prematura, deterioro cognitivo y Alzheimer (Calderón-Garcidueñas *et al*., 2008).

Si bien evidencia epidemiológica sugiere que la exposición a PM_{10} tiene efectos importantes sobre la salud respiratoria, en términos de mortalidad, y en especial como consecuencia de la exposición a largo plazo, las $PM_{2.5}$ son un factor de riesgo más grande. Por ejemplo, una revisión solicitada por la OMS para evaluar los valores de las GCA para partículas encontró que el riesgo relativo de mortalidad a largo plazo incrementa en 4% (IC 95%: 1.03 a 1.06) por cada 10 $\mu g/m^3$ de PM_{10}, en tanto que para $PM_{2.5}$ es igual a 8% (IC 95%: 1.06 a 1.09) por cada 10 $\mu g/m^3$ (J. Chen & Hoek, 2020). Los grupos más vulnerables ante los efectos de las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} son las personas adultas mayores, la niñez y quienes presentan enfermedades preexistentes del sistema respiratorio o del corazón, debido a que tienen una mayor sensibilidad biológica a los efectos de las partículas (B. Chen & Kan, 2008).

Las GCA de la OMS y sus objetivos intermedios orientan a los países para establecer límites permisibles de concentración de partículas suspendidas en la atmósfera, con el fin de mejorar la salud de la población. Los valores de las GCA para el promedio anual y el promedio diario de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se presentan en la Tabla 6.6 y la Tabla 6.7, respectivamente. Por su parte, las NOM de salud ambiental establecen los siguientes límites de concentración: promedio anual de 40 $\mu g/m^3$ para PM_{10}, y 12 $\mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$; promedios de 24 horas de 75 $\mu g/m^3$ y 45 $\mu g/m^3$ para PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente. Se ha determinado la necesidad de reevaluar estas guías para incorporar eviden-

cia reciente sobre los impactos a la salud de las partículas suspendidas. Aunque la OMS menciona que la exposición a $PM_{2.5}$ conlleva efectos a la salud en escalas de tiempos menores que las antes consideradas (p. ej. 1 hora) (OMS, 2015), la última revisión de la evidencia científica para partículas suspendidas, realizada por la US EPA (2019b), indica que promedios menores a 24 horas para $PM_{2.5}$ no se correlacionan de forma más cercana con los efectos a la salud, en comparación con la métrica de exposición del promedio de 24 horas.

Estudios recientes que evalúan la exposición a largo plazo a niveles de $PM_{2.5}$ por debajo de la GCA de la OMS para el promedio anual (10 µg/m³) muestran que incluso concentraciones por debajo de 8 µg/m³ se asocian con afectaciones en la salud. Se destacan impactos como estrés oxidativo pulmonar y sistémico, disfunción vascular inflamatoria, aumento de la activación de plaquetas y la viscosidad de la sangre, aterosclerosis, enfermedad isquémica del corazón y alteración de la función autonómica cardiaca (Vodonos *et al*., 2018).

Tabla 6.6 Guías de Calidad del Aire de la OMS para el promedio anual de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$

	PM_{10} (µg/m³)	$PM_{2.5}$ (µg/m³)	Observaciones
Objetivo intermedio-1	**70**	**35**	Estos niveles se han asociado con un riesgo de mortalidad aproximado del 15% a largo plazo, en relación con la GCA.
Objetivo intermedio-2	**50**	**25**	Reduce el riesgo de mortalidad en 6% comparado con el nivel del objetivo intermedio 1, además de generar otros beneficios en la salud.
Objetivo intermedio-3	**30**	**15**	Reduce el riesgo de mortalidad en 6% comparado con el nivel del objetivo intermedio 2, además de generar otros beneficios en salud.
GCA	**20**	**10**	Se han encontrado efectos incluso a concentraciones más bajas. Sin embargo, son los niveles más bajos a los que se ha demostrado el aumento de muertes por causas generales, cardiopulmonares y por cáncer de pulmón en respuesta a una exposición prolongada.

Fuente: *Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006b).*

Tabla 6.7 Guías de Calidad del Aire de la OMS para el promedio diario de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$

	PM_{10} (µg/m³)	$PM_{2.5}$ (µg/m³)	Observaciones
Objetivo intermedio-1	**150**	**75**	Se considera un incremento del 5% de la mortalidad a corto plazo por encima del valor de la GCA.
Objetivo intermedio-2	**100**	**50**	Se considera un incremento de 2.5% de la mortalidad a corto plazo por encima del valor de la GCA.
Objetivo intermedio-3	**75**	**37.5**	Se considera un incremento de 1.2% de la mortalidad a corto plazo por encima del valor de la GCA.
GCA	**50**	**25**	Se basa en la relación entre niveles de 24 horas y los promedios anuales de partículas.

Fuente: *Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006b).*

Partículas ultrafinas

La Academia Americana de Alergia, Asma e Inmunología señala que las partículas ultrafinas pueden ser más tóxicas que las $PM_{2.5}$ y PM_{10}, debido a su composición química, tamaño y su mayor capacidad de generar especies de oxígeno reactivas, estrés oxidativo e inflamación en los órganos, además de que se retienen por mayor tiempo en el cuerpo humano (Li *et al*., 2016; Schraufnagel *et al*., 2019a). Si bien forman parte de las $PM_{2.5}$, se ha cuestionado si es necesario abordar a las partículas ultrafinas por separado para fines regulatorios (Health Effects Institute, 2013). En este sentido, la OMS indica que existen barreras metodológicas para establecer un límite permisible y que es necesario considerar los componentes específicos de las partículas, como los metales y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), así como su relación con los impactos a la salud (OMS, 2015).

Esta fracción de partículas puede penetrar la membrana alveolo-capilar, adherirse a las células y transportarse con facilidad por el torrente sanguíneo, de tal forma que prácticamente todas las células y órganos del cuerpo se ven expuestos a sus efectos perjudiciales. Estudios con animales han demostrado cómo estas partículas pueden viajar directamente de la nariz, a través del nervio olfatorio y hacia el cerebro, donde provocan inflamación y estrés oxidativo (Elder *et al*., 2006).

La exposición de corto plazo a partículas ultrafinas causa tos y agudiza enfermedades como el asma. Estas partículas provocan inflamación sistémica, disfunción endotelial, daños en el sistema nervioso central, cambios en la coagulación que predisponen a las personas a la enfermedad isquémica del corazón, hipertensión, diabetes y cáncer. De igual forma, las mujeres embarazadas e infantes son dos de los grupos de población más vulnerables a los efectos perjudiciales por la exposición a este tipo de partículas (Schraufnagel, 2020).

6.2.6 Efectos de los compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV[7]) son un grupo amplio de contaminantes que son emitidos por una variedad de fuentes tanto naturales como antropogénicas. Estos se liberan a la atmósfera durante el transporte, almacenamiento, manejo y quema de combustibles fósiles, así como por el uso de solventes, pinturas y otros productos en hogares, comercios, servicios e industrias. La toxicidad de estos compuestos varía en función de sus propiedades químicas; algunos COV son altamente tóxicos y/o carcinogénicos, mientras que para otros no se conocen o no se tienen registrados impactos a la salud (Cerón Bretón *et al*., 2020).

Un grupo en específico de COV de interés toxicológico son el benceno y sus derivados alquílicos, particularmente el tolueno, el etilbenceno y los xilenos; a estos compuestos se les denomina en conjunto BTEX. La exposición a cualquiera de estos compuestos puede producir efectos neurológicos y deterioro cognitivo; el benceno también puede producir anemia, además de ser un carcinógeno; asimismo, existe evidencia sobre la carcinogenicidad del etilbenceno en otros tejidos (ATSDR, 2004).

La exposición a corto plazo e inhalación de compuestos BTEX puede provocar mareo, dolor de cabeza, irritación de los ojos, nariz y garganta, vómito, confusión e incluso dificultades para respirar (CONACYT, s/f). De igual forma, se considera que la exposición a largo plazo puede estar relacionada con la pérdida de memoria y el debilitamiento de los músculos. Otros impactos relevantes incluyen la alteración endocrina como resultado de la exposición individual y combinada a estos contaminantes; por ejemplo, la exposición a benceno se ha relacionado con la producción anormal de esperma, ciclos menstruales alterados, disminu-

7 Incluyen cualquier compuesto de carbono, excluido el monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbónico, carburos metálicos o carbonatos y carbonato de amonio, que tiene una alta volatidad, por lo que se puede encontrar en fase gaseosa a temperatura ambiente. En el Capítulo 3 se detallan características físicas y químcas de los COV.

ción de células inmunes y anticuerpos, aborto espontáneo, así como la activación de vías de estrés oxidativo e incluso cáncer. Asimismo, estudios de exposición a BTEX han demostrado su relación con enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Bolden *et al*., 2015).

Otro grupo de COV con efectos perjudiciales sobre la salud humana son los HAP, los cuales se forman durante la combustión incompleta de combustibles fósiles. Al emitirse hacia la atmósfera, pueden encontrarse en fase gaseosa o como parte de las partículas suspendidas. Gran parte de estos compuestos tienen propiedades tóxicas, mutagénicas y/o carcinogénicas. Al ser altamente solubles en lípidos, se absorben en el tracto gastrointestinal de los mamíferos y se distribuyen rápidamente en una variedad de tejidos, con una marcada tendencia a acumularse en la grasa corporal (Abdel-Shafy & Mansour, 2016). En la Ciudad de México y su zona metropolitana, los HAP son un componente importante de las partículas suspendidas, y su distribución está ligada principalmente a las emisiones vehiculares; si bien la concentración de estos compuestos en la atmósfera ha disminuido en los últimos años por la aplicación de medidas para el control de emisiones en fuentes móviles, los niveles rebasan estándares utilizados en otros países, particularmente durante la temporada seca, de noviembre a abril (Amador-Muñoz *et al*., 2010, 2013).

Tabla 6.8 Límites permisibles internacionales para compuestos orgánicos volátiles

COV	Criterios de calidad del aire ambiente (Gobierno de Ontario, 2016)	Guías de calidad del aire para Europa (OMS, 2000)	Estándares de calidad del aire de la Unión Europea (European Commission, 2019)	Objetivos nacionales de calidad del aire del Reino Unido (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2015)
Benceno	0.45 µg/m³ (promedio anual) 2.3 µg/m³ (24 h)	-	5 µg/m³ (promedio anual)	16.25 µg/m³ (promedio anual)
Tolueno	2000 µg/m³ (24 h)	260 µg/m³ (promedio semanal)	-	-
Etilbenceno	1000 (24 h) 1900 (10 min)	-	-	-
Xilenos	730 (24 h) 3000 (10 min)	-	-	-
HAP	0.01 ng/m³ (promedio anual de benzo[a]pireno como sustituto de la concentración total)	-	1 ng/m³ (promedio anual expresado como concentración de benzo[a] pireno)	0.25 ng/m³ (promedio anual expresado como concentración de benzo[a] pireno)

Fuente: *Elaboración propia.*

6.2.7 Relación entre la mala calidad del aire y enfermedades infecciosas

Diferentes estudios sugieren que la exposición continua a la contaminación atmosférica se asocia con enfermedades infecciosas como la neumonía y la influenza (Chau & Wang, 2020). Las enfermedades infecciosas emergentes (EIE) representan una amenaza a la salud pública por la velocidad en la que se pueden propagar, e investigaciones recientes evidencian que la mala calidad del aire está estrechamente relacionada con el incremento de ingresos hospitalarios por EIE en varias regiones del mundo (Hodges & Tomcej, 2016). Asimismo, las partículas suspendidas son consideradas reservorios de virus y bacterias, por lo que concentraciones elevadas podrían incrementar el riesgo de contagio.

Un caso de estudio es la enfermedad causada por el coronavirus SARS-CoV-2, la COVID-19, catalogada como pandemia por la OMS en 2020 debido a su rápida propagación hacia la gran mayoría de

los países del mundo. Una investigación llevada a cabo por la Universidad de Harvard destacó la relación que tiene la exposición a partículas $PM_{2.5}$ con la tasa de mortalidad por COVID-19 en 3080 condados de Estados Unidos; el estudio indica que un incremento de 1 µg/m³ en la concentración de $PM_{2.5}$ se asocia con un aumento del 8% en la tasa de mortalidad por COVID-19 (intervalo de confianza al 95%: 2% a 15%) (Wu, Nethery, *et al*., 2020). Además, en Italia se demostró que el virus SARS-CoV-2 se ha concentrado en las partículas PM_{10}, lo cual sugiere que podrían actuar como agentes de contagio del virus (Setti *et al*., 2020), mientras que en el Reino Unido se asoció la exposición a altos niveles de O_3 y NO_X con las muertes por COVID-19 (Travaglio *et al*., 2020). De igual forma, una investigación elaborada por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) evidenció que existen más incidencias y un mayor riesgo de mortalidad y morbilidad por COVID-19 en ambientes contaminados, en particular por NO_2 y partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} (Félix-Arellano *et al*., 2020).

El Centro de Control y Prevención de Enfermedades de Estados Unidos demostró la asociación entre la exposición a contaminantes atmosféricos y enfermedades como la influenza (Somayaji *et al*., 2020). Esto se debe a que los efectos de la mala calidad del aire pueden exacerbar las complicaciones derivadas de una infección respiratoria, además de que, como se expuso anteriormente, las partículas son reservorio de agentes infecciosos. La relación entre las EIE y la exposición a los contaminantes en el aire continúa siendo objeto de estudio, sin embargo, cada vez se encuentra más evidencia que sostiene la correlación que existe entre ambos fenómenos. Esto manifiesta la necesidad de mejorar la calidad del aire para reducir la vulnerabilidad a infecciones como la influenza o la COVID-19.

6.2.8 Impactos del cambio climático en la calidad del aire y la salud humana

Los impactos del cambio climático sobre la salud pública incluyen efectos directos por el aumento en la frecuencia e intensidad de olas de calor más severas y repercusiones sobre la seguridad alimentaria, así como efectos sobre la prevalencia de enfermedades infecciosas (por ejemplo, aquellas transmitidas por vectores o enfermedades gastrointestinales) y la calidad del aire (Hong *et al*., 2019). En el Capítulo 4 se expuso la relación entre el cambio climático y la calidad el aire, y cómo las proyecciones a futuro indican que una mayor temperatura y modificaciones en los patrones de precipitación y humedad, entre otros cambios del clima, pueden tener una penalización sobre la calidad del aire e impactar negativamente en la concentración de O_3 y $PM_{2.5}$. Asimismo, este aumento en la concentración de contaminantes conlleva un impacto en la mortalidad prematura. Por ejemplo, se ha estimado que un aumento de 1°C en la temperatura promedio durante el verano en el sureste de Estados Unidos conlleva un incremento del 2.46% (intervalo de confianza de 95%: 2.33 a 2.59%) en la tasa de mortalidad (Shi *et al*., 2016), en tanto que otro estudio del mismo autor reporta que un aumento de 1°C en la temperatura media durante el verano incrementa la mortalidad por O_3 en 3.23%, y la mortalidad por $PM_{2.5}$ en 1.02% (Shi *et al*., 2019).

Sin embargo, se destaca que la mitigación de emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero (CyGEI) conlleva co-beneficios en la calidad del aire y la salud pública a través de dos mecanismos:

1. Las acciones de reducción de emisión de CyGEI implican también reducciones en emisiones de contaminantes locales.
2. Aminorar el ritmo del cambio climático reduce la penalización climática sobre la calidad del aire (West *et al.*, 2013).

Uno de los CyGEI de atención prioritaria es el metano (CH_4), puesto que además de contribuir al incremento del forzamiento radiativo y el calentamiento global, también es un precursor de O_3; en ese sentido, reducir las emisiones globales de CH_4 en 20% entre 2010 a 2030 implicaría una reducción mundial de 1 ppb en el máximo diario de los promedios móviles de 8 horas, así como 370 mil muer-

tes prematuras evitadas en ese mismo periodo de tiempo (West *et al*., 2006).

La política climática puede reducir sustancialmente los impactos a la salud por la mala calidad del aire; asimismo, al monetizar estos beneficios se puede observar que compensan una fracción de los costos de mitigación de CyGEI. Se destaca también que los beneficios en la calidad del aire inducidos por la mitigación del cambio climático aumentan con el tiempo y serán más significativos entre 2050 y 2100, por lo que deberían incorporarse de forma rutinaria en los análisis costo-beneficio de las políticas climáticas y de reducción de la contaminación atmosférica. El estudio de Garcia-Menendez *et al*. (2015) monetiza los beneficios en la reducción de la mortalidad inducida por el cambio climático en Estados Unidos, con valores de $8-25 USD por tCO_2e mitigada en 2050, y $13-125 USD/$tCO_2e$ en 2100 (a precios de 2005). Otros estudios reportan valores entre $50-380 USD/$tCO_2e$ (West *et al*., 2013) y $2-196 USD/$tCO_2e$ (Nemet *et al*., 2010), con mayores co-beneficios en países en desarrollo. El amplio rango de los valores reportados está asociado a la incertidumbre del valor de una vida estadística (VSL) y las funciones concentración-respuesta utilizadas en su determinación.



6.3 Evidencia epidemiológica

La epidemiología es una disciplina científica que estudia la frecuencia y distribución de fenómenos relacionados a la salud y sus determinantes en poblaciones específicas (Bordonada & Moreno, 2009). En materia de calidad del aire, la estimación de los beneficios a la salud requiere de evidencia epidemiológica que refleje cuantitativamente los efectos de la exposición a la contaminación atmosférica sobre la mortalidad. Dos clases de diseños experimentales han sido utilizados con este fin, los estudios de series de tiempo y los estudios de cohorte.

Los estudios de series de tiempo investigan asociaciones a corto plazo a partir de datos disponibles en intervalos de tiempo regulares, como los niveles de contaminación diarios y recuentos de muertes en el día a día (mortalidad inmediata). Este enfoque permite evaluar el vínculo entre los efectos a la salud y la exposición aguda a contaminantes atmosféricos (Bhaskaran *et al*., 2013). Por ejemplo, las muertes en un día dado se relacionan con las concentraciones de contaminantes en el mismo día o en un número específico de días previos (ventana o rezago).

Por otro lado, los estudios de cohorte se caracterizan por la identificación y seguimiento de uno o más grupos de personas con un determinado nivel de exposición, para detectar y cuantificar la aparición del evento o enfermedad de interés a largo plazo. Esto sirve para cuantificar tanto la frecuencia de enfermedad en distintas cohortes (incidencia acumulada), como el ritmo o dinámica de la enfermedad en cada una de ellas (tasa de incidencia). Dado que esta clase de estudios abordan la relación entre la exposición crónica y la mortalidad, son los más recomendados para evaluar impactos a la salud en análisis costo-beneficio. Estos estudios se utilizan para determinar funciones concentración-respuesta (FCR), las cuales representan la probabilidad de ocurrencia de un impacto a la salud en función de un cambio en la concentración de un contaminante en particular, para un grupo de edad de población y una causa de muerte específica.

Un último tipo de estudios disponibles en la literatura epidemiológica son los meta-análisis, los cuales sintetizan otras evaluaciones epidemiológicas para encontrar una medida resumida del impacto de los contaminantes en la salud. A través de revisiones sistemáticas y cuantitativas de las evidencias de múltiples estudios epidemiológicos se incrementa la objetividad del resultado tanto de diferentes estudios de series de tiempo como de cohorte (Marín Martínez *et al*., 2009). Los meta-análisis son las evaluaciones más útiles para realizar EIS en México, al no contar con estudios de cohorte locales.

A continuación se describe evidencia epidemiológica que ha sido utilizada tanto en EIS anteriores para la zona de estudio y que se exponen más adelante en este capítulo, así como en la EIS específicamente desarrollada para el presente ProAire. Esto incluye estudios de cohorte y de meta-análisis que evalúan el promedio anual de exposición a contaminación del aire y el impacto en la mortalidad específica para diferentes causas de enfermedad y grupos de edad. Se resalta que al momento no se cuenta con estudios de cohorte específicos para México, por lo que la descripción se limita a investigaciones realizadas en otras ciudades y países. También se abordan estudios de series de tiempo que incluyen evidencia específica para la Ciudad de México y su zona metropolitana, dentro de los cuales se han encontrado asociaciones entre variaciones en el número de muertes diarias y los niveles de contaminación del aire en días anteriores.

6.3.1 Evidencia epidemiológica a largo plazo (estudios de cohorte y meta-análisis)

Evidencia epidemiológica para ozono

El estudio de Woodruff *et al*. (2008) evaluó la relación entre la exposición a O_3 y otros contaminantes atmosféricos con la mortalidad infantil en Estados Unidos. Se partió de una cohorte de alrededor de 3.5 millones de infantes nacidos entre 1999 y 2002 en 96 condados estadounidenses. Para cada infante se estimó la exposición a partir del promedio de concentración de O_3 durante sus primeros 2 meses de vida. Se determinó que un aumento de 10 ppb en la concentración de O_3 incrementa en 20% la probabilidad de muerte súbita del lactante (*odds ratio* o razón de momios[8] OR igual a 1.20; IC 95%: 1.09 a 1.32).

8 El *odds ratio* (OR) o razón de momios representa la probabilidad de que ocurra una incidencia dada una exposición a una variable explicativa. Un momio corresponde a la razón entre la probabilidad de que un evento ocurra y la probabilidad de que no ocurra. Un OR es la razón entre dos momios para distintos grupos (por ejemplo, uno que estuvo expuesto a una variable explicativa y otro que no).

A su vez, Jerrett *et al*. (2009) utilizaron los datos del Estudio de Prevención de Cáncer II y los correlacionan con datos de contaminación del aire de 96 áreas metropolitanas en Estados Unidos. En total se dio seguimiento a 448 850 personas, con un total de 118 777 muertes en un período de 18 años; la exposición se analizó a partir de datos de la concentración máxima diaria de O_3 entre 1977 y 2000. Los resultados estimaron un aumento del 4% en el riesgo de muerte por causas respiratorias (*relative risk*[9] RR de 1.040; IC 95%: 1.010 a 1.067) para un incremento de 10 ppb en el promedio de los máximos diarios de 1 hora de O_3 durante la temporada caliente; este valor se obtuvo al controlar por $PM_{2.5}$ en un modelo de dos contaminantes.

Un estudio reciente elaborado por Turner *et al*. (2016) determinó que el O_3 puede contribuir significativamente al riesgo de mortalidad respiratoria y cardiovascular. El estudio analizó a 6 669 046 participantes del Estudio de Prevención de Cáncer II (*Cancer Prevention Study II*) desde 1982 y hasta el 2004, año al cual 237 201 de las personas estudiadas habían fallecido. Los resultados revelan una asociación significativa entre la exposición a O_3 y la mortalidad por causas generales. Los resultados muestran que un incremento de 10 ppb en el promedio anual de la concentración máxima de 8 horas diaria de O_3 se traduce en un incremento del 2% en el riesgo de mortalidad por causas generales (*hazard ratio*[10] HR igual a 1.02; IC 95%: 1.01 a 1.04), 3% para causas cardiovasculares (HR 1.03; IC 95%: 1.01 a 1.05) y 12% para causas respiratorias (HR 1.12; IC 95%: 1.08 a 1.16). Además, el estudio determinó que el mismo aumento en la concentración de O_3 incrementa el riesgo de muerte por neumonía e influenza en 10% (HR 1.10; IC 95%: 1.03 a 1.18) y para EPOC en 14% (HR 1.14; IC 95%: 1.08 a 1.21).

Estos estudios muestran que la exposición crónica a O_3 incide en un mayor riesgo de muerte prematura por diversas causas. Los padecimientos analizados incluyen tanto causas generales como específicas, destacando el impacto en mortalidad por causas respiratorias, EPOC, neumonía e influenza y enfermedades cardiovasculares. Asimismo, se registran efectos en la mortalidad posneonatal por el síndrome de muerte súbita del lactante, conocida también como muerte de cuna. Esta información se resume en la Figura 6.7.

Evidencia epidemiológica para partículas PM_{10}

Künzli *et al*. (2000) estimaron el impacto a la salud por un incremento en la concentración ambiental de PM_{10} en Austria, Francia y Suiza. El resultado del estudio muestra que un aumento de 10 µg/m³ en la concentración de PM_{10} incrementa el riesgo de muerte en personas adultas mayores a 30 años por causas generales en 4.3% (RR 1.043; IC 95%: 1.026 a 1.061).

En cuanto a la exposición crónica a niveles altos de partículas PM_{10} en el aire ambiente, el estudio de Woodruff *et al*. (2008) también evalúa la relación entre la exposición a este contaminante y la mortalidad infantil en Estados Unidos. Los resultados muestran una asociación significativa entre la exposición a PM_{10} y la mortalidad en población posneonatal; un incremento de 11 µg/m³ en la concentración se traduce en un 18% más de probabilidad de muerte por causas respiratorias (OR 1.18; IC 95%: 1.06 a 1.31) y 4% por causas generales (OR 1.04; IC 95%: 0.99 a 1.10).

Un estudio elaborado por Heinrich *et al*. (2013) evaluó la relación entre la exposición crónica a partículas PM_{10} y sus implicaciones en la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón, específicamente para una cohorte de mujeres. Se dio seguimiento a aproximadamente 4800 mujeres alemanas de 55 años a lo largo de 18 años. Los resultados indican que un aumento de 7 µg/m³ de PM_{10} se asocia con un incremento en el riesgo de mortalidad por causas generales de 15% (HR 1.15; IC 95%: 1.04 a 1.27), por enfermedades cardiopulmonares de 39% (HR 1.39; IC 95%: 1.17 a 1.64), y por cáncer de pulmón en 84% (HR 1.84; IC 95%: 1.23 a 2.74).

Estas investigaciones evidencian la relación significativa entre la exposición crónica a PM_{10} y un mayor riesgo de muerte prematura por causas tanto generales como específicas, incluyendo padecimientos cardiopulmonares y cáncer de pulmón (Figura 6.7).

9 El riesgo relativo, *relative risk* o RR representa el número de veces más probable (RR > 1) o menos probable (RR < 1) que ocurra un evento en un grupo, en comparación con otro. Se calcula como la razón entre los riesgos absolutos para ambos grupos. En la literatura epidemiológica se considera equivalente al *hazard ratio*; la diferencia principal es que el RR representa un valor de riesgo cumulativo para un periodo de estudio entero, y no un riesgo instantáneo.

10 El *hazard ratio* (HR) representa una razón entre dos funciones de riesgo, o tasas de incidencia de un evento respecto de dos niveles de una variable explicativa. Se utiliza en el contexto de supervivencia a lo largo del tiempo y se puede interpretar como un riesgo instantáneo.

Evidencia epidemiológica para partículas $PM_{2.5}$

La evidencia para $PM_{2.5}$ y sus efectos en la mortalidad por exposición crónica ha sido ampliamente documentada a nivel mundial, especialmente en Estados Unidos y en Europa, y recientemente en Asia, aunque en México todavía no existen estudios de cohorte locales. Se han llevado a cabo diversos meta-análisis con el objetivo de integrar, en un único estimador de efecto, los resultados de los diversos estudios que consideran funciones de riesgo a distintas concentraciones de $PM_{2.5}$.

En el estudio de Hoek *et al*. (2013) se realiza un meta-análisis de los estudios epidemiológicos publicados hasta el 2013 sobre efectos en la mortalidad general, cardiovascular y respiratoria por exposición a largo plazo de partículas $PM_{2.5}$, incluyendo el análisis de la cohorte de la Sociedad Americana contra el Cáncer (ACS, por sus siglas en inglés). Aunque se identificaron estudios realizados en Asia (China y Japón), estos no cumplieron con los criterios para ser incluidos en el meta-análisis. Los resultados indican un incremento del 6.2% en el riesgo de muerte por causas generales (IC 95%: 4.1 a 8.4%) y de 10.6% por causas cardiovasculares (IC 95%: 5.4 a 16%), para incrementos de 10 µg/m³; en la estimación se incluyeron 11 y 10 estudios, respectivamente, y ninguno presentó un promedio anual de $PM_{2.5}$ mayor a 30 µg/m³.

Burnett *et al.* (2014) buscaron obtener una FCR que cubriera el rango de concentración de $PM_{2.5}$ existente en todos los países del mundo y caracterizar la forma de la curva concentración-respuesta para poder estimar la carga de la enfermedad en el mundo debido a la exposición crónica a $PM_{2.5}$. Sin embargo, hasta el 2014 no existían estudios de cohorte de calidad que mostraran la asociación entre exposición a $PM_{2.5}$ y mortalidad en países con altas concentraciones de este contaminante. Para evitar estimaciones basadas en la extrapolación de resultados de estudios en zonas de baja concentración, que al aplicarlas de forma lineal arrojarían resultados que no serían biológicamente plausibles, se construyó una función integrada, conocida como IER, por sus siglas en inglés (*Integrated Exposure Response Function*). Este modelo integrado de exposición-respuesta incluyó riesgos relativos de estudios de exposición a $PM_{2.5}$ en aire ambiente, fumadores pasivos, fumadores activos y usuarios de biomasa como combustible para cocinar. Con esto se construyó una curva de FCR más apegada a la realidad al no superar los riesgos observados en estudios de exposición a contaminación de interiores; asimismo, en la curva se observa que el impacto en la mortalidad por el incremento en una unidad de $PM_{2.5}$ disminuye conforme aumenta la concentración. Esta función abarca todo el rango de exposición a $PM_{2.5}$ global para cuatro causas específicas de mortalidad en personas adultas: enfermedad isquémica del corazón, enfermedad cerebrovascular, EPOC y cáncer de pulmón; y para mortalidad por infecciones agudas de vías respiratorias inferiores en niñas y niños menores de 5 años. Una de las desventajas más importantes es que con esta FCR se asume que la toxicidad de las partículas provenientes de las distintas fuentes es similar. La función IER se actualiza regularmente para incluir nuevos estudios y métodos estadísticos que precisen la estimación de los parámetros de la función, y así mejorar la estimación de la carga global de la enfermedad (OMS, 2018a). La última actualización (Cohen *et al*., 2017) incluye todos

los estudios publicados hasta mediados de 2016, 24 en total. La OMS recomienda utilizar la función IER en ciudades o países donde la concentración media anual de $PM_{2.5}$ es igual o mayor a 35 µg/m³. Se destaca que para estimar la carga global de la enfermedad la función IER sigue siendo la más recomendada (Burnett & Cohen, 2020).

Por otro lado, y con el objetivo de contar con un meta-análisis actualizado de la mortalidad tanto por causas generales como específicas asociada a exposición crónica a $PM_{2.5}$, y para obtener un mejor estimador de riesgo de muerte utilizando solo estudios de exposición a exteriores, Vodonos *et al*. (2018) evaluaron 53 estudios y 135 coeficientes de riesgo para las regiones de Norte América, Europa y Asia. Estos estudios se identificaron en la literatura hasta abril de 2017 y cubren áreas geográficas y un rango de exposición promedio a $PM_{2.5}$ más amplio que el considerado por Hoek *et al*. (2013); 14 estudios se realizaron en lugares con promedios anuales de $PM_{2.5}$ menores a 8 µg/m³ y 8 estudios con promedios mayores a 20 µg/m³. Este estudio muestra que la respuesta en la mortalidad por la exposición a $PM_{2.5}$ no es lineal, con mayores impactos en rangos bajos de concentración. La investigación concluye que un aumento de 1 µg/m³ en la concentración de $PM_{2.5}$ provoca un incremento de 1.29% en la mortalidad por causas generales y para todas las edades (IC 95%: 1.09 a 1.50%), de 1.92% para causas cardiopulmonares (IC 95%: 1.25 a 2.25%) y de 1.46% para causas cardiovasculares (IC 95%: 1.25 a 1.67%), considerando una exposición media anual de 10 µg/m³. Sin embargo, en los resultados de la investigación se puede observar que, conforme aumenta la concentración media de $PM_{2.5}$ a la que está expuesta la población, disminuye la respuesta en la mortalidad; por ejemplo, para una exposición media de 15.7 µg/m³, el porcentaje de incremento en la mortalidad general disminuye a 1.03% por cada 1 µg/m³ de $PM_{2.5}$ (IC 95%: 0.97 a 1.11%), en tanto que para una exposición media de 30 µg/m³, el incremento en la mortalidad general disminuye a 0.82% (IC 95%: 0.52 a 1.12%).

En 2018, y debido a la mayor evidencia científica en países con bajas y altas concentraciones de $PM_{2.5}$, Burnett *et al*. (2018) construyeron el modelo de mortalidad de exposición global, conocido como GEMM por sus siglas en inglés (*Global Exposure Mortality Model*), en el cual se emplean únicamente estudios de exposición a $PM_{2.5}$ en aire ambiente, incluyendo un estudio de cohorte de hombres chinos expuestos a concentraciones de hasta 84 µg/m³. Se desarrolló un modelo para cada causa específica considerada en la función IER, además de una función para mortalidad por causas no accidentales que abarca enfermedades crónicas degenerativas e infecciones de vías respiratorias inferiores. Este modelo caracteriza la forma no lineal de la asociación entre la exposición al aire de exteriores y la mortalidad; por debajo de 30 µg/m³, la función GEMM es supra-lineal con un mayor incremento en el riesgo relativo a niveles más bajos de concentración, en comparación con el modelo log-lineal (Burnett & Cohen, 2020). Al estimar la carga global de la enfermedad con este método, se encontró que las funciones de riesgo predicen un exceso de muertes a nivel global que es 220% más grande que el estimado con la función IER. Estos resultados sugieren que existen causas de muerte adicionales a las cinco causas consideradas en el IER para exposición a $PM_{2.5}$. Aunque esta función tiene ventajas con respecto a la función IER, en específico por incluir solamente estudios de exposición a exteriores, es importante mencionar que la función GEMM fue altamente sensible a la inclusión del estudio de cohorte de hombres chinos con exposiciones de hasta 84 µg/m³. En este sentido, Burnett & Cohen (2020) recomendaron seguir empleando la función IER para estimar la carga global de la enfermedad hasta ajustar mejor el modelo de GEMM. Sin embargo, para realizar EIS en ciudades y países con concentraciones de $PM_{2.5}$ por debajo de 50 µg/m³ se sugiere considerar el contexto de la zona de estudio y, en su caso, emplear la versión de la función GEMM que no incluye la cohorte de hombres chinos pero sí estudios cuya concentración fue de hasta 49.7 µg/m³.

A su vez, un meta-análisis más reciente de Pope *et al*. (2020) incluyó 33 estudios de 75 identificados, para evitar considerar estimadores provenientes de estudios de la misma cohorte; en total se seleccionaron 16 estudios de Norteamérica, 10 de Europa y 7 de Asía. El estudio determinó que un incremento en 10 µg/m³ de $PM_{2.5}$ implica 8% más riesgo de mortalidad por causas generales (HR 1.08; IC 95%: 1.06 a 1.11), 11% por causas cardiopulmonares (HR 1.11; IC 95%: 1.08 a 1.14) y 13% por cáncer de pulmón (HR 1.13; IC 95%: 1.07 a 1.20).

La OMS recientemente solicitó a Chen & Hoek (2020) un meta-análisis para evaluar e integrar la evidencia más reciente (hasta octubre de 2018) con el objetivo de sustentar la actualización de las GCA de la OMS en cuanto a partículas suspendidas. Se incluyeron más de 70 estudios, la mayoría de los cuales se llevaron a cabo en Norte América y Europa.

Los resultados obtenidos para la razón de riesgo entre la exposición a $PM_{2.5}$ y mortalidad fueron:

Por causas naturales:
1.08 (IC 95%: 1.06 a 1.09) por cada 10 µg/m³

Para causas cardiovasculares:
1.11 (IC 95%: 1.09 a 1.14) por cada 10 µg/m³

Para enfermedad isquémica del corazón:
1.16 (IC 95%: 1.10 a 1.21) por cada 10 µg/m³

Para enfermedad cerebrovascular:
1.16 (IC 95%: 1.04 a 1.18) por cada 10 µg/m³

Para causas respiratorias:
1.10 (IC 95%: 1.03 a 1.18) por cada 10 µg/m³

Para EPOC:
1.11 (IC 95%: 1.05 a 1.17) por cada 10 µg/m³

Para infecciones de vías respiratorias bajas:
1.16 (IC 95%: 1.01 a 1.34) por cada 10 µg/m³

Para cáncer de pulmón:
1.12 (IC 95%: 1.07 a 1.16) por cada 10 µg/m³

La certeza de la evidencia fue considerada como alta para todas las causas, excepto para causas respiratorias que fue considerada como moderada. Aunque pocos estudios se llevaron a cabo en países de bajo y medianos ingresos, el gran número de estudios y la diversidad de poblaciones estudiadas disminuye la posibilidad de que factores de confusión no considerados en el meta-análisis expliquen la asociación observada entre $PM_{2.5}$ y la mortalidad. Al evaluar la forma



de la curva concentración-respuesta, cuando se realizó un meta-análisis solo tomando en cuenta los estudios en países con bajas concentraciones (promedio anual) de $PM_{2.5}$, se observó que las estimaciones eran similares o más altas comparadas con el riesgo relativo obtenido del meta-análisis considerando todos los estudios. Sin embargo, debido a los pocos estudios para países de bajos y medianos ingresos donde las concentraciones altas de partículas son frecuentes, no fue posible evaluar adecuadamente la forma de la curva concentración respuesta, especialmente en el rango más alto de concentraciones, y por ello se asumió una relación lineal para aplicar a los estimadores globales. En este sentido se recomienda precaución al implementar EIS con estos estimadores en regiones con muy altas concentraciones de partículas suspendidas. Finalmente, el estudio sugiere que existe un incremento del riesgo de mortalidad incluso por debajo de las GCA de la OMS, y concluyó que en caso de existir un umbral seguro de exposición a $PM_{2.5}$, este seguramente es a muy bajos niveles de concentración.

Finalmente, como ya se mencionó anteriormente, existen múltiples estudios de cohorte que evalúan la asociación entre exposición a $PM_{2.5}$ y mortalidad. Tres de los más relevantes, dos por ser de los más recientes y contundentes para el análisis de la relación entre exposición a $PM_{2.5}$ y mortalidad, y otro por ser el primer estudio de cohorte que incluye participantes de Latinoamérica, se describen a continuación. El estudio de cohorte de Pope *et al*. (2019) incluyó a casi 1.6 millones personas adultas de 18 a 84 años en Estados Unidos y determinó que un incremento en 10 $\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ implica 12% más riesgo de mortalidad por causas generales (HR 1.12; IC 95%: 1.08 a 1.15), 23% por causas cardiopulmonares (HR 1.23; IC 95%: 1.17 a 1.29) y 12% por cáncer de pulmón (HR 1.12; IC 95%: 1.00 a 1.26). El estudio de Wu *et al*. (2020) es uno de los más robustos y concluye que existe una relación causal entre exposición crónica a $PM_{2.5}$ y mortalidad. Dicho estudio evaluó una cohorte de más de 68.5 millones de personas adultas mayores de 65 años en Estados Unidos, la más grande utilizada para evaluar impactos por contaminación del aire, con cinco métodos estadísticos distintos; la evaluación determinó que una disminución de 10 $\mu g/m^3$ en la concentración de $PM_{2.5}$ representa 6 a 7% menos riesgo de muerte por causas generales en personas mayores de 65 años, con valores de HR en un rango de 1.06 (IC 95%: 1.05 a 1.08) a 1.08 (IC 95%: 1.07 a 1.09). Es importante mencionar que la concentración promedio a la que estuvo expuesta la población de ambas cohortes fue de 10 $\mu g/m^3$, mucho menor a la que se expone la población en la ZMVM, por lo que no sería adecuado utilizar dichos valores de RR como FCR en EIS para la ZMVM.

Por otro lado, el estudio de cohorte de Hystad *et al*. (2020) es el primero que incluye participantes de América Latina (Argentina, Brasil y Chile). De 2003 a 2008 se siguieron a 157 426 personas de 21 países de alto, mediano y bajo ingreso por un promedio de 9.3 años. En este periodo ocurrieron 9996 muertes no accidentales, de las cuales la tercera parte se debieron a enfermedades cardiovasculares. El promedio de concentración de tres años de $PM_{2.5}$ al inicio del estudio fue de 47.5 $\mu g/m^3$ (rango de 6 a 140 $\mu g/m^3$). Con modelos ajustados por factores individuales, de vivienda y geográficos, se determinó que un incremento en 10 $\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ se asocia con un aumento en el riesgo de eventos cardiovasculares de 5% (HR 1.05; IC 95%: 1.03 a 1.07), 7% para eventos cerebrovasculares (HR 1.0; IC 95%: 1.04 a 1.10) y 3% por mortalidad cardiovascular (HR 1.03: IC 95%: 1.00 a 1.05). El estudio contribuye a la evidencia del incremento del riesgo de enfermedad cerebrovascular por exposición a altas concentraciones de $PM_{2.5}$, pero se requiere contar con más estudios en América Latina para tener mayor claridad de la magnitud del impacto a la salud por la exposición a $PM_{2.5}$ en la región.

Los estudios anteriores muestran que hay una relación clara entre la exposición crónica a $PM_{2.5}$ y la mortalidad prematura por diversas causas, incluyendo cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares y pulmonares (ver Figura 6.7). Los niveles de concentración inciden en cambios significativos en el riesgo de muerte por enfermedad isquémica del corazón, enfermedades cardiopulmonares, enfermedades cerebrovasculares, cáncer de pulmón y causas generales.

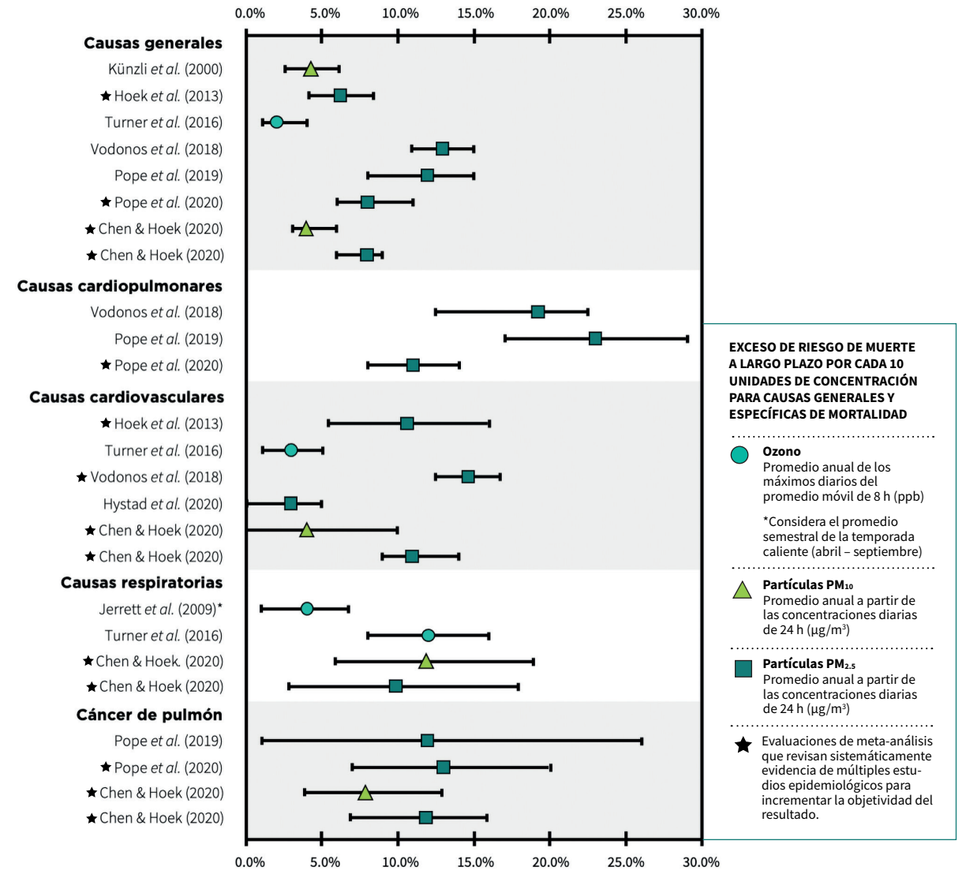


Figura 6.8 Efectos en la mortalidad a largo plazo por exposición a contaminantes atmosféricos
Fuente: *Elaboración propia.*

6.3.2 Evidencia epidemiológica a corto plazo (estudios de series de tiempo)

Evidencia epidemiológica para ozono

Estudios epidemiológicos que investigan la exposición a corto plazo (desde horas hasta unos días) al O_3 ambiental han mostrado que los niveles de este contaminante se asocian con incrementos en la mortalidad diaria, la exacerbación de enfermedades respiratorias y el aumento de ingresos hospitalarios. Además, existe evidencia sugestiva de que la exposición a O_3 en el corto plazo se vincula con efectos cardiovasculares adversos (Turner *et al*., 2016).

El estudio ESCALA (Romieu *et al*., 2012) estimó el efecto de la exposición diaria a O_3 en la mortalidad por diversas causas (generales, cardiopul-

monares, respiratorias, cardiovasculares, infarto cerebrovascular y EPOC) y varios grupos de edad, en seis ciudades latinoamericanas, incluyendo a la Ciudad de México. Los resultados muestran un incremento en el riesgo de muerte por causas cardiopulmonares del 0.23% (IC 95%: 0.11 a 0.36%) para un cambio de 10 µg/m³ en la concentración máxima del promedio de 8 horas de O_3 para todas las edades y del 0.33% (IC 95%: 0.20 a 0.46%) para personas mayores de 65 años; por causas respiratorias del 0.21% (IC 95%: 0.10 a 0.31%) para todas las edades; y por causas cardiovasculares del 0.23% (IC 95%: 0.09 a 0.37%) para todas las edades y del 0.30% (IC 95%: 0.14 a 0.46%) para mayores de 65 años. Los impactos en personas de más de 65 años fueron más severos para la mayoría de las causas de muerte, en particular enfermedades cardiopulmonares y cardiovasculares.

Otro estudio que evalúa las implicaciones que hay entre la exposición aguda a niveles altos de O_3 es el de Zu *et al*. (2017). Esta investigación evalúa la respuesta en el número de hospitalizaciones por asma en relación con la exposición a corto plazo en el estado de Texas, Estados Unidos. Se llevó a cabo un análisis de series de tiempo de las admisiones hospitalarias por asma y la concentración de O_3 ambiental en seis áreas metropolitanas durante los años 2001 a 2013. Se estimó el efecto de la concentración máxima del promedio de 8 horas en ingresos hospitalarios para todas las edades combinadas, y para los grupos de 5 a 14, 15 a 64, y mayores de 65 años. El riesgo de hospitalización estimado por un aumento de 10 ppb en la concentración diaria fue mayor para niñas y niños (RR 1.047; IC 95%: 1.025 a 1.069), menor para personas adultas de 15 a 64 (RR 1.018; IC 95%: 1.005 a 1.032) y no significativo para la población adulta mayor a 65 años (RR 1.002, IC 95%: 0.981 a 1.023).

Vicedo-Cabrera *et al*. (2020) evaluaron cambios en la mortalidad diaria en relación con la exposición a O_3 en 406 ciudades alrededor del mundo, analizando aproximadamente 45 millones de muertes. Los resultados muestran que un aumento de 10 µg/m³ (equivalente a 6 ppb) en la concentración máxima del promedio de 8 horas de O_3, durante el día en el que fallece la persona y el anterior a la muerte, incrementa el riesgo de mortalidad general en 0.18% (RR 1.0018; IC 95%: 1.0012 a 1.0024). Se encontró cierta heterogeneidad en todos los países, con estimaciones que van desde más de 0.20% en el Reino Unido, Sudáfrica, Estonia y Canadá, a menos de 0.08% en México (RR 1.0008; IC 95%: 1.000 a 1.0015) y España. Las estimaciones más pequeñas e imprecisas identificadas en algunos países como México podrían deberse a que, aunque el análisis se controló por varios factores a nivel comunitario que potencialmente modifican la asociación entre exposición y mortalidad, quizá estas no caracterizan por completo las diferencias entre países. En este sentido, se requieren más estudios para determinar los factores que hacen a unas poblaciones más vulnerables a la contaminación que a otras. Por otro lado, el exceso de mortalidad a corto plazo por exposición a una concentración de O_3 superior a los niveles máximos de fondo (70 µg/m³) es de 0.26% (IC 95%: 0.24 a 0.28%) si se consideran todas las ciudades. El exceso de mortalidad permanece en 0.20% (IC 95%: 0.18 a 0.22%) cuando el análisis se restringe a días con concentraciones por encima de la GCA de la OMS (100 µg/m³ para el promedio móvil de 8 horas).

Finalmente, Orellano *et al.* (2020) llevaron a cabo un meta-análisis para evaluar la evidencia de los efectos en la mortalidad por todas las causas para exposición a corto plazo a ozono (máximo de 8 horas), con el objetivo de sustentar la actualización de las GCA de la OMS. Se incluyeron estudios publicados de 1992 a 2019, de los cuales la mayoría se llevaron a cabo en Asia (73), Europa (69) y América (45; de estos, ocho se llevaron a cabo en México y dos incluyeron a varias ciudades de Latinoamérica); asimismo, tres de ellos abarcaron más de un continente. Se encontraron asociaciones positivas y significativas entre mortalidad por todas las causas y exposición a corto plazo a O_3 (RR: 1.0043; IC 95%: 1.0034 a 1.0052) y la certeza de la evidencia se juzgó como alta para todos los casos referidos.

Evidencia epidemiológica para PM_{10}

Numerosos estudios de series de tiempo han examinado la relación existente entre la mortalidad diaria y la exposición a partículas suspendidas. Un estudio de Téllez-Rojo *et al*. (2000) evaluó la relación entre la concentración de PM_{10} y el número de muertes por enfermedades respiratorias en personas adultas de la tercera edad (> 65 años) dentro de la Ciudad de México. Los resultados del estudio indican que el número total de muertes por causas respiratorias y EPOC se relacionan significativamente con concentraciones altas de PM_{10}. En específico, un aumento de 10 µg/m³ implica un aumento de 4.1% (IC 95%: 1.3 a 6.9%) en la mortalidad diaria por EPOC, con un rezago o ventana de 3 días, mientras que cuando se considera la exposición acumulada durante 5 días a este contaminante, el aumento en la mortalidad alcanza un valor del 6.1% (IC 95%: 2.4 a 9.9%).

El estudio de series de tiempo más comprensivo para Latinoamérica, el estudio ESCALA (Romieu *et al*., 2012), muestra que el incremento en la concentración de PM_{10} se relaciona con una mayor mortalidad tanto por causas generales como específicas, considerando datos de nueve ciudades Latinoamericanas. En general, un aumento de 10 µg/m³ implica un mayor riesgo de muerte por causas generales igual al 0.77% (IC 95%: 0.60 a 1.00%) en personas de cualquier edad. También se determinó que la concentración de PM_{10} tiene mayores impactos en la mortalidad por ciertas causas específicas; el riesgo de muerte por EPOC aumenta en 2.44% (IC 95%: 1.36 a 3.59%) cuando la concentración aumenta en 10 µg/m³, mientras que para causas respiratorias generales el riesgo se eleva en 1.39% (IC 95%: 0.98 a 1.81%) y en 0.72% para causas cardiovasculares (IC 95%: 0.54 a 0.89%).

Una evaluación más reciente de Liu *et al*. (2019) evaluó cómo la exposición a partículas PM_{10} influye en los decesos por causas generales, cardiovasculares y respiratorias en 652 ciudades. En promedio, un aumento de 10 µg/m³ en el promedio móvil de dos días para PM_{10} (el día actual y el anterior) se asocia con un incremento del 0.44% en la mortalidad por causas generales (IC 95%: 0.39 a 0.50%), 0.36% para mortalidad cardiovascular (IC 95%: 0.30 a 0.43), y 0.47% para mortalidad respiratoria (IC 95%: 0.35 a 0.58). Para México, tomando en cuenta 8 ciudades, un aumento de 10 µg/m³ en el promedio móvil de dos días para PM_{10} se asocia con un incremento del 0.67% en la mortalidad por causas generales (IC 95%: 0.48 a 0.86%).

Evidencia epidemiológica para $PM_{2.5}$

La exposición aguda a partículas $PM_{2.5}$ incide en la mortalidad cardiovascular y cerebrovascular. Gutiérrez-Ávila *et al*. (2018) realizaron un estudio de tipo ecológico con el objetivo de evaluar la relación entre la mortalidad diaria y la concentración de $PM_{2.5}$ en la Ciudad de México. Se obtuvieron registros diarios de defunciones por causas cardiovasculares y cerebrovasculares, entre los años 2004 y 2013, para personas de 25 a 65 años. Los resultados del estudio arrojaron que un aumento de 10 µg/m³ se asocia con un incremento del 1.22% en la mortalidad cardiovascular (IC 95%: 0.17 a 2.28%) y 3.43% para mortalidad por enfermedad cerebrovascular (IC 95%: 0.10 a 6.28%).

Según el estudio de Liu *et al*. (2019), un aumento en la concentración de $PM_{2.5}$ igual a 10 µg/m³ para el promedio móvil de dos días implica que la mortalidad diaria por causas generales incremente en 0.68% (IC 95%: 0.59 a 0.77%), 0.55% por causas cardiovasculares (IC 95%: 0.45 a 0.66%) y 0.74% por causas respiratorias (IC 95%: 0.53 a 0.95%). Para México, tomando en cuenta ocho ciudades, un aumento de 10 µg/m³ en el promedio móvil de dos días para $PM_{2.5}$ se asocia

con un incremento del 1.29% en la mortalidad por causas generales (IC 95%: 0.21 a 2.39%). En este estudio se observó que ocurre un potencial efecto de saturación, en el que el porcentaje de incremento de mortalidad por unidad de cambio tiende a ser menor en los rangos más altos de concentración.

El meta-análisis realizado por Orellano *et al.* (2020) evaluó los efectos en la mortalidad por exposición a corto plazo a $PM_{2.5}$ (promedio de 24 h) con el objetivo de sustentar la actualización de las GCA de la OMS. Se encontraron asociaciones positivas y significativas entre la exposición a corto plazo a $PM_{2.5}$ y la mortalidad por todas las causas (RR: 1.0065; IC 95% 1.0044 a 1.0086) y mortalidad cardiovascular (RR: 1.0092; IC 95% 1.0061 a 1.0123). La certeza de la evidencia se juzgó como alta para todos los casos referidos.

En la Figura 6.8 se resume la evidencia epidemiológica proveniente de estudios de series de tiempo y meta-análisis que analizan evidencia epidemiológica para la exposición aguda a contaminantes atmosféricos y su relación con la mortalidad diaria.

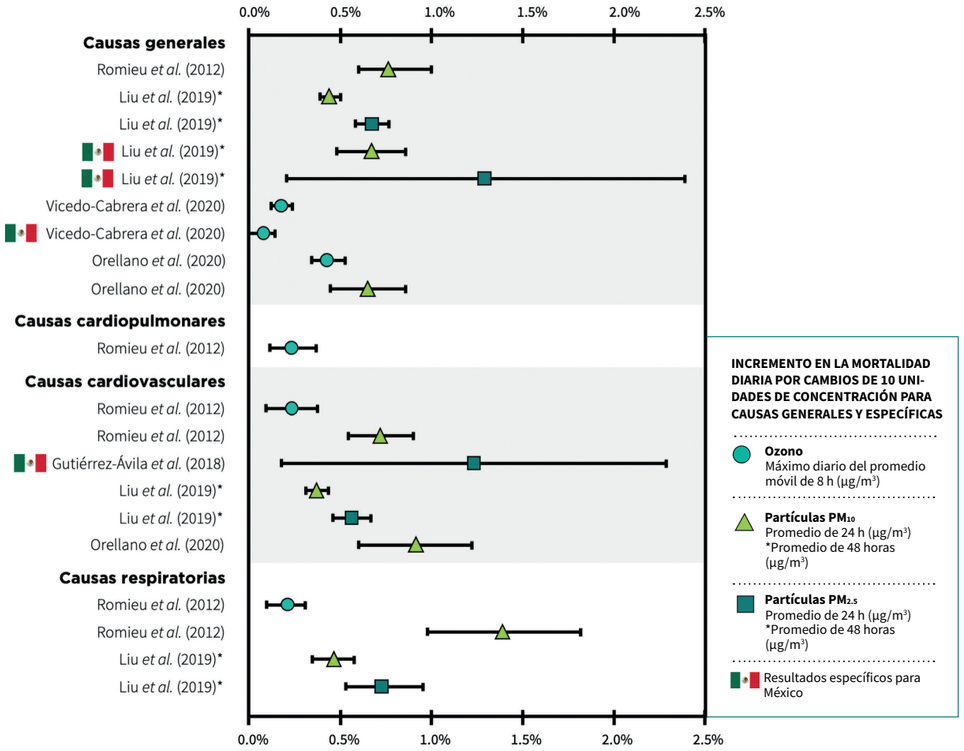


Figura 6.9 Efectos en la mortalidad por exposición a corto plazo (aguda) a contaminantes atmosféricos
Fuente: *Elaboración propia.*

6.4 Evaluaciones de Impactos a la Salud

Una Evaluación de Impactos a la Salud (EIS)[11] es un procedimiento estandarizado utilizado para evaluar riesgos y estimar beneficios a la salud en términos del número de incidencias asociadas a un estado determinado de la calidad del aire (INSP & INECC, 2017). En específico, el impacto en la mortalidad puede medirse como "muertes prematuras" cuando se calculan los impactos adversos de la contaminación del aire, o como "muertes prematuras evitadas" cuando se estiman beneficios a la salud por mejoras en la calidad del aire (Harvard T.H. Chan School of Public Health & SEDEMA, 2018). Los resultados comúnmente se complementan con una estimación de costos que monetiza las muertes según los lineamientos de la OCDE (2011) y que permite determinar beneficios económicos por mejorar la calidad del aire. De esta forma, es posible utilizar los resultados de una EIS en un análisis costo-beneficio y la toma de decisiones en torno a políticas públicas para reducir la contaminación atmosférica.

6.4.1 Metodología para estimar impactos a la salud derivados de mejoras en la calidad del aire

Actualmente en México, este tipo de evaluaciones parten de evidencia epidemiológica generada en estudios de cohorte y meta-análisis realizados en otras partes del mundo (revisar sección 6.3.1), así como de datos de calidad del aire y mortalidad específicos para la zona de estudio. Pese a la falta de estudios de cohorte locales, este método se considera apropiado dada la consistencia entre la evidencia local y aquella generada a nivel internacional en estudios de series de tiempo (Romieu *et al.*, 2012).

Una EIS sigue cuatro pasos sistematizados:

A. Identificación de impactos	Se determinan los contaminantes a evaluar y los impactos a la salud asociados. Se sustenta en evidencia epidemiológica para elegir una función concentración-respuesta (FCR[12]) para un contaminante y una causa de muerte específica. Las FCR indican la probabilidad de ocurrencia de un impacto a la salud en función de un cambio en la concentración de contaminantes (exposición).
B. Evaluación de exposición	Se caracteriza en términos cuantitativos el contacto de un agente con los seres humanos. Se parte de los niveles de contaminación a los que está expuesta una población (escenario base) y un cambio en la calidad del aire para un escenario control, el cual refleja la reducción hipotética en la concentración de contaminantes que se lograría mediante la aplicación de políticas de gestión de la calidad del aire. Por ejemplo, el escenario control puede consistir en alcanzar los límites permisibles definidos en las NOM de salud ambiental o las GCA de la OMS, aunque también se pueden modelar mejoras en la calidad del aire por la implementación de políticas y medidas específicas tendientes a reducir emisiones. Este paso implica evaluar la distribución espacial de la concentración de contaminantes y la población bajo los distintos escenarios, tomando en cuenta características demográficas como edad y sexo, entre otras.

11 El término Evaluación de Impactos a la Salud es comúnmente utilizado en México. En otros países y a nivel internacional, este tipo de estudios también se denominan como evaluaciones de riesgo o *health risk assessments* (OMS, 2016b).

12 Comúnmente se expresan como riesgo relativo / *relative risk* (RR), *hazard ratio* (HR), razones de momios / *odds ratio* (OR), o porcentaje de cambio en la variable de resultado (RPC), y son específicas para una o más causas de enfermedad y un grupo de edad en particular. En la sección 6.3.1 se resume evidencia epidemiológica de estudios de cohorte y meta-análisis utilizados para determinar FCR.

C. Caracterización de impactos

Se estima el riesgo a la salud y la incertidumbre asociada. Comúnmente se utiliza software especializado para vincular la información epidemiológica y las concentraciones de contaminantes para cuantificar los impactos correspondientes. El programa BenMAP-CE, desarrollado por la US EPA, emplea un modelo que calcula la distribución de la probabilidad de que ocurra el impacto en la salud a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = (1 - e^{-\beta \cdot \Delta C_i}) \cdot P \cdot Y_0$$

En donde:

- ΔY Es el número de muertes evitables correspondientes al escenario de cambio o de gestión de la calidad del aire, para la población expuesta y la causa de muerte analizada.
- β Es un coeficiente de riesgo unitario que proviene directamente de las FCR de la revisión de literatura epidemiológica.
- ΔC_i Es el cambio de concentración para un contaminante bajo el escenario de cambio o de gestión de la calidad del aire analizado.
- P Es la población expuesta analizada del grupo de edad correspondiente.
- Y_0 Es la tasa de mortalidad basal para el grupo de edad y la causa de enfermedad analizada.

Los resultados obtenidos indican el incremento o reducción de incidencias que ocurrirían como consecuencia del cambio en la calidad del aire.

D. Valoración económica

Se asigna un valor monetario a las muertes evitadas para expresar la magnitud de los impactos como un beneficio económico asociado a reducir la concentración de contaminantes, el cual se puede comparar con los costos de implementar políticas públicas de gestión de la calidad del aire. Esta valoración utiliza el Valor de una Vida Estadística (VSL, por sus siglas en inglés), el cual representa la disposición a pagar de la población para asegurar una disminución marginal en el riesgo de una muerte prematura (OMS & OCDE, 2015). El VSL no es un valor asignado a la vida de una persona en específico, sino que representa la suma del valor que cada miembro de la población otorga a pequeños cambios en el riesgo de muerte (OCDE, 2011), lo cual también puede interpretarse como el valor que le asigna una sociedad a evitar la muerte de una persona no identificada dentro de la misma.

A continuación se resumen los resultados de EIS recientes que cuantifican los impactos a la salud en la ZMVM, ya sea total o parcialmente, por la mala calidad del aire. En específico, se analizan los siguientes documentos:

- Análisis histórico de los beneficios en la salud de la población, asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015 (2018). Elaborado por la Escuela de Salud Pública T.H. Chan de la Universidad de Harvard en colaboración con la SEDEMA.
- Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión (2017). Elaborado por el INSP para la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC.
- Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las $PM_{2.5}$ en tres zonas metropolitanas mexicanas (2014). Elaborado por el INECC.
- Cuantificación de los impactos en salud y los costos económicos de la exposición a $PM_{2.5}$ en ciudades mexicanas pertenecientes al Sistema Urbano Nacional Estudio conducido por investigadores del INSP (Trejo-González *et al*., 2019).

Si bien cada EIS parte de supuestos distintos, con el fin de comparar los resultados reportados se utiliza el mismo VSL para monetizar las muertes prematuras estimadas por cada estudio. En el Anexo 6.1 se describe a detalle la metodología utilizada para estimar el VSL; se eligieron dos valores debido a que existe cierto grado de incertidumbre en su determinación, así como escasa información a nivel local o nacional. El valor primario (VSL1) corresponde a 2.166 millones de dólares (USD) a precios del 2018, que se obtiene a partir del VSL estimado para países de la OCDE en el año 2005, a través de una transferencia de beneficios (OCDE, 2012); este valor es consistente con el VSL usado en evaluaciones recientes para monetizar los beneficios de diversas intervenciones, por lo que se considera el valor primario. El valor secundario (VSL2) resulta del estudio de valoración contingente más reciente que se ha realizado en México y que fue llevado a cabo por el INECC en colaboración con la *London School of Economics and Political Science* (de Lima, 2020; INECC & LSE, 2015); el valor transferido para México es de 0.416 millones de dólares (USD) a precios del 2018; dado que este valor es muy inferior a los usados en estudios recientes para México y la zona de estudio, se considera como secundario.

Posteriormente se incluye una estimación de la mortalidad evitable por $PM_{2.5}$ y O_3 en la ZMVM de 2016 a 2018, elaborada por la SEDEMA en colaboración con el INSP; varios de los insumos utilizados en dicha EIS se emplearon también para evaluar los beneficios de implementar el presente ProAire.

6.4.2 Resultados de Evaluaciones de Impactos a la Salud en la ZMVM

Análisis histórico de los beneficios en la salud de la población, asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015 (Harvard T.H. Chan School of Public Health & SEDEMA, 2018)

El estudio examina los beneficios de las reducciones anuales en la concentración de $PM_{2.5}$ y O_3 en las 16 alcaldías de la Ciudad de México, para el periodo 1990-2015. La exposición de la población se evaluó con base en datos oficiales generados por el SIMAT, en tanto que los datos de mortalidad fueron proporcionados por la Secretaría de Salud de la Ciudad de México (SEDESA). En total se evaluaron cinco causas de muerte: para personas adultas de 30 años o más, enfermedad isquémica del corazón, infarto cerebrovascular (hemorrágico e isquémico), EPOC y cáncer de tráquea, bronquios y pulmón; para niñas y niños menores de cinco años solo se analizó mortalidad por infecciones respiratorias inferiores agudas.

Para estimar las muertes atribuibles a la contaminación del aire se utilizaron las FCR desarrolladas y utilizadas dentro del estudio de la carga global de enfermedad (GBD, por sus siglas en inglés) de 2010 y 2013. En específico, para $PM_{2.5}$ se aplicó la FCR estimada por Burnett *et al*. (2014) para las cinco causas de enfermedad analizadas. Para O_3 se partió de la FCR determinada por Jerrett *et al*. (2009) en un estudio de la Sociedad Americana contra el Cáncer para EPOC en adultos. En el análisis, las FCR se emplean de tal modo que se restringen las estimaciones de riesgo en las regiones de mayor exposición.

Los esfuerzos de gestión de la calidad del aire en la Ciudad de México y su zona metropolitana han permitido reducir la concentración promedio anual de $PM_{2.5}$ de 45 µg/m^3 en 1990 a 20 µg/m^3 en 2014. De forma simultánea, las concentraciones de O_3 (promedio estacional[13] de las concentraciones diarias horarias máximas) se han reducido de valores por encima de 160 ppb a 80 ppb. Estas mejoras en la calidad del aire se traducen en 22.5 mil muertes prematuras evitadas en 25 años (IC 95%, 17.9 a 28.0 mil), con 82% de los beneficios atribuibles a la reducción de partículas $PM_{2.5}$. La estimación de beneficios por contaminante fue de 18.2 mil muertes prematuras evitadas para $PM_{2.5}$ (IC 95%, 14.0 a 23.5 mil) y 4.1 mil para O_3 (IC 95%, 2.7 a 5.6 mil).

La mayoría de los beneficios corresponden a una reducción en la mortalidad de personas adultas mayores, pues 74% de las muertes prematuras evitadas fueron para población de 60 años o más. La disminución de incidencias por enfermedad isquémica del corazón, EPOC e infarto cerebrovascular representan el 44%, 29% y 19% de los beneficios, respectivamente. Las muertes prematuras evitadas por cáncer de pulmón en personas adultas, y por infecciones respiratorias inferiores agudas entre niñas y niños menores de 5 años, representan menos del 10% de las incidencias. Sin embargo, la mortalidad infantil cobra relevancia cuando se analiza desde una perspectiva de longevidad. La Figura 6.9 muestra gráficamente los resultados de muertes evitadas por contaminante, causa de enfermedad y grupo de edad.

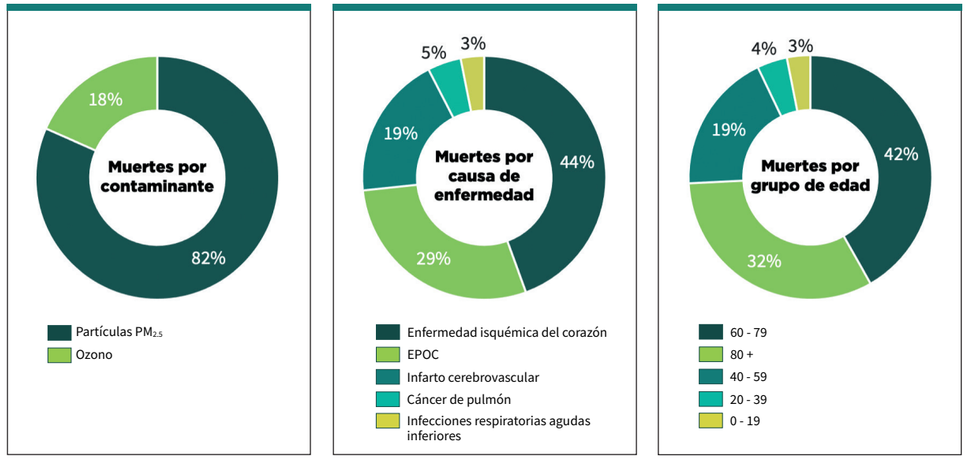


Figura 6.10 Distribución de muertes prematuras evitadas por contaminante, causa y grupo de edad de 1990 a 2014 en la Ciudad de México
Fuente: *Harvard T.H. Chan School of Public Health & SEDEMA (2018).*

13 El estudio original a partir del cual se tomó la FCR empleada (Jerrett ***et al***. 2009) consideró el semestre abril – septiembre por ser el más caluroso en Estados Unidos, periodo en el que se presentan usualmente las concentraciones más altas de O_3. De forma análoga, la evaluación de la escuela de salud pública Harvard T.H. Chan y la SEDEMA, definió como "estacional" al periodo del 1.º de febrero al 31 de julio, por incluir los meses con las concentraciones más elevadas de O_3.

Por otro lado, el estudio empleó métodos epidemiológicos directos, en específico modelos de regresión mixtos, y determinó que la disminución en la concentración de $PM_{2.5}$ desde 1990 y hasta 2015 ha generado un aumento de 1.3 años en la esperanza de vida de los habitantes de la Ciudad de México. Las mejoras en la concentración de O_3, en específico una disminución de aproximadamente 80 ppb en el promedio de las concentraciones máximas horarias, se traduce en 1.9 años adicionales en la esperanza de vida, lo que genera un beneficio neto para ambos contaminantes de 3.2 años.

Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión (INSP & INECC, 2017)

El objetivo del estudio fue estimar la mortalidad atribuible a las concentraciones de O_3 y partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la región centro del país, en términos de las muertes prematuras evitables bajo diferentes escenarios de gestión de la calidad del aire. La evaluación se realizó para el año 2014 con base en información generada por sistemas de monitoreo de la calidad del aire, incluyendo al SIMAT de la Ciudad de México, y estadísticas de defunciones generales proporcionadas por el INEGI.

Los impactos a la salud seleccionados fueron aquellos relacionados con la mortalidad a largo plazo por la exposición crónica a los contaminantes analizados, e incluyen:

- Para PM_{10} muertes por causas generales (A00-R99; ≥30 años y <1 año) y respiratorias (J00-J98; <1 año).
- Para $PM_{2.5}$ muertes por causas generales (A00-R99; ≥15 años), cardiopulmonares (I10-I70, J00-J98; ≥30 años), cardiovasculares (I00-I99; ≥15 años), enfermedad isquémica del corazón (I20-I25; ≥30 años) y cáncer de pulmón (C33-C34; 25 a 74 años).
- Para O_3 muertes por causas generales (A00-R99; ≥30 años), cardiovasculares (I20-I25, I30-I51, I60-I69, I70; ≥30 años), respiratorias (J00-J98; ≥30 años), neumonía e influenza (J00-J18; ≥30 años) y EPOC (J19-J46; ≥30 años).

Se utilizaron FCR derivadas de estudios de cohorte, revisiones sistemáticas y meta-análisis disponibles en la literatura internacional, en específico las cohortes de la Sociedad Americana contra el Cáncer y del estudio de seis ciudades de Harvard (*Six Cities Study*). La EIS cubrió al total de la población de la Ciudad de México y parcialmente a los municipios conurbados del Estado de México que forman parte de la ZMVM. Esto se debe a que se excluyen municipios sin información válida de calidad del aire, ya sea por la falta de una estación de monitoreo cercana al municipio con suficiencia de información (≥75%), o a que en un radio de 10 km no existía ninguna estación de monitoreo disponible para el municipio, por lo que no es posible generar los indicadores de promedio anual de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ ni el promedio anual de los máximos diarios del promedio móvil de 8 horas para O_3.

Para evitar doble conteo, a continuación se resumen los resultados para impactos cuyas causas y grupos de edad no se traslapan. En específico, se muestran resultados de muertes por causas generales para $PM_{2.5}$ (≥ 15 años) y O_3 (≥ 30 años). En total, de cumplir con los límites de las NOM de salud ambiental en 2014 (12 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ como promedio anual y 70 ppb de O_3 como promedio móvil de 8 horas), en la ZMVM se hubieran evitado 6485 muertes (IC 95%, 4328 a 8612), de las cuales 96% son a causa de $PM_{2.5}$. Si se alcanzaran los valores guía de la OMS (10 µg/m^3 de $PM_{2.5}$ como promedio anual y 50 ppb de O_3 como promedio móvil de 8 horas), el total de muertes prematuras evitables asciende a 8303 (IC 95%, 5243 a 11 301),

con un ligero aumento en el aporte de las muertes evitadas por la mejora en la concentración de O_3 en comparación con el escenario NOM. La Figura 6.10 resume gráficamente estos resultados.

Cuando se analizan causas específicas, se observa que la enfermedad isquémica del corazón es una de las causas principales de mortalidad por $PM_{2.5}$. A este padecimiento se atribuyen 1758 muertes evitables (≥ 30 años) en la Ciudad de México[14], lo que equivale a 44% de la estimación total por causas generales (≥ 15 años) en caso de reducir los niveles de contaminación a los límites permisibles de la NOM-025-SSA1-2014. Por otro lado, en el caso de O_3 la causa de muerte específica que más aporta a la mortalidad en personas de 30 años o más en la Ciudad de México es la EPOC con 86 muertes prematuras atribuibles, seguida de la neumonía e influenza con 79 (escenario de cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2014); en comparación, el estudio arroja un total de 191 muertes por causas generales para el mismo grupo de edad en la Ciudad de México.

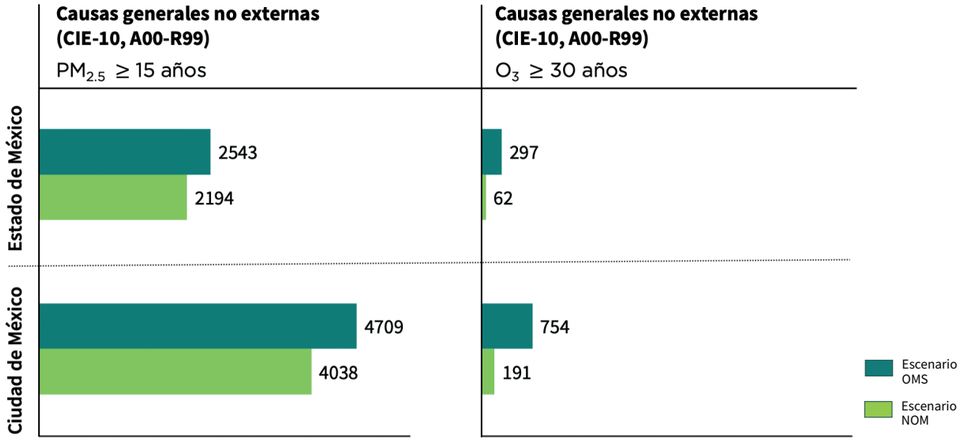


Figura 6.11 Muertes prematuras evitables en la ZMVM (año 2014) a consecuencia de la reducción de $PM_{2.5}$ y O_3 bajo dos escenarios de gestión de la calidad del aire
Fuente: *INSP & INECC (2017).*

Si bien en la EIS también se analiza la mortalidad general por PM_{10} en personas de 30 años o más, estos resultados no se pueden sumar a las muertes totales por $PM_{2.5}$, dado que esta última fracción de partículas forma parte de la primera, lo que podría resultar en un doble conteo de muertes. Sin embargo, para PM_{10} se destaca la cuantificación de la mortalidad en infantes <1 año por causas generales y respiratorias, arrojando como resultado un total de 19 muertes prematuras evitables por causas no externas (A00-R99) en 2014 para la Ciudad de México, si se hubiera cumplido con el límite de la NOM de 40 µg/m³ para el promedio anual; este valor asciende a 85 muertes evitables bajo un escenario de gestión donde se alcanza el valor guía de la OMS (20 µg/m³). Para el Estado de México, en 2014 se hubieran evitado 21 muertes prematuras bajo el escenario de gestión de la NOM, y 90 para el escenario OMS; esta estimación no es exclusiva de los municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM, sino que incluye también a municipios de la porción occidental de la entidad, fuera de la zona de estudio (como aquellos pertenecientes a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, que también presentan altos niveles de partículas PM_{10}).

14 El estudio también reporta muertes prematuras evitables por causa de enfermedad para el Estado de México. Sin embargo, estos resultados no se presentan dado que no se encuentran desagregados por municipio o zona metropolitana, por lo que, además de los impactos en los municipios conurbados de la ZMVM, incluyen incidencias en municipios como Toluca o Metepec, entre otros. En este sentido, se considera que los resultados para la Ciudad de México son más representativos del aporte que tienen las diferentes causas de enfermedad en la mortalidad dentro de la zona de estudio (ZMVM).

Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las $PM_{2.5}$ en tres zonas metropolitanas mexicanas (INECC, 2014)

En esta evaluación se determinaron las muertes prematuras evitables si se cumplieran los límites marcados en la NOM de salud ambiental y en las GCA de la OMS para $PM_{2.5}$ en tres zonas metropolitanas: la ZMVM, Guadalajara y Monterrey. Los impactos en la salud evaluados son los asociados con muertes prematuras por enfermedades cardiovasculares (I10-I99), cáncer de pulmón (C33-C34) y EPOC (J40-J44, J47), en personas adultas de 30 años o más. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ para cada zona metropolitana se obtuvieron de los datos generados por sus respectivos sistemas de monitoreo atmosférico, utilizando una combinación de los registros de $PM_{2.5}$ y de PM_{10}. Las estimaciones de los impactos a la salud se realizaron para el 2010, por ser el año con información de población más desagregada (a nivel AGEB), proveniente del Censo de Población y Vivienda respectivo.

El estudio considera tres escenarios: el primero contempla las condiciones reales (escenario base) de la concentración de $PM_{2.5}$, los otros dos son escenarios hipotéticos de reducción de los niveles de contaminación. El primer caso hipotético toma como referencia el límite de la NOM-025-SSA1-1993 de 15 µg/m³ para el promedio anual (escenario NOM) y el segundo considera la GCA de la OMS de 10 µg/m³ (escenario OMS). Similar a las valoraciones anteriores, las FCR utilizadas provinieron de los estudios de cohorte de la Sociedad Americana contra el Cáncer y del estudio de seis ciudades de Harvard (*Six Cities Study*).

Los resultados de la valoración indican que, para la ZMVM, las estimaciones de casos de mortalidad prematura evitable en personas adultas mayores de 30 años son de 753 en el escenario NOM y de 1421 en el escenario OMS. En términos de la distribución espacial de las muertes prematuras evitables, las demarcaciones en las que se podrían evitar más de 100 incidencias son las alcaldías de Tlalpan, Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Álvaro Obregón, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Coyoacán e Iztapalapa; y los municipios mexiquenses de Tlalnepantla de Baz, Nezahualcóyotl y Ecatepec de Morelos. La ZMVM obtuvo el mayor número de muertes evitables para los dos escenarios, seguida de Guadalajara y después por Monterrey (ver Figura 6.11). Por último, el estudio indica que el mayor número de muertes prematuras evitables se asocia con enfermedades cardiovasculares, seguidas de EPOC y cáncer de pulmón.

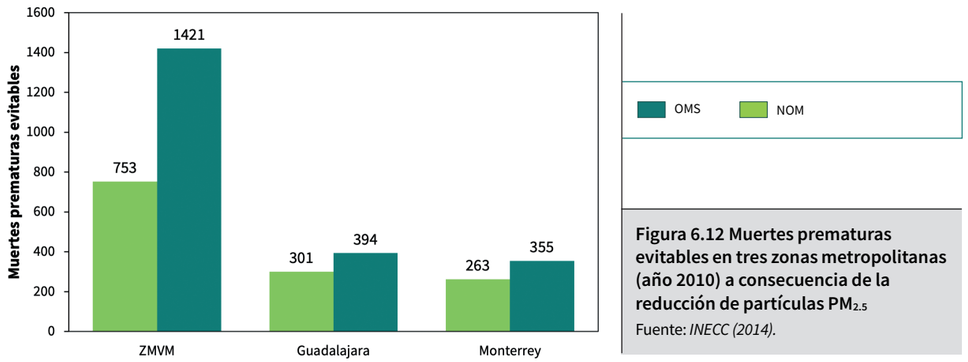


Figura 6.12 Muertes prematuras evitables en tres zonas metropolitanas (año 2010) a consecuencia de la reducción de partículas $PM_{2.5}$
Fuente: *INECC (2014).*

Cuantificación de los impactos en salud y los costos económicos de la exposición a $PM_{2.5}$ en ciudades mexicanas pertenecientes al Sistema Urbano Nacional (Trejo-González *et al.*, 2019)

En un estudio de Trejo-González *et al*. (2019) se estimó la mortalidad evitable, los años potenciales de vida perdidos y los costos económicos asociados con la exposición a partículas $PM_{2.5}$ durante 2 años (2013 y 2015) en México, utilizando dos escenarios de reducción de concentraciones: 1) promedio anual <12 µg/m³ (límite NOM-025-SSA1-2014) y 2) promedio anual <10 µg/m³ (GCA de la OMS). En particular, en este estudio se evaluaron cinco áreas metropolitanas, incluida la ZMVM. Se destaca que la cobertura del SIMAT limita la cuantificación de impactos; solo se contemplaron 61 y 50 demarcaciones del total de 76 para los años 2013 y 2015, respectivamente. Las causas de mortalidad evaluadas fueron causas generales no externas, enfermedades cardiovasculares, enfermedad isquémica del corazón, cáncer de pulmón y enfermedades cardiopulmonares en personas mayores a 15 años. Para la estimación se siguió el método general descrito anteriormente para una EIS y se utilizaron FCR para impactos por exposición crónica de Hoek *et al*. (2013), Lepeule *et al*. (2012) y Pope *et al*. (2002, 2004).

Los resultados muestran que si los niveles de $PM_{2.5}$ alcanzaran los límites de la NOM de salud ambiental, se evitarían 6864 y 6687 muertes para los años 2013 y 2015, respectivamente; esto representa el 7.3% y el 6.9% de las muertes totales para el respectivo grupo de edad analizado. Con los estándares más estrictos de la OMS, los beneficios aumentarían, evitando 7869 (+14.6%) y 7729 (+15.6%) muertes prematuras para los mismos años. La Tabla 6.9 muestra los resultados de las muertes prematuras evitables estimadas para la ZMVM, desagregados por causa de enfermedad y grupo de edad. En cuanto a los años potenciales de vida perdidos como consecuencia de los niveles de $PM_{2.5}$, los resultados por causas generales corresponden a 80 809 y 77 998 años perdidos en 2013 y 2015, respectivamente. Asimismo, se estimó la mortalidad evitable si se alcanzara un escenario contrafactual más estricto (<7.5 µg/m³), ya que existe evidencia de impactos a la salud por debajo de las GCA de la OMS. En este caso, las muertes evitables ascenderían a 9964 y 10 141 para los años 2013 y 2015, respectivamente.

Tabla 6.9 Muertes prematuras evitadas por la reducción de partículas $PM_{2.5}$ en la ZMVM en 2013 y 2015

Causa de mortalidad (CIE-10)	Grupo de edad analizado	2013		2015	
		NOM	OMS	NOM	OMS
		$PM_{2.5}$ < 12 µg/m³	$PM_{2.5}$ < 10 µg/m³	$PM_{2.5}$ < 12 µg/m³	$PM_{2.5}$ < 10 µg/m³
Todas las causas generales no externas (A00–R99)	**≥ 15 años**	6864	7869	6687	7729
Enfermedades cardiopulmonares (I10–I70; J00–J98)	**≥ 30 años**	3689	4222	3668	4240
Enfermedades cardiovasculares (I00–I99)	**≥ 15 años**	4499	5118	4560	5234
Enfermedad isquémica del corazón (I20–I25)	**≥ 30 años**	2912	3311	2969	3408
Cáncer de pulmón (C33–C34)	**25 – 74 años**	224	252	231	259

Nota: No es válido sumar las muertes por causas que se traslapan entre ellas, ya que esto implica un doble conteo de incidencias. Asimismo, la incertidumbre de las FCR y los grupos de edad evaluados deben considerarse al comparar muertes por causas específicas con aquellas por causas más generales.

Fuente: *Trejo-González et al. (2019).*



Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México y estimación de beneficios por mejoras en la calidad del aire (INSP & SEDEMA, 2020)

Este análisis fue realizado por la SEDEMA en colaboración con el INSP, quienes contaron con el apoyo de la US EPA y Ciudades C40. Su objetivo fue estimar la mortalidad atribuible a las concentraciones de O_3 y $PM_{2.5}$ en la ZMVM considerando cuatro escenarios:

1	Cumplir con los límites permisibles establecidos en las NOM de salud ambiental[15].
2	Alcanzar concentraciones equivalentes a los niveles marcados por las GCA de la OMS[16].
3	Reducir en un 10% los niveles actuales de contaminación.
4	Un escenario con mejor calidad del aire[17] y límites más estrictos. Este escenario representa un estado mucho más limpio del aire y los umbrales utilizados corresponden a concentraciones reportadas en otras EIS y que son muy bajas en comparación con los niveles promedio de contaminación en la ZMVM. Su uso es meramente comparativo y tiene el fin de mostrar los impactos que ocurren por la mala calidad del aire aun en concentraciones por debajo de los estándares actuales. Su inclusión no implica que estas concentraciones puedan alcanzarse en la ZMVM.

15 La NOM-020-SSA1-2014 no define una métrica de exposición a largo plazo. Se utilizó el valor para exposición a corto plazo (valor horario) para establecer el escenario de la NOM.

16 En las GCA de la OMS tampoco se define una métrica para exposición crónica ni un valor para concentración horaria de O_3. Por lo tanto, se definió un valor aplicando una proporción similar entre NOM y OMS considerando los valores de la métrica de 8 horas.

17 El valor utilizado para evaluar el escenario de mejor calidad del aire para $PM_{2.5}$ fue de 2.4 µg/m³, que fue la concentración más baja observada en uno de los 41 estudios de cohorte empleados para modelar la función GEMM. Para ozono, el umbral fue de 38 ppb, valor medio del rango utilizado por el estudio de la carga global de la enfermedad (Institute for Health Metrics and Evaluation, 2018a) y por el estudio de Harvard-SEDEMA (Harvard T.H. Chan School of Public Health & SEDEMA, 2018).

La evaluación se realizó para el promedio de los años 2016-2018[18] con base en información generada por el SIMAT de la Ciudad de México, datos de población a nivel de AGEB estimados a partir del Censo de Población y Vivienda 2010 de INEGI y las proyecciones de población de CONAPO 2015-2030, así como estadísticas de defunciones generales proporcionadas por el INEGI. El software utilizado para realizar la EIS fue BenMAP-CE.

Los impactos a la salud seleccionados fueron aquellos relacionados con mortalidad por la exposición crónica a los contaminantes analizados[19].

- Para $PM_{2.5}$ muertes por causas no accidentales (que considera enfermedades crónico-degenerativas e infecciones de vías respiratorias bajas), enfermedad isquémica del corazón, enfermedad cerebrovascular, EPOC y cáncer de pulmón, todas para el grupo de edad de 25 años o más.
- Para O_3 muertes por EPOC para el grupo de edad de 30 años o más.

Se utilizaron FCR derivadas de meta-análisis y de estudios de cohorte en la literatura internacional. En específico, para $PM_{2.5}$ se utilizó la función GEMM descrita anteriormente y construida por Burnett *et al*. (2018) y para O_3 se empleó el estudio de Jerrett *et al*. (2009) de la cohorte de la Sociedad Americana contra el Cáncer.

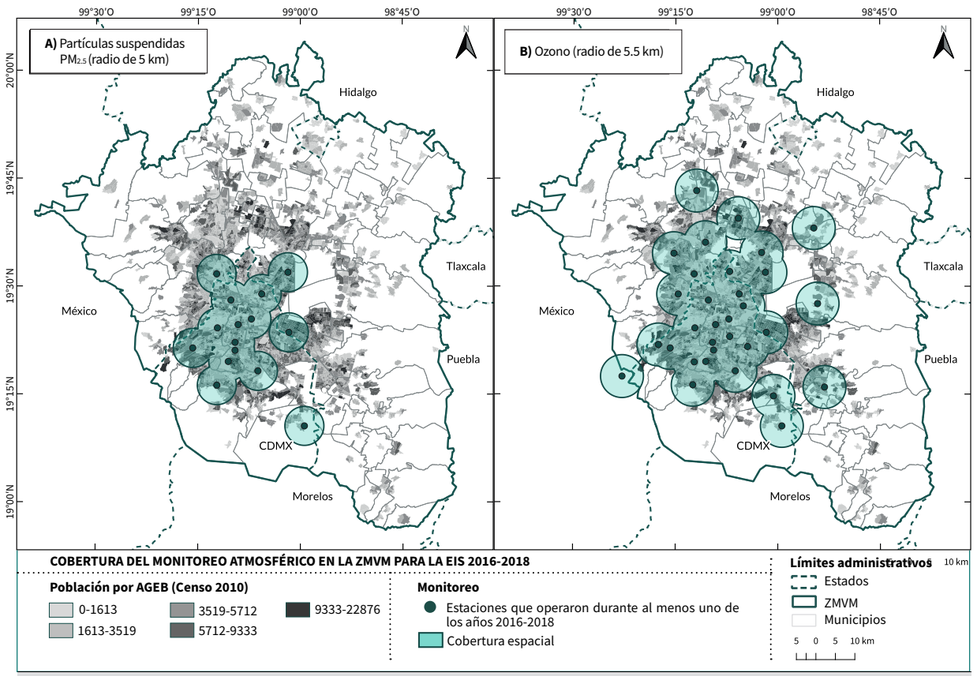


Figura 6.13 Cobertura de las estaciones de monitoreo que operaron durante al menos uno de los años de 2016 a 2018
Fuente: *INSP & SEDEMA (2020).*

18 Se calculó el promedio de los tres años para cada insumo de datos (calidad del aire, población, mortalidad) y a partir del promedio se realizó la EIS. Esto, de acuerdo con la comunicación personal vía correo electrónico con el Dr. Pierpaolo Mudu, Oficial técnico del Centro Europeo para el Medio Ambiente y la Salud de la Oficina Regional para Europa de la OMS (09/12/2019) y el documento sobre mortalidad (AirQ+: Mortality data) que viene adjunto a la descarga del software AirQ+ de la OMS (OMS, 2018b).

19 Los códigos de enfermedad utilizados fueron los que emplea el estudio de la Carga Global de la Enfermedad (Institute for Health Metrics and Evaluation, 2018b).

Para $PM_{2.5}$, la EIS cubrió al 43% del total de la población de la ZMVM (73% de la Ciudad de México y 22% de los municipios conurbados del Estado de México) y para O_3, al 72% (90% de la Ciudad de México y 61% los municipios conurbados del Estado de México). Esto se debe a que solo se consideraron las AGEB con información válida de calidad del aire; esto es, una estación de monitoreo a menos de 5 km para $PM_{2.5}$ y a menos de 5.5 km para O_3[20], y con suficiencia de información (≥75%) para generar los indicadores del promedio anual de $PM_{2.5}$ y el promedio estacional (febrero a julio) de los máximos diarios de 1 hora para O_3 (ver Figura 6.13).

A continuación se resumen los resultados de mortalidad prematura para causas generales por exposición a $PM_{2.5}$, y para EPOC en el caso de exposición a O_3. Las muertes prematuras anuales atribuibles a la contaminación del aire al evaluar el escenario de mejor calidad del aire fueron 8983 (IC 95%: 6267 a 11 424), de las cuales 93% se debieron a exposición a $PM_{2.5}$. Asimismo, 74% de las muertes prematuras estimadas se registraron para la Ciudad de México, debido a la mayor cobertura del SIMAT en comparación con el Estado de México. Se registraron tasas de 142 y 128 muertes prematuras por cada 100 000 habitantes, para la Ciudad de México y el Estado de México, respectivamente, valores de magnitud similar y que se estimaron con base en la población del grupo de edad correspondiente para la evaluación de impactos por O_3 y $PM_{2.5}$.

Como se mencionó anteriormente, también se evaluaron otros escenarios de mejora de la calidad del aire. De alcanzarse las GCA de la OMS (10 µg/m³ de $PM_{2.5}$ como promedio anual y 75 ppb como promedio de los máximos de 1 hora durante la temporada de O_3), se evitarían 4357 muertes prematuras (IC 95%: 3064 a 5567). De cumplir con los límites de las NOM de salud ambiental (12 µg/m³ de $PM_{2.5}$ como promedio anual y 95 ppb de O_3 como promedio horario), en la ZMVM se hubieran evitado 3539 muertes prematuras (IC 95%: 2530 a 4487). Por último, si se lograra un 10% de reducción en los niveles de $PM_{2.5}$ y O_3, se podrían evitar 814 muertes prematuras (IC 95%, 525 a 1091). Es importante hacer énfasis en que, en el caso de $PM_{2.5}$, esta evaluación únicamente considera al 43% de la población total de la ZMVM, y al 72% para la evaluación de impactos por O_3, por lo que los resultados están subestimados. La Figura 6.14 resume gráficamente estos resultados.

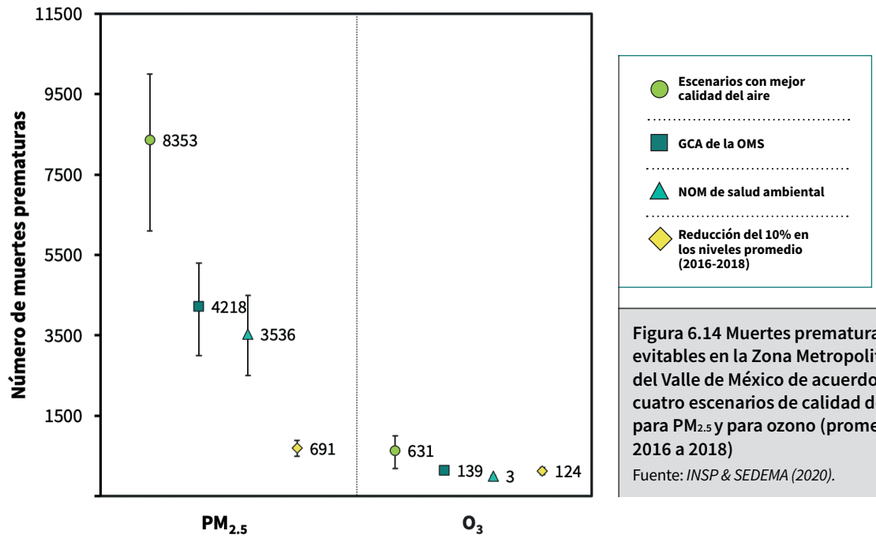


Figura 6.14 Muertes prematuras evitables en la Zona Metropolitana del Valle de México de acuerdo con cuatro escenarios de calidad del aire para $PM_{2.5}$ y para ozono (promedio de 2016 a 2018)
Fuente: *INSP & SEDEMA (2020).*

20 Estos valores corresponden a la mediana de la cobertura espacial de las estaciones para cada contaminante.

Cuando se analizan causas específicas de muerte por exposición a $PM_{2.5}$, se observa que la enfermedad isquémica del corazón es una de las causas principales de mortalidad. A este padecimiento se atribuyen 3476 muertes prematuras en la ZMVM, lo que equivale a 41.6% de la estimación total por causas generales al evaluar el escenario con mejor calidad del aire (ver Figura 6.15).

Los resultados del presente análisis son consistentes con estudios previos y para su estimación se utilizó la evidencia epidemiológica más reciente. Los resultados refuerzan la necesidad de ampliar la cobertura del monitoreo en la ZMVM, especialmente en los municipios conurbados del Estado de México, para así evitar la subestimación de los impactos en salud. Se destaca también que se incluye una evaluación para un escenario de mejor calidad del aire, estimando los impactos a la salud de la población que ocurren a concentraciones mucho más bajas que los niveles recomendados por la OMS.

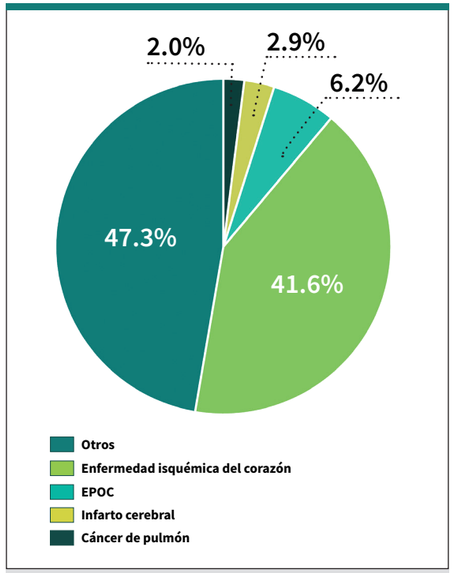


Figura 1.15 Porcentaje de muertes prematuras por causa específica para contaminación por $PM_{2.5}$ en la Zona Metropolitana del Valle de México
Fuente: *INSP & SEDEMA (2020).*

Resumen de resultados

Comparar los resultados de mortalidad evitable estimados por las diferentes EIS permite determinar los beneficios generales que se observarían en caso de alcanzar niveles específicos de calidad del aire y compararlos con la mortalidad relacionada con otras intervenciones o sectores (por ejemplo, muertes evitadas por desnutrición). Cuando se asigna un valor monetario a los impactos a través del VSL, es posible hacer una relación entre los costos y beneficios de diversas políticas que no cuentan con un dato comparativo común y que se desarrollan en distintos sectores pero que tienen como finalidad el bienestar social.

La variabilidad de los valores disponibles en la literatura para el VSL es uno de los principales factores detrás de la incertidumbre de los beneficios estimados por cualquier EIS y el subsecuente análisis costo-beneficio; esto se deriva del método de valuación elegido (preferencias reveladas o declaradas), la ubicación del estudio y la metodología utilizada para transferir el VSL al contexto local, y el año de evaluación (Kochi *et al*., 2006). Con la finalidad de reducir la incertidumbre, se realizó una revisión de evaluaciones recientes que estiman VSL, y así determinar el valor más apropiado para la ZMVM; para considerar la incertidumbre existente en la determinación del VSL, se decidió utilizar dos valores: uno primario (VSL1) igual a 2.166 millones de dólares, y uno secundario (VSL2) igual a 0.416 millones de dólares (USD a precios de 2018). El VSL1 permite generar un rango alto de beneficios económicos, en tanto que el VSL2 proporciona una estimación para un escenario con beneficios más bajos.

De manera general, alcanzar los límites permisibles de las NOM de salud ambiental permite evitar más de 6500 muertes anuales en la ZMVM, de las cuales la mayoría se asocia a la contaminación por $PM_{2.5}$. Es así que, desde el punto de vista de salud pública, resulta más importante reducir la concentración de partículas $PM_{2.5}$ que la de O_3, al ser el primero un contaminante con impactos más nocivos sobre la salud. Las cifras de mortalidad evitable son equiparables con el número de defunciones por homicidio ocurridas durante 2018 en toda la ZMVM, que suman poco más de 3800. Si se compara con la mortalidad natural de toda la zona de estudio en 2018, que fue de 116 447 defunciones, se estima que la mortalidad por contaminación del aire contribuye con al menos el 5.6% de las muertes totales. Bajo un escenario de cumplimiento de las GCA de la OMS, los beneficios podrían ascender a casi 8000 muertes prematuras evitables (más del 6.9% de la mortalidad total en la zona de estudio). Si se acotaran los datos de mortalidad a la cobertura geográfica de las EIS y los grupos de edad analizados, la contribución porcentual sería aún mayor.

La Tabla 6.10 resume los beneficios económicos de reducir la concentración de contaminantes en el aire ambiente en la ZMVM. Si bien estos resultados corresponden a evaluaciones para años particulares, considerando que la calidad del aire por $PM_{2.5}$ y O_3 no ha mostrado una tendencia a la baja en los últimos años, y que la población de la ZMVM aumenta año con año, se puede asumir que los beneficios de mejorar la calidad del aire a futuro tendrían una magnitud equiparable.

Bajo un escenario de cumplimiento de las NOM de salud ambiental, el beneficio económico total puede ascender a más de 14 mil millones de dólares (USD de 2018), considerando el VSL primario. Si se utiliza el VSL secundario, los beneficios monetizados oscilan alrededor de los 2700 millones de dólares. Considerando una paridad de poder de compra del tipo de cambio del Banco Mundial de 9.13 MXN/USD en 2018[21], los beneficios económicos serían equivalentes a más de 130 mil millones de pesos (M.N. a precios de 2018) con el VSL1, lo que representa 2.55% del PIB de la ZMVM en 2018 (para más información consultar la sección 1.4 del Capítulo 1).

Bajo un escenario de gestión en donde se alcanzan las GCA de la OMS, los beneficios económicos son mayores, entre 3.2 mil y 18 mil millones de dólares (entre 30 y 160 mil millones pesos, M.N. a precios de 2018), dependiendo del VSL seleccionado. Estas cifras representan un beneficio general y se interpretan como la cantidad monetaria que la sociedad estaría dispuesta a pagar para reducir la probabilidad de morir. El resultado no es transferible directamente a un costo financiero, pero sí incluye las principales externalidades asociadas a la contaminación del aire.

No obstante, es importante señalar algunas de las limitaciones de las EIS:

- La cuantificación de impactos en la mortalidad está restringida solo a algunas causas y grupos de edad con información epidemiológica confiable.
- La EIS requiere de información de calidad de aire, por lo que, dependiendo del contaminante analizado, la cobertura de los datos del SIMAT es limitada y algunos municipios y/o habitantes quedan excluidos de la evaluación. Es así que la cobertura para toda la ZMVM es parcial, en especial para municipios en las periferias que, como se expuso anteriormente, presentan varios factores que incrementan la vulnerabilidad de su población.
- Las FCR y el método de asignación de exposición a contaminantes son dos factores de incertidumbre dentro de la EIS. Contar con FCR confiables y estadísticamente significativas, así como datos actualizados en bases de información epidemiológica, es esencial para cuantificar de manera precisa los impactos a la salud. Al momento solo se utilizan FCR determinadas en otros países; contar con datos a nivel local podría aumentar la precisión de las estimaciones.

21 Factor de conversión de Paridad del Poder Adquisitivo del Banco Mundial. Disponible en: https://datos.bancomundial.org/indicador/PA.NUS.PPP?locations=MX

Tabla 6.10 Resumen de impactos totales y beneficios económicos por escenario de gestión de la calidad del aire

Supuestos de evaluación				Supuestos de evaluación		Beneficios		
Estudio	Año	Contaminante	Cobertura geográfica	Causas de muerte	Escenario de gestión	Mortalidad evitable	Impacto económico (millones de USD de 2018) VSL1	VSL2
INSP & SEDEMA (2020)	Promedio 2016 - 2018	O_3	72% de la población de la ZMVM	Causas generales (A00-R99), ≥ 30 años	Promedio feb-jul (máx. diarios 1 h) <95 ppb	3	$6	$1
					Promedio feb-jul (máx. diarios 1 h) <75 ppb	139	$301	$58
					Promedio feb-jul (máx. diarios 1 h) <38 ppb	631	$1367	$263
					Promedio feb-jul (máx. diarios 1 h), 10% de reducción	124	$269	$52
	Promedio 2016 - 2018	$PM_{2.5}$	43% de la población de la ZMVM	Causas generales (A00-R99), ≥ 25 años	Promedio anual <12 µg/m³	3536	$7660	$1471
					Promedio anual <10 µg/m³	4218	$9137	$1755
					Promedio anual <2.4 µg/m³	8353	$18 095	$3476
					Promedio anual, 10% de reducción	691	$1497	$288
Trejo-González *et al.* (2019)	2013	$PM_{2.5}$	61 demarcaciones de la ZMVM	Causas generales (A00-R99), ≥ 15 años	Promedio anual <12 µg/m³	6864	$14 869	$2856
					Promedio anual <10 µg/m³	7869	$17 046	$3274
	2015	$PM_{2.5}$	50 demarcaciones de la ZMVM	Causas generales (A00-R99), ≥ 15 años	Promedio anual <12 µg/m³	6687	$14 486	$2782
					Promedio anual <10 µg/m³	7729	$16 743	$3216
INECC-INSP (2017)	2015	O_3	54 demarcaciones de la ZMVM	Causas generales (A00-R99), ≥ 30 años	Promedio anual (máx. diarios 8 h) <70 ppb	253	$548	$105
					Promedio anual (máx. diarios 8 h) <50 ppb	1051	$2277	$437
	2015	$PM_{2.5}$	34 demarcaciones de la ZMVM	Causas generales (A00-R99), ≥ 15 años	Promedio anual <12 µg/m³	6232	$13 500	$2593
					Promedio anual <10 µg/m³	7252	$15 710	$3018
INECC (2014)	2010	$PM_{2.5}$	AGEB urbanas de las 76 demarcaciones	Causas cardiovasculares (I10-I99), cáncer de pulmón (C33-C34) y EPOC (J40-J44, J47), ≥ 30 años	Promedio anual <15 µg/m³	753	$1631	$313
					Promedio anual <10 µg/m³	1421	$3078	$591

Fuente: *Elaboración propia.*

Bajo estos supuestos, la cuantificación de impactos en la mortalidad se debe considerar como un mínimo. Ampliar la evaluación a otras causas de enfermedad y grupos de edad, extender la cobertura geográfica del análisis, así como considerar de forma rutinaria escenarios más estrictos en los que se incluyan los impactos debido a la exposición a valores por debajo de las GCA de la OMS, probablemente daría como resultado un mayor número de muertes prematuras evitables. No obstante, también es importante reconocer que a mayores niveles de concentración, la relación de las FCR deja de aumentar proporcionalmente, por lo que los resultados podrían estar moderadamente sobreestimados (INSP & INECC, 2017). De los estudios abordados, solo la evaluación de la Escuela de Salud Pública T.H. Chan de la Universidad de Harvard y la evaluación de SEDEMA (2020) restringen las FCR.

6.4.3 Beneficios sociales derivados de mejoras en la calidad el aire

Como se analiza en el capítulo, es común asignarle un valor económico al impacto de la contaminación del aire en la salud de las personas y, aunque estas cifras son una guía para la estimación de beneficios y la toma de decisiones, no reflejan el costo total que el problema implica. Los costos sociales derivados de la mala calidad del aire se deben considerar tanto en el diagnóstico del problema como en el diseño de políticas públicas. Desde esta perspectiva, el beneficio económico que se debe cuantificar es la monetización del cambio en el bienestar social, debido a la reasignación de recursos para actividades de reducción de emisiones contaminantes. Si se asume que el bienestar social se puede medir utilizando una función aditiva de los servicios públicos individuales, entonces el costo social es igual a la suma de las variaciones compensatorias individuales (Hazilla & Kopp, 1990).

Un acercamiento hacia la forma de medir este costo social es a través de la voluntad que tendría la población para pagar por una buena calidad del aire. Una investigación de Chakraborti *et al*. (2019) evaluó si las personas que viven en la Ciudad de México valoran la calidad del aire. El estudio se realizó estableciendo precios hedónicos[22] a la vivienda, buscando un acercamiento que evidencie si estos reflejan la disposición de una persona promedio a pagar por la calidad del aire. Los precios hedónicos de la vivienda se midieron en función de sus características estructurales, el vecindario en el cual se encuentran (código postal) y sus características ambientales. Los resultados indican que el aumento de 1 µg/m^3 de PM_{10}, $PM_{2.5}$ y O_3 reduce el valor de la vivienda en un 0.6%, 2.6% y 0.6%, respectivamente. Finalmente, se estimó una disposición marginal a pagar por disminuir la contaminación por PM_{10} entre $2.61-4.96 USD/m^2, por $PM_{2.5}$ entre $9.14-13.92 USD/m^2 y por O_3 entre $0.87-7.04 USD/m^2 (precios de 2010).

Los resultados sugieren que, a pesar de la falta de conciencia en torno a la calidad del aire y sus impactos negativos en la salud, la población de la Ciudad de México monetiza e incorpora una comodidad como la calidad del aire dentro del valor del suelo. En comparación con las partículas suspendidas, la menor disposición a pagar por mejorar la calidad del aire por O_3 puede deberse a que tal vez la población de la Ciudad de México y su zona metropolitana percibe a este contaminante como un problema metropolitano que afecta de manera más frecuente a la totalidad de la zona de estudio, debido a las restricciones en el transporte, actividades recreativas y producción de bienes durante las contingencias atmosféricas (Chakraborti *et al*., 2019).

6.5 Estrategias y acciones institucionales en materia de calidad del aire y salud pública

La salud pública es una parte funcional y operativa perteneciente al sistema de salud, cuyas funciones incluyen acciones que deben de realizarse con fines concretos y necesarios para mejorar la salud de la población. En este sentido, el Estado es el actor central que tiene la capacidad para poner en marcha acciones específicas de movilización, promoción, orientación y articulación de agentes sociales para garantizar la salud pública.

Dentro de la ZMVM se cruza el actuar de diferentes dependencias del sector salud y medio ambiente en los tres órdenes de gobierno. A continuación se enlistan las acciones más relevantes que realizan diferentes dependencias dentro de la ZMVM y que permiten reducir la emisión de contaminantes y precursores, prevenir la exposición a niveles de contaminación que impliquen un riesgo a la salud, y evaluar los impactos perjudiciales a la salud que la mala calidad del aire tiene en la población.

- Servicios de salud y asistencia social de la Secretaría de Salud Federal.
- Servicios de salud y asistencia social de las respectivas Secretarías de Salud del Estado de México, Hidalgo y de la Ciudad de México.
- Operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México, cuya cobertura se extiende a la zona conurbada del Estado de México. Los resultados de las evaluaciones de la calidad del aire y el cumplimiento de la normatividad en materia de salud ambiental, así como la operación del SIMAT, se describen a detalle en el Capítulo 3.
- El Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PRRECAA). Este programa es instrumentado por la SEDEMA en la Ciudad de México y la SMAGEM en el Estado de México, en colaboración con el Gobierno Federal y la CAMe. La descripción del PRRECAA se aborda en el Capítulo 3.
- Programas para la gestión y manejo del fuego en la ZMVM. Se destaca el Protocolo de Atención de Incendios Forestales de la Ciudad de México, desarrollado por la SEDEMA; el Programa Especial para Incendios Forestales y la Estrategia de Manejo del Fuego 2015-2025 del Gobierno del Estado de México; y el Sistema de Alerta Temprana de Incendios de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Las actividades del Comité Científico Técnico de Vigilancia sobre Contaminación Atmosférica y sus diferentes grupos de trabajo, cuyo objetivo principal es evaluar el impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población de la Ciudad de México, para instrumentar estrategias y acciones en salud pública.
- Sistemas de vigilancia epidemiológica que operan en la zona de estudio. Se destaca el Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (SINAVE) y el Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Efectos a la Salud por Contaminación Atmosférica (SIVEESCA); este último es un sistema específico para la Ciudad de México.
- Herramientas de comunicación sobre el estado de la calidad del aire y los riesgos a la salud por parte e la SEDEMA y la Dirección de Promoción de la Salud de la SEDESA. Se destaca la difusión y comunicación del Índice Aire y Salud, cuyos aspectos técnicos se describen en el Capítulo 3, y el Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS), por parte de la SEDEMA. Las acciones encaminadas a la difusión de información, la comunicación social y la participación ciudadana se abordan en el Capítulo 8 del ProAire.
- El Plan Estratégico de Movilidad de la Ciudad de México, instrumentado por la SEMOVI, y programas de movilidad gubernamental, empresarial y escolar.
- Programas educativos de los Servicios de Salud Pública de la Ciudad de México, en específico el Programa de Salud Escolar, para la promoción de buenas prácticas de salud en escuelas de la ciudad.

Muchas de estas acciones se abordan en otras secciones del presente ProAire; el Anexo 6.2 detalla cómo cada una de ellas se relaciona con la protección a la salud de la población.

22 Los modelos de precios hedónicos son evaluaciones indirectas que permiten asignar un valor a bienes que no están presentes explícitamente en el mercado, como lo es la calidad del aire.

07

Estrategias, medidas y acciones de gestión de calidad del aire y reducción de emisiones

El ProAire ZMVM 2021-2030 cuenta con 19 medidas enfocadas en la reducción de emisiones contaminantes en la atmósfera para mejorar la calidad del aire que se respira y proteger la salud.

07



La evaluación de salud del presente capítulo, contó con la participación del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), del Grupo de Liderazgo Climático C40, y de las Oficinas de Planeación y Estándares de Calidad del Aire y de Investigación y Desarrollo de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA).

El **Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030 (ProAire ZMVM 2021-2030)** es un instrumento que establece metas, medidas y acciones con el propósito de reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera, mejorar la calidad del aire que respiran los habitantes de la región y proteger su salud.

Los capítulos anteriores fungen como un diagnóstico donde se describen las características físicas, socioeconómicas y urbanas de la ZMVM, que influyen sobre la emisión de contaminantes; el fundamento jurídico y el marco normativo que sustentan el desarrollo e implementación del ProAire; y la situación actual de la calidad del aire, a través de un análisis de los resultados del monitoreo atmosférico, la magnitud de las emisiones contaminantes por fuente y los impactos a la salud asociados al estado de la contaminación atmosférica. Este diagnóstico, sumado a procesos participativos con distintas instituciones gubernamentales, el sector privado, la sociedad civil organizada, la academia y otros actores con experiencia relevante, hizo posible la

identificación de prioridades y propuestas clave para integrar el Programa.

Este capítulo presenta los objetivos y metas del ProAire ZMVM 2021-2030, define la estrategia general que se siguió para evaluar las características institucionales, legales, técnicas y presupuestales requeridas para su ejecución, y describe las medidas y acciones concretas en materia de calidad del aire, que la Ciudad de México, el Estado de México, el Estado de Hidalgo y el Gobierno Federal deberán implementar durante el periodo 2021-2030. También se expone el razonamiento detrás de la selección y priorización de las medidas elegidas, en función de su alcance, la fuente de emisión que atacan, los impactos y beneficios esperados, así como la factibilidad y la magnitud de los recursos requeridos para su implementación. De esta forma, se garantiza que las propuestas responden a la problemática actual y al contexto local.

En total, se cuenta con una cartera de **19 medidas,** enfocadas en la reducción de emisiones de sectores contaminantes prioritarios o en un área transversal que fortalece la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos y participación ciudadana, los arreglos institucionales, de seguimiento y coordinación metropolitana, el monitoreo atmosférico y la investigación científica. Estas medidas se subdividen en **40 acciones,** compuestas a su vez por **126 actividades** que detallan las políticas públicas, programas e intervenciones concretas que rigen su ejecución. Se destaca que cada acción cuenta con una **ficha descriptiva** que especifica sus características; estas fichas fueron elaboradas según los lineamientos de la **Metodología del Marco Lógico** de la Comisión Económica de América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas (Ortegón *et al*., 2005) para facilitar el desarrollo de indicadores, el seguimiento y la evaluación a futuro.

7.1 Objetivos y metas del ProAire

7.1.1 Objetivo general

El objetivo general del ProAire ZMVM 2021-2030 es mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México y proteger la salud de la población, a través de la ejecución de las medidas y acciones propuestas.

El Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México (PGD) tiene como una de sus metas que la "*ciudad disfrute de una buena calidad del aire durante al menos dos terceras partes del año*" al año 2040 (Gobierno de la Ciudad de México, 2020), bajo los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por su parte, una de las estrategias del Plan de Desarrollo del Estado de México 2017-2023 es "*contribuir a la mejora de la calidad del aire*" (Gobierno del Estado de México, 2018), en tanto que el Plan Estatal de Desarrollo de Hidalgo 2016-2022 tiene como uno de sus objetivos estratégicos la "*mejora en la calidad del aire*" (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2020).

Una primera aproximación del esfuerzo necesario para mejorar la calidad del aire en la ZMVM se puede determinar a través de un modelo proporcional simple[1]. Este modelo estima la reducción de emisiones necesaria para alcanzar la meta de calidad del aire propuesta, esto es, una buena calidad del aire durante al menos dos terceras partes del año para cada contaminante criterio. Si se toman en cuenta los contaminantes prioritarios para la ZMVM, el ozono (O_3) y las partículas $PM_{2.5}$, el análisis muestra que:

- Para alcanzar la Guía de Calidad del Aire (GCA) de la OMS para el promedio de 24 horas de $PM_{2.5}$ (25 µg/m³), se requiere una reducción del 31% en las emisiones totales.
- Para alcanzar la GCA de la OMS para el promedio móvil de 8 horas de O_3 (51 ppb), se requiere una reducción aproximada del 71% en todas las fuentes que emiten precursores de este contaminante, esto es óxidos de nitrógeno (NO_X) y compuestos orgánicos volátiles (COV).
- Para el caso de la métrica de O_3 de 1 hora, se requiere una reducción aproximada del 50% de todas las fuentes que emiten precursores del O_3 para alcanzar el valor guía de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), igual a 90 ppb.

7.1.2 Objetivos específicos y metas de reducción de emisiones

Los objetivos específicos del ProAire ZMVM 2021-2030 corresponden a las metas cuantitativas y cualitativas que resultarán de la ejecución de las medidas y acciones propuestas. Estos objetivos, que se resumen en la Tabla 7.1, sientan las bases para dar seguimiento y evaluar el avance en la implementación del Programa.

Tabla 7.1 Objetivos específicos y metas del ProAire ZMVM 2021-2030

Objetivo específico	Descripción de la meta
1. Reducir las emisiones de fuentes y categorías contaminantes prioritarias	Mitigar las emisiones de partículas suspendidas y precursores de O_3, al ser estos los contaminantes que afectan principalmente la calidad del aire en la ZMVM. Las metas de reducción de emisiones, respecto de un escenario tendencial en 2030, son: • Más del 20% de reducción de PM_{10} • Más del 35% de reducción de $PM_{2.5}$ • Más del 20% de reducción en COV • Más del 35% de reducción en NO_X Se espera un cobeneficio en cambio climático por la aplicación de las medidas del 10% de GEI. Las **medidas 1 a 14** se enfocan en la reducción de emisiones en fuentes prioritarias dentro de la ZMVM. **La medida 18** atiende una fuente externa a la ZMVM, el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, cuyas emisiones tienen un impacto significativo en la contaminación por dióxido de azufre (SO_2) en la ZMVM. Es importante considerar que estas reducciones refieren a un escenario condicionado a la implementación en tiempo y forma de las medidas propuestas.
2. Reducir las concentraciones de partículas y ozono	Reducir los valores máximos de las concentraciones de ozono al año 2030 y reducir la concentración promedio de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$.
3. Mejorar los procesos de comunicación de riesgos y proteger la salud de la población	Integrar una Estrategia Integral de Comunicación e implementar acciones dirigidas a proteger la salud de la población, a través de cambios en la regulación ambiental, programas de contingencias ambientales y la gestión de información en salud y calidad del aire. Este objetivo específico es atendido por la **medida 15.**
4. Fortalecer mecanismos de seguimiento institucional, financiamiento y coordinación metropolitana	Facilitar la implementación del ProAire, a través de mecanismos y sistemas para la evaluación, reporte y seguimiento institucional; el financiamiento de las distintas medidas; y la coordinación metropolitana. Este objetivo específico es atendido por la **medida 16.**

1 Esta aproximación fue elaborada por la SEDEMA de la Ciudad de México.

Tabla 7.1 Objetivos específicos y metas del ProAire ZMVM 2021-2030 *(continuación)*

Objetivo específico	Descripción de la meta
5. Ampliar el monitoreo ambiental de la calidad del aire	Mejorar el monitoreo de calidad del aire de contaminantes normados y precursores en la ZMVM. Este objetivo específico es atendido por la **medida 17.**
6. Fomentar la investigación científica para informar el desarrollo, implementación y evaluación del ProAire	Promover la colaboración científica entre el sector académico y dependencias gubernamentales, para elaborar estudios que apoyen el desarrollo, implementación y evaluación de políticas de gestión de la calidad del aire. Para esto, se integró una **Agenda de Investigación (medida AI)** que define temas prioritarios a investigar.
7. Promover la actualización de marcos normativos para la gestión de la calidad del aire	Actualizar normas y regulaciones que permitan controlar las emisiones de sectores prioritarios y mejorar la gestión de la calidad del aire. Dentro de las medidas, se plantean como acciones y actividades la creación y actualización de normas oficiales mexicanas (NOM) y normas estatales específicas para asegurar la participación de los entes regulados y alcanzar los objetivos del Programa. Asimismo, se identifican otras reformas legislativas y regulatorias que son necesarias para garantizar la implementación del ProAire, las cuales comprenden la **Agenda Regulatoria** y se incluyen dentro de las medidas respectivas.

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia.*

7.2 Contexto

Este ProAire corresponde a la actualización del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020, cuya evaluación y lecciones aprendidas fueron clave para el diseño de las medidas y acciones del presente Programa[2]. Una de las principales conclusiones de esta evaluación es la importancia de fortalecer el trabajo colaborativo entre el Gobierno Federal, los gobiernos de la Ciudad de México, el Estado de México y el Estado de Hidalgo, y los gobiernos locales de las alcaldías y municipios que conforman a la ZMVM, dado que cada nivel de gobierno tiene distintas responsabilidades y jurisdicción sobre fuentes contaminantes específicas, además de que resulta imprescindible la coordinación para la ejecución de políticas públicas de alto impacto. Es por esto que, para garantizar la congruencia con esfuerzos existentes, en el diseño del presente Programa, se consideraron las medidas planteadas en otros ProAire vigentes que cubren parcialmente el territorio de la ZMVM:

- El Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017-2030.
- El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México 2018-2030.
- El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo 2016-2024.

2 La evaluación y lecciones aprendidas del ProAire anterior se detallan en la sección 3.6 del Capítulo 3.

Por último, también se incorporaron insumos de otras iniciativas que inciden en la mejora de la calidad del aire, en específico:

- Las 14 medidas necesarias para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, definidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) en colaboración con los gobiernos de la Ciudad de México y el Estado de México en 2019.
- La Estrategia Local de Acción Climática (ELAC) 2021-2050 y el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México (PACCM) 2021-2030.

7.3 Estrategia para la definición de medidas del ProAire

Mejorar la calidad del aire requiere esfuerzos convergentes de todos los sectores (medio ambiente, energía, transporte, planeación urbana y vivienda, agricultura y ganadería, entre otros). Por esta razón, para la definición de medidas y acciones se siguió un proceso participativo[3] con agencias gubernamentales federales, estatales y municipales, la academia, organizaciones civiles y no gubernamentales, para definir un listado preliminar de más de 150 propuestas. A continuación, se realizó un ejercicio para identificar las iniciativas prioritarias a incluir en el ProAire ZMVM 2021-2030, a juicio de las partes expertas invitadas, quienes también apoyaron su elaboración.

Posteriormente, los resultados del ejercicio de priorización de medidas se cotejaron con los sectores prioritarios identificados en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018[4], para garantizar que atienden la mitigación de fuentes emisoras prioritarias. En específico, este análisis se centró en los contaminantes que exceden con mayor frecuencia los límites permisibles establecidos en las NOM de salud ambiental:

- El O_3, el cual se forma en la atmósfera a partir de sus precursores, los COV y los NO_X.
- Las PM_{10} y $PM_{2.5}$, siendo estas últimas el contaminante del aire que se asocia a la mayor carga de mortalidad y morbilidad.

Las propuestas de política pública se agruparon en medidas, de tal forma que cada una de estas está dirigida a un sector contaminante específico, esto es una fuente o grupo de fuentes prioritarias. Además, se incluyen medidas para mejorar la gestión de calidad del aire a través de procesos de comunicación de riesgos y protección a la salud, el fortalecimiento institucional, el monitoreo ambiental o la investigación. Cada medida, incluyendo la Agenda de Investigación, está compuesta por una o más acciones, que se dividen a su vez en actividades y subactividades con indicadores de seguimiento (ver esquema de la Figura 7.1). En el caso de la Agenda Regulatoria, sus acciones se incluyen y numeran conforme a la medida en la que se encuentran.

3 El proceso participativo referido se detalla en la sección 8.3.1 del Capítulo 8.

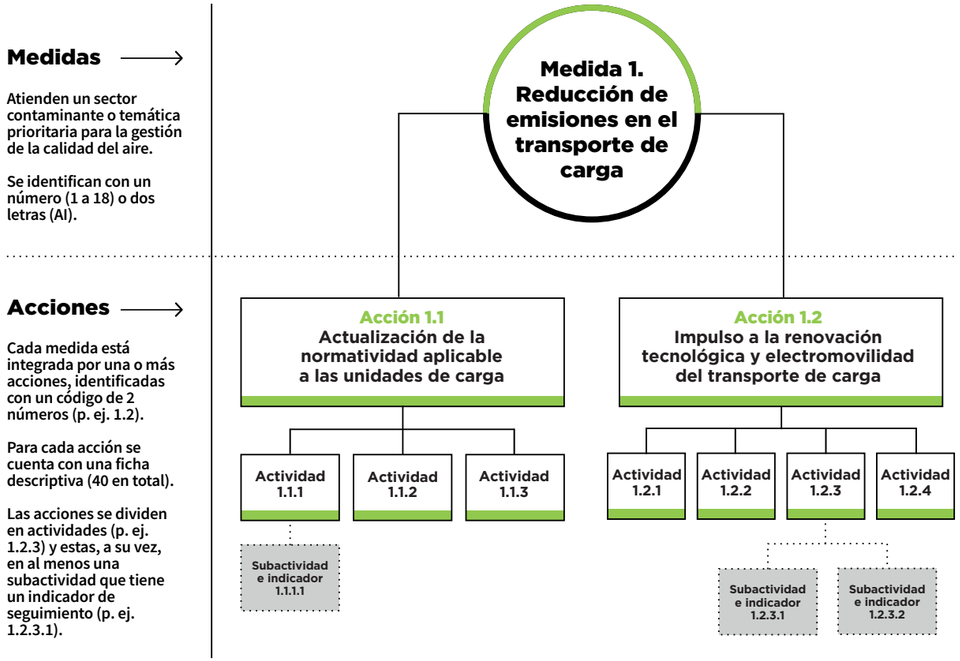


Figura 7.1 Estructura y organización de las medidas y acciones del ProAire ZMVM 2021-2030
Fuente: *Elaboración propia.*

Para cada acción se realizó un análisis de los factores institucionales, legales, técnicos y presupuestales requeridos para su ejecución. También se evaluaron los beneficios ambientales esperados de su implementación, esto es las reducciones en emisiones asociadas a su ejecución. Esto permitió determinar el costo-efectividad de las propuestas, así como la factibilidad de su implementación.

Cada una de las acciones fue detallada siguiendo los lineamientos de la Metodología del Marco Lógico (MML) de la CEPAL (Ortegón et al., 2005). La MML es una herramienta que facilita la conceptualización, diseño, ejecución y evaluación de programas de política pública. La aplicación de esta metodología tiene como producto principal una matriz que resume los objetivos de un proyecto, cómo se alcanzan estos objetivos, los supuestos clave, e información sobre cómo serán monitoreados y evaluados los resultados de su aplicación. Para integrar la matriz, se contemplan dos etapas puntuales:

A **Identificación del problema y alternativas de solución:** Se analiza la situación actual y se define una visión de la situación deseada, seleccionando las estrategias que se aplicarán para llegar al objetivo. En este sentido, las medidas del ProAire fueron diseñadas para resolver los problemas principales detectados en el diagnóstico, y responden al contexto y necesidades locales. El análisis contempló una evaluación de: 1) responsables e involucrados que necesitan participar en la gestión de la calidad del aire, 2) las problemáticas actuales (el diagnóstico), 3) objetivos (mejoras deseadas en la calidad del aire) y 4) las posibles medidas y acciones que podrían implementarse en respuesta a la situación a resolver.

B **Planificación:** Las medidas y acciones se traducen en un plan operativo. Para garantizar que las propuestas sean prácticas y ejecutables, se evaluaron en términos de su alcance, beneficios esperados, actores responsables e involucrados, fundamento jurídico, costos y opciones de financiamiento, recursos necesarios y posibles barreras de implementación. Cada acción se detalló a través de actividades y subactividades, indicadores de seguimiento y cronogramas para su ejecución. Como parte de esta etapa, se elaboraron las distintas fichas descriptivas de cada acción, que equivalen a la matriz de la MML.

7.4 Medidas y acciones

A continuación, se presentan las distintas medidas y acciones que conforman el ProAire ZMVM 2021-2030. Se proporcionan descripciones sobre el objetivo de cada medida, la justificación en relación con el diagnóstico del Programa y las fuentes emisoras atendidas, así como el listado de acciones contempladas y sus actividades específicas. Para consultar información más detallada de cada acción, se pueden revisar las fichas descriptivas del Anexo 7.1, las cuales se estructuran de la siguiente manera:

- **Descripción del objetivo** de la acción.
- **Diagnóstico** de la situación actual.
- **Actividades y subactividades que conforman la acción,** y sus respectivas metas e indicadores de seguimiento.
- **Entidades e instituciones responsables,** así como otros actores involucrados.
- **Marco normativo** (fundamento jurídico y reformas legislativas, regulatorias o normativas necesarias).
- **Factores económicos** (costo estimado y posibles fuentes de financiamiento).
- **Barreras de implementación** (presupuestales, económicas, sociales, políticas, institucionales, operativas, del sector involucrado o tecnológicas).
- **Beneficios ambientales esperados** en términos de las reducciones acumuladas en emisiones (a 2024 y a 2030), el costo-efectividad en la mitigación de contaminantes prioritarios y otros co-beneficios.
- **Especificaciones de los indicadores** de seguimiento y evaluación.
- **Cronograma de ejecución** en función de las sub-actividades e indicadores.

Medida 1.
Control de emisiones en el transporte de carga

Objetivo: Reducir las emisiones contaminantes provenientes del transporte de carga, a través de acciones regulatorias, la actualización de la normatividad aplicable, políticas que incentiven la renovación de la flota con unidades de alto desempeño ambiental y restricciones a la circulación de vehículos con alta generación de contaminantes.

Justificación: En la ZMVM circulan más de 307 mil unidades de carga ligera y pesada, tanto locales como foráneas. En conjunto, estos vehículos tienen un aporte significativo a las emisiones locales de partículas suspendidas, SO_2, NO_X y carbono negro, como se muestra en la Tabla 7.2. Las unidades de transporte de carga son en su mayoría a gasolina (72.2%) y diésel (24.7%). Se destaca que en unidades pesadas (tractocamiones y vehículos con peso bruto vehicular mayor a 3.8 toneladas), predominan las unidades a diésel, las cuales generan partículas finas identificadas como las más dañinas a la salud humana (Benbrahim-Tallaa *et al.*, 2012; California Air Resources Board, 2020).

El control de emisiones en el sector requiere, en primer lugar, una actualización de la base jurídica aplicable para regular las emisiones de la flota. Asimismo, es necesario instrumentar políticas y programas para acelerar la renovación del parque vehicular con unidades con sistemas eléctricos o híbridos y en caso de las unidades a diésel cuenten son sistema avanzado de control de emisiones (estándares nacionales 1B y 2B equivalentes a EPA 10 y EURO VI), además se debe fortalecer las actividades de vigilancia y seguimiento institucional respecto a las condiciones operativas y ambientales de las unidades, sobre todo de aquellas que, por su antigüedad y/o falta de mantenimiento, generan una alta tasa de emisión de contaminantes.

Tabla 7.2 Emisiones contaminantes del transporte de carga

Fuente contaminante	Emisiones en 2018 (t/año) PM_{10}		$PM_{2.5}$		SO_2		NO_X		Carbono negro	
Total, ZMVM	**34 779.5**	**100.0%**	**16 500.1**	**100.0%**	**3068.1**	**100.0%**	**144 597.8**	**100.0%**	**2615.3**	**100.0%**
Total, fuentes móviles	**13 763.3**	**39.6%**	**7097.5**	**43.0%**	**1058.8**	**34.5%**	**124 114.6**	**85.8%**	**1526.0**	**58.4%**
Transporte de carga	4177.0	**12.0%**	3049.3	**18.5%**	289.5	**9.4%**	20 125.0	**13.9%**	514.4	**19.7%**
Vehículos de carga de hasta 3.8 toneladas	370.3	**1.1%**	189.9	**1.2%**	18.4	**0.6%**	4256.5	**2.9%**	64.9	**2.5%**
Vehículos de carga mayores de 3.8 toneladas	2246.9	**6.5%**	1600.9	**9.7%**	133.1	**4.3%**	11 675.5	**8.1%**	229.3	**8.8%**
Tractocamiones	1559.7	**4.5%**	1258.5	**7.6%**	138.1	**4.5%**	4193.0	**2.9%**	220.2	**8.4%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT, PROFEPA, CRE, SCT, INECC y Guardia Nacional), Ciudad de México (SEMOVI, SEDEMA y SSC) y Estado de México (SEMOV, SMAGEM y Secretaría de Seguridad)

Medida 9	Reducción de las emisiones asociadas a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica
Acción 9.1	Reducción de las emisiones de contaminantes asociadas a la generación de electricidad
Subsector	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica

Descripción

Reducir las emisiones de partículas finas, óxidos de nitrógeno y carbono negro asociadas a la generación de electricidad, a través de establecer una regulación de emisiones y de operación en los procesos y equipos que las generan. Se proponen acciones para acelerar la publicación de PROY-NOM168-SEMARNAT-ASEA-2016, con el cual se contará con monitoreo continuo de emisiones y se instalarán sistemas de control de emisiones para el cumplimiento de la norma, y para establecer un registro de plantas generadoras de energía eléctrica de emergencia (PGEEE) que permita desarrollar lineamientos para su operación y/o fabricación.

Diagnóstico

La generación de energía eléctrica es un sector relevante por la demanda de combustibles y las correspondientes emisiones que genera, así como un tema prioritario en cambios climáticos por la cantidad de gases y compuestos de efecto invernadero con los que contribuye a las emisiones nacionales y mundiales. Dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se localizan 19 empresas de este sector, importantes por su contribución de partículas finas, carbono negro y CO_2eq, lo que equivale al 5.6%, 13.5% y al 4.0%, respectivamente, del total emitido por todas las fuentes en la zona (ver la siguiente tabla).

Emisiones contaminantes generadas por el subsector, ZMVM-2018[3] (t/año)

Fuente contaminante	PM_{10}	$PM_{2.5}$	NO_X	Carbono negro	CO_2eq
Total, ZMVM	34 779.5	16 500.1	144 597.8	2615.3	75 165 596.7
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Total, fuentes puntuales	4184.2	3174.4	9659.2	534.2	14 239 552.0
	12.0%	19.2%	6.6%	20.4%	18.9%
Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	918.4	918.3	2841.9	352.6	3 019 602.6
	2.6%	5.6%	2.0%	13.5%	4.0%

En particular, se identifican cinco empresas que aportan más del 60% de las emisiones de contaminantes dentro del sector, una en la Ciudad de México y cuatro en el Estado de México, mismas que consumen en su totalidad gas natural para la generación de electricidad. Por otra parte, la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos ubicada en Tula en Hidalgo, que utiliza combustóleo, genera emisiones de SO_2 que pueden llegar hasta la ZMVM. Se ha determinado que las emisiones de esa zona han ocasionado incrementos extraordinarios en las mediciones matutinas durante la época fría e incluso hasta el mes de marzo[4].

Con la finalidad de reducir omisiones en este sector, es necesario el establecimiento de límites de emisión y monitoreo continuos. En este contexto, se identificó que existe un proyecto de norma que se emitió para consulta pública en el año 2016, la cual al año 2021 cuenta con un avance superior al 93%[5]. El PROY-NOM168-SEMARNAT-ASEA-2016, establece niveles máximos permisibles de emisión provenientes de turbinas de gas, a ciclo abierto o ciclo combinado, aeroderivadas y su medición, con potencia mayor a 0.5 MW. Los niveles de emisión se establecen en función de la capacidad de la turbina de gas, tipo de combustible y condiciones de referencia. Aquellas que tienen una capacidad nominal mayor a 50 MW, deben contar con un sistema de monitoreo continuo de emisiones (SMCE) para medir NO_X y SO_2. Las turbinas con capacidad de generación menor a 50 MW pueden determinar sus emisiones por medio del SMCE o a través de mediciones periódicas. La conformidad de la norma se realiza mediante la evaluación documental de la bitácora y de los resultados de los monitoreos de emisiones, así como la verificación de la calibración, operación y mantenimiento del SMCE e informes de resultados, además de la verificación documental en caso de que se utilicen combustibles no definidos en la norma. Se considera prominente que para la evaluación de la conformidad de los SMCE se establezca un repositorio de datos, con la finalidad de contar con la información en tiempo real y que la revisión documental se realice con información registrada previamente.

Por otra parte, es necesario destacar que los establecimientos industriales, comerciales y de servicios cuentan con plantas generadoras de energía eléctrica de emergencia (PGEEE) cuando existen fallas en el sistema eléctrico. Sin embargo, algunos de estos establecimientos, también las utilizan en horarios en donde la tarifa eléctrica es la más alta, con la finalidad de disminuir el costo de su consumo energético. De acuerdo con el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018, se contabilizaron 794 PGEEE, las cuales tuvieron un incremento del 11% comparado con el año 2015, aun cuando hubo una reducción de establecimientos industriales. Adicionalmente, se identificó que ninguno reporta contar con alguna tecnología o sistema para el control de emisiones. En este contexto, es necesario contar con un padrón de equipos, así como establecer las especificaciones mínimas de operación y mantenimiento, para determinar su impacto en las emisiones atmosféricas y en la salud, toda vez que en su mayoría operan con diésel. Así mismo, en un futuro se puede establecer una regulación a nivel nacional.

Es importante mencionar que, de acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica, las Centrales Eléctricas de cualquier capacidad que sean destinadas exclusivamente al uso propio en emergencias e interrupciones en el Suministro Eléctrico no requieren permiso. Por ello, actualmente las PGEEE no solicitan permiso de funcionamiento eléctrico y, por ende, no hay registro alguno de estos equipos que permita identificar tipos y capacidades.

Actividades

Número	Descripción	Indicador	Entidad	Meta 2024	Meta 2030	Costo (M.N.)
9.1.1	**Establecer el monitoreo continuo de las emisiones del sistema de generación eléctrica, para el cumplimiento de normas.**					
	9.1.1.1 Publicar la NOM-168-SEMARNAT-ASEA-2016, Niveles máximos permisibles de emisión provenientes de turbinas de gas, a ciclo abierto o ciclo combinado, aeroderivadas y su medición, para su entrada en vigor.	Norma publicada	FED (SEMARNAT/ ASEA/SENER)	1	1	$32,000
	9.1.1.2 Establecer un sistema de seguimiento de la norma por parte de las autoridades federales para la revisión y evaluación de registros, que considere la NMX-AA-181-SCFI-2020. Se propone determinar la factibilidad de contar con un repositorio de datos para las autoridades ambientales, en el cual se dispongan los datos del monitoreo continuo de manera automática para la vigilancia del cumplimiento y seguimiento.	Sistema de seguimiento operando	FED (SEMARNAT/ ASEA/SENER)	1	1	ND[6]
9.1.2	**Establecer un registro de las plantas generadoras de energía eléctrica de emergencia (PGEEE) y desarrollar lineamientos de operación.**					
	9.1.2.1 Crear un registro que contenga la siguiente información: datos generales del responsable de la operación de las PGEEE, especificaciones (marca, modelo, capacidad (kW), combustible y ficha técnica del equipo) y características de operación (consumo de combustible, horas anuales de operación y bitácora de mantenimiento a cargo de una empresa certificada).	Registro PGEEE operando	FED (SEMARNAT/ SAT)	1	1	$500,000
	9.1.2.2 Desarrollar un lineamiento de operación con base en la información que aporte el registro.	Lineamientos publicados	FED (SEMARNAT/ SAT)	0	1	$128,000
			CDMX	0	1	$128,000
			EDOMEX	0	1	$64,000

Responsables e involucrados

Entidades responsables	Gobierno Federal, Ciudad de México y Estado de México
Instituciones responsables	• Gobierno Federal: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Dirección General de Energía y Actividades Extractivas, Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos (ASEA) - Unidad de Normatividad y Regulación, Secretaría de Energía (SENER) y Servicio de Administración Tributaria (SAT) • Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) • Estado de México: Secretaría del Medio Ambiente (SMAGEM)
Actores involucrados	• Gobierno Federal: Comisión Reguladora de Energía (CRE) • Coordinación Ejecutiva de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CE-CAMe) • Otros: Empresas privadas dedicadas a la generación de electricidad y Comisión Federal de Electricidad (CFE)

Marco normativo

Fundamento jurídico

Fundamentos en leyes generales o federales

El párrafo segundo del artículo 1 de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) establece como una de las finalidades de dicha Ley el cumplimiento de las obligaciones de reducción de emisiones contaminantes. Por su parte, la fracción V del artículo 4 señala como una de las obligaciones de servicio público y universal cumplir con las obligaciones en materia de reducción de emisiones contaminantes que al efecto se establezcan en las disposiciones aplicables. El artículo 17 establece que las Centrales Eléctricas con capacidad mayor o igual a 0.5MW y las Centrales Eléctricas de cualquier tamaño representadas por un Generador en el Mercado Eléctrico Mayorista requieren permiso otorgado por la CRE para generar energía eléctrica en el territorio nacional; no obstante, las Centrales Eléctricas de cualquier capacidad que sean destinadas exclusivamente al uso propio en emergencias e interrupciones en el Suministro Eléctrico no requieren permiso. Finalmente, el artículo 128 de la LIE faculta a la SEMARNAT para establecer, a través de normas oficiales mexicanas (NOM) y los demás instrumentos o disposiciones aplicables, las obligaciones de reducción de emisiones contaminantes relativas a la industria eléctrica.

De acuerdo con las fracciones VII y X del artículo 3 de la Ley de Infraestructura de la Calidad (LIC), compete exclusivamente a las dependencias o entidades de la Administración Pública Federal elaborar las propuestas de NOM, someterlas al conocimiento de los comités consultivos nacionales de normalización, expedirlas y, en su caso, modificarlas con base en el procedimiento previsto en el artículo 35 de este ordenamiento.

Por su parte la fracción III del artículo 35 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente señala que, para garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas, la Secretaría (SEMARNAT) emitirá normas oficiales mexicanas en materia ambiental y para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, que tengan por objeto estimular o inducir a los agentes económicos para incrementar sus procesos y tecnologías a la protección del ambiente y al desarrollo sustentable. La fracción III del artículo 111 de dicha ley establece que, para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la Secretaría tendrá la facultad de expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan por contaminante y por fuente de contaminación, los niveles máximos permisibles de emisión de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera provenientes de fuentes fijas y móviles. Además, el artículo 111 bis indica que para la operación y funcionamiento de las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan o puedan emitir olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera, se requerirá autorización de la Secretaría; considerándose fuentes fijas de jurisdicción federal, la industria química, del petróleo y petroquímica; de pinturas y tintas, automotriz, de celulosa y papel, metalúrgica, del vidrio, de generación de energía eléctrica, del asbesto, cementera y calera y de tratamiento de residuos peligrosos (...).

Por otro lado, de acuerdo con el artículo 45 fracción XI de la Ley de la Comisión Federal de Electricidad, le corresponde al Director General dirigir el diseño y la implementación de los programas de prevención en materia eléctrica, y los demás que, en materia de seguridad operativa, equilibrio ecológico y preservación del medio ambiente sean aplicables.

Fundamentos en leyes locales

Ciudad de México

El artículo 16 de la Constitución Política de la Ciudad de México en su fracción A.2 dicta que la Ciudad de México minimizará su huella ecológica, en los términos de emisión de gases de efecto invernadero, a través de nuevas tecnologías, uso de energía renovable, medidas y políticas de eficiencia energética, entre otros. Asimismo, en su fracción A.4 menciona que las autoridades aplicarán las medidas necesarias para reducir las causas, prevenir, mitigar y revertir las consecuencias del cambio climático, y que se crearán políticas públicas y un sistema eficiente con la mejor tecnología disponible de prevención ambiental de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes.

También, la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal (LAPTDF) establece en el artículo 133, fracción I, que, para regular, prevenir, controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la SEDEMA tendrá la facultad de coordinarse con la Federación, entidades federativas y municipios de la zona conurbada para la planeación y ejecución de acciones coordinadas en materia de fuentes de la calidad del aire. A su vez, el artículo 138 establece que, en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica producida por fuentes fijas, la SEDEMA establecerá las medidas preventivas y correctivas para reducir las emisiones contaminantes; y promoverá ante los responsables de operación de las fuentes, la aplicación de nuevas tecnologías con el propósito de reducir sus emisiones a la atmósfera.

Estado de México

La fracción IV del artículo 1.6 del Código para la Biodiversidad del Estado de México le atribuye a las autoridades estatales y municipales a que se refiere el Código en las materias que les corresponde, expedir normas técnicas estatales en los casos previstos en el Código y realizar directamente o a través de terceros autorizados, la evaluación de conformidad; la expedición estará reservada a las dependencias de la administración pública estatal encargadas de aplicar el ordenamiento.

Reformas legislativas, regulatorias o normativas

En virtud de los fundamentos legales existentes, es posible establecer esta acción para promover ante las autoridades federales competentes la actualización de la normativa del aplicable para regular las emisiones y la operación en los procesos y equipos generadores de emisiones del sector eléctrico, con base en el procedimiento previsto en la LIC.

Para completar esta acción se deberá concluir el procedimiento de elaboración de norma:

- PROY-NOM-168-SEMARNAT-ASEA-2016, Niveles máximos permisibles de emisión provenientes de turbinas de gas, a ciclo abierto o ciclo combinado, aeroderivadas y su medición.

Factores económicos

Costo estimado	$960,000 M.N. Incluye el costo de publicación de la norma y elaboración de lineamientos, así como el desarrollo del registro de las PGEEE. El costo de la subactividad 9.1.1.2 está contemplado en la ficha 16.2 Desarrollo de plataformas de seguimiento institucional para sectores altamente contaminantes, en la actividad referente al desarrollo de sistemas de reporte de desempeño ambiental.
Fuentes de financiamiento	Algunas fuentes de financiamiento potenciales son: • Inversión pública utilizando recursos presupuestales y recursos autogenerados, así como con asistencia técnica de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). • Inversión de particulares mediante la observancia obligatoria de la normatividad e incentivos de autorregulación.

Barreras de implementación

Descripción de las barreras y supuestos identificados

Se considera que las principales barreras a las que se pueden enfrentar las autoridades son las diferencias en puntos de vista por parte de las instituciones para llegar a acuerdos en los límites máximos permisibles, especificaciones y métodos de medición; falta de coordinación institucional; recursos económicos escasos o limitados para generar un sistema de seguimiento; así como: falta de personal para la gestión, administración y vigilancia de la normatividad. Adicionalmente, el sector regulado puede mostrar resistencia para la instalación de sistemas de monitoreo continuo y equipos de control de emisiones, falta de recursos para instalar las tecnologías antes mencionadas, inconformidad de brindar información específica de las PGEEE y falta de veracidad de la información proporcionada.

Presupuestales	Económicas	Sociales	Políticas	Institucionales	Operativas	Sector involucrado	Tecnológicas
X	X			X	X	X	

Beneficios ambientales esperados

	Año	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	CO	NO_X	COV	CO_2eq	CN	Tóxicos
Reducción de emisiones (toneladas reducidas)[7]	2024	735	735	NA	NA	2179	NA	NA	282	NA
	2039	2939	2938	NA	NA	8715	NA	NA	1128	NA
Costo-efectividad	Costo medida M.N. / toneladas reducidas	ND	ND	NA	NA	$103	NA	NA	ND	NA
Cobeneficios	Los cobeneficios esperados son la reducción de emisiones a nivel nacional y beneficios a la salud por la reducción de la exposición de la población a contaminantes.									

Seguimiento y evaluación

Indicadores

No.	Nombre	Unidades	Método de cálculo	Frecuencia de medición[8]	Medios de verificación
9.1.1.1	Norma publicada	Documento	Conteo	Única vez (año 2)	Publicación del documento en el Diario Oficial de la Federación
9.1.1.2	Sistema de seguimiento operando	Sistema operando	Conteo	Única vez (año 4)	Sistema operando
9.1.2.1	Registro de PGEEE operando	Registro operando	Conteo	Única vez (año 4)	Registro operando
9.1.2.2	Lineamientos publicados	Documento	Conteo	Única vez (año 6)	Publicación de lineamientos en el Diario Oficial de la Federación, GOCDMX y Periódico Oficial

Cronograma de ejecución

Metas y avances[9]

Actividad	Indicador	Año 2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
9.1.1	9.1.1.1		40%								
	9.1.1.2			40%	60%						
9.1.2	9.1.2.1			25%	50%						
	9.1.2.2					25%	50%				

Figura 7.2 Ejemplo ilustrativo de una ficha descriptiva
Fuente: *Elaboración propia.*

Acciones y actividades:

1.1. Actualización de la normatividad aplicable a las unidades de carga.	Esta acción busca actualizar las NOM que regulan las emisiones del transporte de carga. **1.1.1 Mantener el cumplimiento del estándar B de la NOM-044-SEMARNAT-2017,** Que establece los límites máximos permisibles de emisión de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no metano, hidrocarburos no metano más óxidos de nitrógeno, partículas y amoniaco, provenientes del escape de motores nuevos que utilizan diésel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor a 3857 kilogramos, así como del escape de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3857 kilogramos equipados con este tipo de motores. Se buscará aplicar los límites del estándar B, establecidos en la regulación de referencia, a partir del año 2025. **1.1.2 Actualizar la NOM-045-SEMARNAT-2017,** Protección ambiental. - Vehículos en circulación que usan diésel como combustible- Límites máximos permisibles de opacidad, procedimiento de prueba y características técnicas del equipo de medición. La actualización deberá considerar la medición del número de partículas en unidades de diésel; así como de dióxido de nitrógeno en las tecnologías vehiculares más avanzadas en materia de control de estos contaminantes; además de evaluar la conveniencia de revisar los sistemas de diagnóstico a bordo. **1.1.3 Actualizar la NOM-016-CRE-2016,** Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Se deberá actualizar el calendario de aplicación de las clases de gasolina para asegurar una baja volatilidad en la temporada de mayor generación de ozono en las entidades federativas que circundan a la ZMVM; además de modificar el territorio del país en donde es obligado la comercialización del diésel de ultra bajo azufre (DUBA) para garantizar su disponibilidad en todas las entidades federativas del país.
1.2. Impulso a la renovación tecnológica y electromovilidad del transporte de carga.	Se propone reducir el factor de emisión promedio de la flota, mediante cambios regulatorios, programas y apoyos que promuevan la renovación de vehículos de carga pesada y ligera con tecnologías de menor intensidad de carbono. De forma que para finales del 2030, se incremente el porcentaje de unidades con sistemas eléctricos o híbrido y, en caso de las unidades a diésel la mayoría de ellos cuenten con sistemas avanzados de control de emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno (estándares nacionales 1B y 2B equivalentes a EPA 10 y EURO VI).
	1.2.1 Generar regulación local para incrementar el uso de unidades de carga pesada de bajas emisiones. Contempla modificar reglas locales de autorización, vigencia y renovación de concesiones y/o permisos para beneficiar a las unidades de bajas emisiones. **1.2.2 Actualizar y homologar los programas de transporte de carga de bajas emisiones.** Se contempla modificar el Programa de Autorregulación para fomentar el uso de unidades de mejor desempeño ambiental. **1.2.3 Fomentar el uso de unidades de carga ligera eléctricas o híbridas.** **1.2.4 Mejorar la coordinación y aplicación de los programas de inspección y vigilancia locales y federales realizados en centros de verificación y en vialidad.**
1.3. Limitaciones y vigilancia de la circulación de transporte de carga contaminante.	Para reducir la cantidad de kilómetros-carga que se recorren en la ZMVM con unidades de bajo desempeño ambiental, se debe eficientar la logística en la distribución de la carga e incentivar la circulación de unidades más limpias, mientras se desincentiva a aquellas unidades que no cumplan con los estándares ambientales necesarios (unidades que carezcan de trampas de partículas). **1.3.1 Implementar restricciones horarias y zonales a la circulación de unidades de carga altamente contaminantes.** La actividad contempla convenios de exención de acuerdo con compromisos de renovación vehicular y reducción gradual de emisiones. **1.3.2 Realizar operativos de vigilancia en los límites y dentro de la ZMVM.** Dichos operativos tienen como finalidad detectar y sancionar unidades contaminantes; se prevé el uso y evaluación de herramientas tecnológicas como opacímetros, nanómetros o monitores remotos.

Medida 2.
Reducción de emisiones en el transporte particular

Objetivo: Reducir las emisiones del transporte ligero, en específico unidades particulares, a través de cambios regulatorios sobre los niveles de emisión y eficiencia energética, la renovación tecnológica y electrificación de la flota, así como políticas que reduzcan el número de viajes personales en la zona metropolitana e instrumentos dirigidos hacia la planeación urbana sustentable.

Justificación: En la ZMVM circulan más de 5.4 millones de vehículos ligeros para el transporte de personas (automóviles particulares, camionetas SUV y motocicletas). Este sector tiene un aporte significativo en las emisiones contaminantes de partículas suspendidas, SO_2, NO_X y COV, entre otros contaminantes, como se muestra en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3 Emisiones contaminantes del transporte particular

	Emisiones en 2018 (t/año)				
Fuente contaminante	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**SO_2**	**NO_x**	**COV**
Total, ZMVM	**34 779.5 100.0%**	**16 500.1 100.0%**	**3068.1 100.0%**	**144 597.8 100.0%**	**413 820.9 100.0%**
Total, fuentes móviles	**13 763.3 39.6%**	**7097.5 43.0%**	**1058.8 34.5%**	**124 114.6 85.8%**	**91 770.8 22.2%**
Transporte particular	5405.4 **15.5%**	1571.2 **9.5%**	427.0 **13.9%**	58 356.2 **40.4%**	57 055.7 **13.8%**
Automóviles particulares	3940.5 **11.3%**	1118.6 **6.8%**	276.7 **9.0%**	37 716.0 **26.1%**	36 755.0 **8.9%**
Camionetas SUV (a)	1093.7 **3.1%**	280.3 **1.7%**	103.4 **3.4%**	15 128.1 **10.5%**	10 546.7 **2.5%**
Motocicletas	371.2 **1.1%**	172.3 **1.0%**	46.9 **1.5%**	5512.1 **3.8%**	9754.0 **2.4%**

Notas: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.
(a) Vehículo utilitario deportivo, del inglés Sport Utility Vehicle.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Las unidades de transporte particular están adecuadamente reguladas por parte de los programas ya existentes y por las propias autoridades de tránsito local. No obstante, dado que los cambios normativos usualmente tienen un impacto significativo en las emisiones del sector, es necesario actualizar la normatividad y establecer programas que promuevan tecnologías híbridas o eléctricas. Asimismo, estas acciones se pueden extender a otros tipos de transporte, como las unidades de carga ligera o el transporte público.

Según la Encuesta Origen Destino (EOD) de la ZMVM del año 2017, el 21.1% de todos los viajes realizados se hacen en algún modo de transporte privado, mismos que se realizan principalmente para ir al trabajo o estudiar. En la ZMVM, la estructura urbana causa un estancamiento en los modos de transporte terrestre, lo cual se refleja en las bajas velocidades de circulación y los elevados tiempos de traslado. Por lo tanto, además de actualizar la normatividad y fomentar la renovación de la flota, también se requieren acciones que reduzcan la necesidad y/o la distancia de viajes personales.

Por último, también existen características institucionales, políticas y urbanas que son un obstáculo a la gestión de la calidad del aire. La ZMVM abarca tres entidades federativas, y se ha generado una interdependencia funcional entre la Ciudad de México y la zona conurbada. La estructura de la ciudad tiene un impacto directo en la emisión de contaminantes relacionada con la movilidad de las personas y la distribución de bienes y productos. Entre mejor conectada, accesible y compacta sea una ciudad, y mientras exista una adecuada distribución de la oferta laboral, educativa, de servicios y de diversión, menor será la distancia que se tiene que recorrer para que sus habitantes accedan a servicios, oportunidades de trabajo y académicas, bienes de consumo, sitios de entretenimiento, etc. Por lo tanto, se requieren mecanismos de coordinación metropolitana, así como instrumentos integrales que regulen los procesos de urbanización y uso del suelo.

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT, CONUEE, SE, SHCP, SFP CEND, SEP y STPS), Ciudad de México (SEDEMA, SECTEI, SAF, ADIP, SEMOVI y SEDUVI), Estado de México (SMAGEM, SEFIN, SEMOV, SEDUC y SEDUO) y Estado de Hidalgo (Secretaría de Finanzas Públicas)

Acciones y actividades:

2.1. Actualización de la normatividad de emisiones vehiculares y de eficiencia energética, aplicable a unidades ligeras.

Esta acción busca actualizar y crear nuevas NOM, que regulen las emisiones del transporte particular con límites máximos permisibles más estrictos y mejores rendimientos de combustible. Además, estas regulaciones se ampliarán al transporte de carga ligera y unidades de transporte público individual de pasajeros (p. ej. taxis) y de mediana capacidad.

2.1.1 Publicar la actualización de la NOM-163-SEMARNAT-ENER-SC-FI-2013, Emisiones de bióxido de carbono (CO_2) provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3857 kilogramos. La actualización contempla la introducción de tecnologías para reducir la emisión de CO_2 y mejorar el rendimiento de la flota vehicular de manera gradual.

2.1.2 Actualizar la NOM-042-SEMARNAT-2003, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos. Se deberá enfocar a la actualización de emisiones evaporativas e incluir límites de emisión más restrictivos, basados en las regulaciones internacionales EURO 5 y EPA Tier 2 bin 5.

2.1.3 Emitir una NOM que establezca los límites máximos permisibles aplicables a motocicletas nuevas, considerando para ello, límites mínimos del tipo EURO 3, y publicar criterios de verificación. Implica actualizar las NOM que establecen los límites máximos permisibles aplicables a motocicletas en circulación y su método de prueba y características del equipamiento a utilizar para su verificación.

2.2. Fomento de la renovación tecnológica del transporte particular y la electromovilidad.	Se promoverá la adquisición y uso de unidades de mejor desempeño ambiental, a través de la renovación del Programa Hoy No Circula (HNC) y el Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO), ofreciendo mayores incentivos a las tecnologías más limpias. Asimismo, estos programas también aplican a unidades de carga y del transporte público, extendiendo sus beneficios. **2.2.1 Reestructurar el PVVO.** Se deberá mantener una actualización continua de las condiciones para otorgar los hologramas de verificación vehicular del tipo exento, doble cero, cero, uno y dos, los cuales deberán basarse en las condiciones de desempeño ambiental de las tecnologías de acuerdo a la regulación nacional y/o internacional con la que cumplieron, manteniendo el PVVO como el instrumento para determinar, a través de las emisiones vehiculares evaluadas, la necesidad de otorgar mantenimiento a los automotores. **2.2.2 Actualizar el Programa HNC.** Se vincula con los cambios en hologramas de verificación y el PVVO, y buscará que los vehículos de bajo desempeño ambiental tengan restricciones más estrictas a la circulación, para así motivar su renovación. **2.2.3 Incrementar las unidades de vehículos híbridos y eléctricos.** Se contempla la creación de instrumentos que fomenten el cambio en los patrones de compra de personas físicas y morales.
2.3. Administración de la demanda del transporte individual motorizado.	Esta acción tiene por objetivo disminuir la demanda de viajes en modos particulares motorizados, para evitar kilómetros recorridos y así mitigar las emisiones contaminantes. **2.3.1 Digitalizar trámites gubernamentales.** Con la actividad se busca que los ciudadanos puedan realizarlos desde sus hogares, oficinas o centros digitales sin la necesidad de desplazarse largas distancias. **2.3.2 Establecer planes de movilidad empresarial y gubernamental.** **2.3.3 Implementar Centros de Comunicación Comunitaria.** A través de estos se buscará brindar acceso gratuito a internet de banda ancha, de forma que los usuarios puedan sostener videoconferencias y trabajo o estudio en línea. **2.3.4 Reducir los viajes en la ZMVM.** Esta actividad se enfoca al reporte del número de viajes reducidos en la ZMVM por la aplicación de las medidas anteriores.
2.4. Estructura urbana sustentable.	La acción tiene como objetivo establecer las herramientas e instrumentos necesarios para impulsar una ciudad que logre disminuir las distancias, tiempos y costos relacionados a la movilidad y transporte de mercancías, como una prioridad del gobierno hacia un desarrollo orientado al transporte. Las actividades siguientes se basan en tecnologías de información, instrumentos de planeación y cambios de relaciones urbanas[5]. **2.4.1 Definir Zonas de Baja Emisión (ZBE) a nivel metropolitano.** **2.4.2 Diseñar un sistema integral de movilidad a nivel metropolitano.** **2.4.3 Ajustar políticas de uso de suelo.** Se enfoca principalmente en aumentar densidades habitacionales, e impulsar la verticalidad y los usos de suelo mixtos en zonas cercanas a estaciones de transporte estructurado. **2.4.4 Establecer un Sistema de Información Geográfica integral que evalúe los impactos ambientales de las políticas, inversiones e intervenciones urbanas en la ZMVM.** **2.4.5 Establecer un Ordenamiento del Territorio de la ZMVM que tenga una visión de sustentabilidad.**

5 La visión de futuro, establecida en el Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México, es contar con un ordenamiento territorial, que opera e instrumenta permanentemente con perspectiva de género, incluyente y ambientalmente sostenible y alcance metropolitano.

Medida 3.
Control de emisiones en el transporte público de pasajeros

Objetivo: Reducir las emisiones asociadas al transporte público de pasajeros, a través de la ampliación y mejora de los sistemas de transporte masivos y de alta capacidad, la renovación tecnológica y la electromovilidad, y la construcción de infraestructura para incrementar los viajes en bicicleta dentro de la ZMVM.

Justificación: El transporte público en la ZMVM está conformado por distintos sistemas gestionados por los gobiernos estatales, el gobierno federal y entes privados.

El transporte masivo local está conformado por sistemas de la Ciudad de México (STC Metro, los autobuses de la RTP, el Metrobús, el Cablebús y el STE) y del Estado de México (Mexibús y Mexicable), así como un sistema conjunto (Tren Suburbano). A estos sistemas se suman otros modos de alta capacidad, como autobuses concesionados, autobuses federales, autobuses de transporte escolar y de personal. Las emisiones de estos sistemas se asocian a la falta de renovación y mantenimiento de unidades, particularmente en autobuses (ver Tabla 7.4). No obstante, estos sistemas tienen menos emisiones por pasajero transportado, por lo que su ampliación y renovación con tecnologías de menor intensidad de carbono y/o de emisiones de partículas, es una de las mejores opciones para reducir emisiones.

Tabla 7.4 Emisiones contaminantes del transporte público de pasajeros

	Emisiones en 2018 (t/año)									
Fuente contaminante	**PM_{10}**		**$PM_{2.5}$**		**SO_2**		**NO_x**		**COV**	
Total, ZMVM	34 779.5	**100.0%**	16 500.1	**100.0%**	3068.1	**100.0%**	144 597.8	**100.0%**	413 820.9	**100.0%**
Total, fuentes móviles	13 763.3	**39.6%**	7097.5	**43.0%**	1058.8	**34.5%**	124 114.6	**85.8%**	91 770.8	**22.2%**
Transporte público	4180.9	**12.0%**	2477.0	**15.0%**	342.2	**11.2%**	45 633.4	**31.6%**	27 464.4	**6.6%**
Taxis	897.4	**2.6%**	207.5	**1.3%**	58.8	**1.9%**	13 332.4	**9.2%**	8455.3	**2.0%**
Vagonetas	366.6	**1.1%**	144.6	**0.9%**	24.3	**0.8%**	2998.8	**2.1%**	1533.9	**0.4%**
Microbuses/midibuses	247.9	**0.7%**	133.9	**0.8%**	171.0	**5.6%**	13 062.0	**9.0%**	15 507.4	**3.7%**
Autobuses	2621.3	**7.5%**	1964.0	**11.9%**	87.9	**2.9%**	15 987.3	**11.1%**	1946.0	**0.5%**
Metrobús/Mexibús	47.7	**0.1%**	27.0	**0.2%**	0.2	**<0.1%**	253.1	**0.2%**	21.8	**<0.1%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

En la ZMVM también operan sistemas de baja y mediana capacidad, como taxis, vagonetas y microbuses, así como vehículos gestionados por aplicaciones y plataformas tecnológicas (p. ej. Beat, Cabify, DiDi, Uber). La EOD 2017 estima que, de los 34.56 millones de viajes que se realizan en un día entre semana en la ZMVM, 38.1% usa un colectivo o taxi (sitio o aplicación) en al menos uno de sus tramos, mientras que los sistemas de alta capacidad solo se utilizan en 21.3% de los viajes. Debido a la cantidad de viajes atendidos por estos sistemas, es difícil sustituirlos por completo con modos de transporte de alta capacidad. Por lo tanto, se requiere un mejoramiento tecnológico y renovación de la flota para mitigar las emisiones del sector.

Por último, la última EOD determinó que solo el 2.1% de los viajeros utilizan la bicicleta para una parte de su trayecto. Resulta fundamental fomentar la movilidad ciclista, ampliando la infraestructura existente, para sustituir viajes que se realizan en modos de transporte motorizados.

En este sentido, se busca contar con un sistema de transporte compuesto por distintos modos complementarios. Esta red de transporte privilegia la caminata, el uso de la bicicleta y el transporte público de bajas emisiones, con la finalidad de aumentar la participación de modos sustentables (transporte público, bicicleta, caminata) al 80% en el reparto modal (de acuerdo con el Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México), atendiendo a sectores vulnerables (mujeres, niñas y niños, adultos mayores y personas con discapacidad).

Entidades responsables: Gobierno Federal (SCT), Ciudad de México (SEMOVI) y Estado de México (SEMOV)

Acciones y actividades:

3.1. Renovación tecnológica y electromovilidad del transporte público masivo y de alta capacidad.

Esta acción plantea renovar la flota de transporte público de alta capacidad con tecnologías de menor intensidad de carbono. Para finales de 2030, la mayor parte de las unidades deberán contar con tecnologías de alto desempeño ambiental, como sistemas eléctricos, híbridos o de control de emisiones (estándar EURO VI o EPA 10).

3.1.1 Incrementar la flota de autobuses de transporte público concesionado y de gobierno, con unidades híbridas y eléctricas. La actividad contempla cambios regulatorios locales y programas de chatarrización.

3.1.2 Incrementar el servicio del transporte eléctrico masivo y de alta capacidad. Incluye el desarrollo de nuevas líneas de trenes urbanos, el mantenimiento y ampliación del STC Metro, y nuevas líneas de teleféricos.

3.1.3 Incrementar las unidades de la flota de transporte público de gobierno con mejores tecnologías de control de emisiones. Se basa en la sustitución de unidades con mayor antigüedad por vehículos con mejor desempeño (estándares nacionales 1B, 2B y 1AA, EURO VI, EPA 07 o EPA 10).

3.1.4 Incrementar las unidades de la de flota de transporte público concesionado con mejores tecnologías de control de emisiones. Se busca otorgar beneficios en materia de verificación vehicular, exención en contingencia y ampliación de la temporalidad de su concesión con el fin de incrementar de unidades de transporte con tecnología de control de emisiones.

3.2. Eficiencia energética y electromovilidad en el transporte público de baja y mediana capacidad.	Se reducirán las emisiones del transporte público de baja y mediana capacidad, a través del mejoramiento tecnológico y renovación de unidades, para eliminar los vehículos más contaminantes, reducir la edad promedio de la flota y aumentar la proporción de unidades con tecnología parcial o totalmente eléctrica. **3.2.1 Fomentar la renovación de transporte basado en aplicaciones digitales con unidades híbridas y eléctricas.** Implica modificaciones a regulaciones existentes e incentivos locales. **3.2.2 Sustituir taxis que concluyan su vida útil por unidades híbridas y eléctricas.** Se contemplan cambios regulatorios que motiven la adquisición de estas unidades. **3.2.3 Establecer lineamientos ambientales y de eficiencia energética para la renovación de concesiones y/o permisos de unidades de baja y mediana capacidad (vagonetas y microbuses).** La actividad busca eliminar unidades de mayor antigüedad, a través de cambios regulatorios, ; la sustitución de unidades se deberá realizar con unidades con tecnologías más limpias.
3.3. Mejoramiento y ampliación de la infraestructura ciclista.	Incluye la renovación y expansión de la infraestructura actual y los servicios relacionados, así como su integración a otras redes de transporte público, para que los viajes en bicicleta aumenten su participación en el reparto modal. **3.3.1 Aumentar la infraestructura vial ciclista.** **3.3.2 Desarrollar bici-estacionamientos.** La construcción de nuevos bici-estacionamientos se contempla en puntos estratégicos para reforzar la intermodalidad entre la bicicleta y el transporte masivo. **3.3.3 Expandir los sistemas de bicicletas públicas.** Se priorizará su expansión y ubicación cerca de estaciones de transporte público de la ZMVM.

Medida 4.
Reducción de emisiones en el sector doméstico[6]

Objetivo: Reducir las emisiones de COV que se generan en el sector doméstico dentro de la ZMVM, mediante la regulación de su contenido en distintos productos de uso doméstico, así como promover el consumo de productos con menor impacto ambiental, el control de fugas de gas L.P. y la disminución general de su consumo.

Justificación: Dentro de las fuentes de área, el uso comercial y doméstico de solventes, y las fugas en instalaciones de gas L.P, representan un aporte del 31.6% y el 20.0% a las emisiones totales de COV, respectivamente (ver Tabla 7.5).

Tabla 7.5 Emisiones de COV en el sector doméstico

	Emisiones en 2018 (t/año)	
Fuente contaminante	**COV**	**Tóxicos**
Total, ZMVM	413 820.9 **100.0%**	122 004.8 **100.0%**
Total, fuentes de área	271 133.4 **65.5%**	84 185.2 **69.0%**
Uso comercial y doméstico de solventes	130 686.6 **31.6%**	62 413.3 **51.2%**
Productos de cuidado personal y uso doméstico (a)	89 991.4 **21.7%**	34 177.9 **28.0%**
Fugas en instalaciones de gas L.P. (b)	82 763.6 **20.0%**	N/A **-**
Hidrocarburos no quemados (HCNQ) en la combustión de gas L.P. (b)	11 200.5 **2.7%**	1806.3 **1.5%**

Notas: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

(a) Agrupa emisiones de las siguientes categorías: Pintura de tránsito, Plaguicidas domésticos, Productos de consumo doméstico, Productos de cuidado personal, Productos misceláneos, Productos para el cuidado automotriz y Recubrimiento de superficies arquitectónicas. La categoría de Pinturas de tránsito no corresponde al sector doméstico, sin embargo, se incluye en la propuesta de norma de pinturas de la presente medida, por lo que se lista dentro de este sector.

(b) Incluye emisiones provenientes de otros sectores, como el industrial, comercial y de servicios. Se destaca que la mayoría de las emisiones se generan en el sector doméstico: para Fugas en instalaciones de gas L.P., estas equivalen a 82 498.8 t/año, mientras que para HCNQ en la combustión de gas L.P., las emisiones domésticas equivalen a 3328.6 t/año.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Aproximadamente 21.7% del total de COV, y 28.0% de los compuestos tóxicos, son emitidos por el uso de productos domésticos, como los recubrimientos arquitectónicos, plaguicidas, productos de aseo personal y cosméticos, entre otros. En México solo se regula el contenido de COV en la fabricación de pinturas (NOM-123-SEMARNAT-1998), por lo que existe un área de oportunidad para regular otros productos aplicando límites en el contenido de COV.

Por su parte, el gas L.P. es el combustible fósil más utilizado en los hogares de la ZMVM. Las emisiones de COV se asocian a los procesos de combustión en estufas, calentadores de agua y, principalmente, a las fugas de gas en instalaciones, contenedores, accesorios y conexiones a equipos. Estas emisiones en el sector doméstico aportan 85.8 mil toneladas de COV al año (20.7% de las emisiones totales), siendo las fugas la principal fuente.

6 Estas acciones en conjunto con la Medida 5, pretenden mejorar la eficiencia energética, para que al año 2040, el 25% del uso de energía provenga de fuentes de energía renovable, primordialmente solar, en línea con el Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México.

Entidades responsables: Gobierno Federal (SE, SEMARNAT y CRE), Ciudad de México (SEDEMA y SEDECO) y Estado de México (SMAGEM)

Acciones y actividades:

4.1. Creación del marco regulatorio para la reducción de COV en productos de so doméstico.	Esta acción busca establecer límites máximos permisibles para el contenido de COV en distintos productos de uso doméstico, y promover el consumo de productos con menor impacto ambiental. El desarrollo y actualización de normas deberá considerar criterios de toxicidad y reactividad de los COV regulados, la revisión de la normativa internacional, la eliminación de sustancias prohibidas y tóxicas, compuestos exentos y factores económicos (p. ej. ventas y costos de productos). **4.1.1 Publicar y evaluar la norma que regule el contenido de COV en productos de uso doméstico y de cuidado personal.** **4.1.2 Desarrollar una norma que regule el contenido de COV en plaguicidas de uso doméstico y productos para el cuidado automotriz.** **4.1.3 Publicar y evaluar la norma que regule el contenido de COV en recubrimientos arquitectónicos.** **4.1.4 Promover el consumo de productos de bajo impacto ambiental,** a través de campañas de comunicación y sensibilización dirigidas a la ciudadanía.
4.2. Disminución de las emisiones por el uso de gas L.P. en las viviendas.	La acción se centra en reducir el consumo de gas L.P. en viviendas, a través de actividades para el aprovechamiento de energía solar y el ahorro de agua, el uso de gas natural y campañas con la ciudadanía para fomentar el consumo responsable y la disminución de fugas. **4.2.1 Incrementar el uso de tecnologías sustentables para disminuir el consumo de agua,** así como de gas L.P. para su calentamiento. **4.2.2 Promover el consumo responsable y disminuir las fugas de gas L.P. en viviendas,** a través de campañas dirigidas a la ciudadanía. **4.2.3 Fomentar el uso de gas natural en el sector doméstico,** a través de la ampliación de la red de gas natural en la ZMVM.

Medida 5.
Disminución de emisiones provenientes del gas L.P. en los sectores industrial, comercial y de servicios

Objetivo: Reducir las emisiones contaminantes de COV por la distribución, almacenamiento y uso de gas L.P. en establecimientos industriales, comerciales y de servicios, a través cambios normativos, esquemas de autorregulación, tecnología solar y combustibles de menor impacto ambiental.

Justificación: La distribución de gas L.P. y su posterior consumo en distintas actividades productivas genera emisiones significativas de COV en la ZMVM (ver Tabla 7.6). Durante las actividades de carga, almacenamiento y descarga de combustible en plantas de distribución y estaciones de carburación, se emiten cantidades significativas de COV. Una vez que el combustible es distribuido a los establecimientos (p. ej. con pipas o cilindros), se registran emisiones durante la combustión industrial y comercial-institucional. Asimismo, en estos establecimientos se registran emisiones por fugas de gas L.P. e hidrocarburos no quemados (HCNQ).

Existen distintas normas oficiales que regulan el diseño, construcción y condiciones de operación de plantas de distribución y estaciones de carburación, así como las condiciones de seguridad, operación y mantenimiento de los vehículos de transporte y distribución de gas L.P. Por otra parte, existen normas mexicanas que establecen las características de las válvulas para la carga y descarga de combustibles a tanques de almacenamiento, autotanques y semirremolques. No obstante, estas últimas no son obligatorias para todos los puntos de trasiego, aun cuando este tipo de válvulas ya se comercializan y cuentan con diferentes grados de eficiencia. Por lo anterior, es necesario incorporar el uso de tecnologías que permiten reducir emisiones por fugas de gas L.P., como los dispositivos de desconexión de bajas emisiones o de "desconexión seca", e implementar buenas prácticas que permitan mejorar el funcionamiento de equipos y prevenir fugas. Por otro lado, y en concordancia con la actual necesidad de lograr la sostenibilidad energética en las ciudades, se considera de utilidad promover la eficiencia energética y disminuir el consumo del gas L.P. Esto se puede lograr a través del aprovechamiento de la energía solar, o su sustitución por gas natural.

Tabla 7.6 Emisiones de COV por el uso de gas L.P. en los sectores industrial, comercial y de servicios

	Emisiones en 2018 (t/año)	
Fuente contaminante	**COV**	
Total, ZMVM	**413 820.9**	**100.0%**
Total, fuentes de área	**271 133.4**	**65.5%**
Distribución y almacenamiento de gas L.P.	4328.5	**1.1%**
Fugas en instalaciones de gas L.P. (a)	82 763.6	**20.0%**
Hidrocarburos no quemados (HCNQ) en la combustión de gas L.P. (a)	11 200.5	**2.7%**

Notas: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

a) Incluye emisiones provenientes de otros sectores, como el doméstico. Respecto de los sectores industrial, comercial y de servicios, las fugas ascienden a 264.8 toneladas/año y para HCNQ en la combustión de gas L.P. las emisiones son iguales a 7560.1 t/año.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Gobierno Federal (ASEA y CRE), Ciudad de México (SEDEMA y SEDECO) y Estado de México (SMAGEM y IEECC)

Acciones y actividades:

5.1. Disminución de las emisiones de COV durante el almacenamiento y distribución de gas L.P.	Esta acción pretende reducir las emisiones asociadas al desacoplamiento por carga y descarga de combustible en las plantas de distribución, estaciones de carburación y operaciones de trasiego durante la distribución de gas L.P., a través de la actualización de la normatividad aplicable, considerando el uso de dispositivos de desconexión de bajas emisiones, también denominadas "válvulas de desconexión seca", en todos los puntos y actividades de trasiego de combustible, y estableciendo un volumen máximo de emisión por desacoplamiento. **5.1.1 Actualizar la NOM-001-SESH-2014,** Plantas de distribución de Gas L.P. Diseño, construcción y condiciones seguras en su operación, incluyendo el uso de tecnologías para la reducción de fugas de combustible durante el trasiego. **5.1.2 Actualizar la NOM-003-SEDG-2004,** Estaciones de Gas L.P. para carburación. Diseño y construcción, incluyendo el uso de tecnologías para la reducción de fugas de combustible durante el trasiego. **5.1.3 Actualizar la NOM-007-SESH-2010,** Vehículos para el transporte y distribución de Gas L.P. Condiciones de seguridad, operación y mantenimiento, contemplando la reducción de fugas de combustible durante el trasiego.
5.2. Reducción de emisiones por consumo de gas L.P. en los sectores industrial, comercial y de servicios.	Para reducir emisiones, se propone fomentar tecnologías que aprovechen la energía solar y el uso de gas natural en el sector. También se plantea establecer esquemas de autorregulación para plantas de distribución, estaciones de carburación y unidades vehiculares que transportan gas L.P. **5.2.1 Incrementar el uso de tecnologías de aprovechamiento de energía solar para calentamiento de agua en la industria, comercios y servicios.** Se considera el uso de instrumentos regulatorios, campañas de apoyo y subsidios para la adquisición de calentadores solares. **5.2.2 Fomentar el uso de gas natural en el sector industrial, comercial y de servicios,** a través de la ampliación de la red de gas natural en la ZMVM. **5.2.3 Establecer esquemas de autorregulación para plantas de distribución, estaciones de carburación y unidades vehiculares que transportan gas LP.,** con la finalidad de promover la instalación de tecnologías para la reducción de emisiones en la desconexión.

Medida 6.
Reducción de emisiones generadas por el tránsito en vialidades

Objetivo: Reducir la emisión de partículas que se generan por el paso de vehículos sobre las vialidades pavimentadas y no pavimentadas.

Justificación: La circulación de vehículos en vialidades pavimentadas y no pavimentadas da lugar a la emisión de partículas fugitivas, siendo esta una de las principales fuentes no combustivas de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Estas emisiones se atribuyen a las partículas que son arrastradas y re-suspendidas por el rodamiento de las llantas y por la turbulencia que se produce en la superficie del camino después de que el vehículo ha pasado. En 2018, el tránsito sobre vialidades contribuyó con 24.3% de las emisiones totales de PM_{10}, 10.0% de $PM_{2.5}$ y 5.4% de carbono negro, como se muestra en la Tabla 7.7. Las emisiones de vialidades pavimentadas se generan básicamente por la cantidad de kilómetros que se recorren sobre estas. Asimismo, para mitigar las emisiones en vialidades desprovistas de cubierta, se puede incrementar la superficie de pavimentación, repavimentar vialidades deterioradas y dar mantenimiento y limpieza a la red vial, ya sea con barredoras mecánicas de succión o húmedas, o a través del barrido manual en húmedo.

Tabla 7.7 Emisiones de COV en el sector doméstico

	Emisiones en 2018 (t/año)		
Fuente contaminante	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**Carbono negro**
Total, ZMVM	**34 779.5 100.0%**	**16 500.1 100.0%**	**2615.3 100.0%**
Total, fuentes de área	**15 385.4 44.2%**	**5906.1 35.8%**	**554.7 21.2%**
Vialidades pavimentadas	5725.9 **16.5%**	1381.9 **8.4%**	126.7 **4.8%**
Vialidades sin pavimentar	2732.0 **7.9%**	272.7 **1.7%**	13.7 **0.5%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Ciudad de México (SOBSE) y Estado de México (Secretaría de Movilidad y SEDUO)

Acciones y actividades:

6.1. Limpieza de vialidades.	La acción tiene como objetivo reducir la emisión de partículas en vialidades, a través de actividades de pavimentación y repavimentación, considerando criterios para el uso de materiales sustentables y reciclados. También se requiere del barrido eficiente en las vialidades con mayor tránsito vehicular, de forma que se eliminen las partículas constantemente y evitar su re-suspensión. **6.1.1 Elaborar un programa de pavimentación y mantenimiento de vialidades de mayor alcance.**

6.1.2 Ejecutar acciones de conservación y mantenimiento permanente en los pavimentos de la red vial primaria.

6.1.3 Ejecutar acciones de pavimentación en vialidades sin pavimentar.

6.1.4 Eficientar e incrementar el barrido húmedo de vialidades de mayor tránsito.

Medida 7.
Fomento de buenas prácticas en la labranza y cosecha agrícola para la reducción de emisiones

Objetivo: Disminuir las emisiones de partículas generadas por actividades agrícolas dentro de la ZMVM, a través de buenas prácticas en la labranza y cosecha.

Justificación: El 39.8% de la superficie de la ZMVM, esto es 3134 km^2, corresponde a tierras agrícolas, de la cual aproximadamente una quinta parte es utilizada para agricultura de temporal y el resto para agricultura de riego. Las actividades del sector primario son una de las fuentes de emisiones contaminantes en la región. En específico, las actividades agrícolas levantan polvo durante la preparación del suelo para la siembra (labranza) y la cosecha, debido al movimiento de tierra y uso de maquinaria agrícola. También contribuyen a las emisiones de partículas y otros gases de combustión, las quemas agrícolas (p. ej. prácticas de roza y quema) e incendios accidentales. Por otro lado, la aplicación de fertilizantes nitrogenados genera amoniaco y óxido nitroso, mientras que el uso de plaguicidas se asocia a la liberación de COV y compuestos tóxicos. En este contexto, las actividades de labranza y cosecha tienen el mayor impacto de las actividades agrícolas en las emisiones de partículas, con un aporte del 7.6% para PM_{10} y 3.6% para $PM_{2.5}$, como se muestra en la Tabla 7.8. Las otras actividades agrícolas tienen un impacto poco significativo en las emisiones totales; sin embargo, en días de alta contaminación, estas emisiones pueden ser de gran impacto a nivel local.

Tabla 7.8 Emisiones de partículas por actividades de labranza y cosecha

Fuente contaminante	Emisiones en 2018 (t/año) PM_{10}		Emisiones en 2018 (t/año) $PM_{2.5}$	
Total, ZMVM	**34 779.5**	**100.0%**	**16 500.1**	**100.0%**
Total, fuentes de área	**15 385.4**	**44.2%**	**5906.1**	**35.8%**
Labranza y cosecha	2655.5	**7.6%**	590.1	**3.6%**
Quemas agrícolas	30.6	**0.1%**	28.0	**0.2%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Gobierno Federal (SADER), Ciudad de México (SEDEMA), Estado de México (SMAGEM) y Estado de Hidalgo (SEMARNATH)

Acciones y actividades:

7.1. Control de emisiones agrícolas.

La acción tiene como objetivo disminuir las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ generadas por las actividades productivas de agricultura, las cuales levantan polvo por el movimiento de tierra para la preparación del suelo, la aplicación de fertilizantes y el uso de maquinaria agrícola.

7.1.1 Fomentar las buenas prácticas en la labranza y cosecha agrícola. Incluye capacitaciones y demostraciones en unidades de producción, para el desarrollo de sistemas productivos agroecológicos y prácticas sustentables de “corta, pica y reincorpora” (en lugar de “roza, tumba y quema”). También contempla mecanismos para limitar y organizar el uso de fuego en quemas agropecuarias durante los periodos o épocas que registran altos niveles de partículas.

Medida 8.
Control de emisiones generadas por las actividades industriales

Objetivo: Reducir las emisiones contaminantes provenientes del sector industrial, mediante la creación o actualización de instrumentos regulatorios y el uso de tecnologías de control de emisiones.

Justificación: El sector industrial de la ZMVM contribuye con casi una tercera parte de las emisiones anuales de SO_2 y el 13% de las emisiones totales de $PM_{2.5}$, además de aportar significativamente a la emisión de otros contaminantes como PM_{10}, NO_X, COV y compuestos tóxicos (ver Tabla 7.9). Del mismo modo, se destaca la contribución en carbono negro (5.9%) y CO_2eq (14.4%), principalmente por la quema de combustibles fósiles.

Tabla 7.9 Emisiones de contaminantes en el sector industrial

	Emisiones en 2018 (t/año)					
Fuente contaminante	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**SO_2**	**NO_X**	**COV**	**Tóxicos**
Total, ZMVM	34 779.5 **100.0%**	16 500.1 **100.0%**	3068.1 **100.0%**	144 597.8 **100.0%**	413 820.9 **100.0%**	122 004.8 **100.0%**
Total, fuentes puntuales	4184.2 **12.0%**	3174.4 **19.2%**	1018.5 **33.2%**	9506.2 **6.6%**	19 002.6 **4.6%**	8550.5 **7.0%**
Sector industrial (a)	3172.9 **9.1%**	2173.3 **13.2%**	930.1 **30.3%**	6277.8 **4.3%**	17 822.9 **4.3%**	8117.5 **6.7%**
Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	459.8 **1.3%**	289.6 **1.8%**	540.1 **17.6%**	2183.6 **1.5%**	74.4 **<0.1%**	44.3 **<0.1%**
Industrias metálicas básicas	1102.5 **3.2%**	779.0 **4.7%**	98.4 **3.2%**	253.0 **0.2%**	266.8 **0.1%**	528.4 **0.4%**
Industria del papel	369.2 **1.1%**	305.2 **1.8%**	168.8 **5.5%**	967.7 **0.7%**	1181.2 **0.3%**	382.8 **0.3%**
Impresión e industrias conexas	17.5 **0.1%**	13.8 **0.1%**	0.9 **<0.1%**	33.3 **<0.1%**	7416.7 **1.8%**	2335.7 **1.9%**

Notas: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

(a) Incluye todas las fuentes puntuales excepto las categorías de: Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica; Minería de materiales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas; Comercios y servicios regulados; y Almacenamiento de combustibles líquidos.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Se detectan sectores prioritarios para la reducción de emisiones de partículas, que son la fabricación de productos a base de minerales no metálicos (en específico, la fabricación de cemento, concreto y vidrio) y la industria metálica básica (principalmente la industria siderúrgica y del aluminio). Considerando que las actividades de estos sectores son específicas y diferenciadas, es necesario identificar las condiciones actuales de estas industrias, puntos de generación de partículas y las tecnologías actuales de control, con la finalidad de generar información para la actualización de las normas vigentes y promover que las empresas que aportan más emisiones ingresen a un proceso de auditoría ambiental, aplicando esquemas de reducción de emisiones, y mejorando la eficiencia de sus procesos de producción y su desempeño ambiental.

Las emisiones de partículas también son generadas en otras industrias por equipos de combustión, así como por procesos productivos. Si bien existe la regulación específica para algunos de estos procesos, la normatividad para la mayoría de los sectores es antigua y los límites establecidos son laxos. La Ciudad de México ha elaborado normas para atender industrias de competencia local o complementar la normatividad federal. No obstante, dado que la ZMVM comprende otros estados, es necesaria la homologación o adopción de esta normatividad en el Estado de México.

Por otro lado, la generación de COV y compuestos tóxicos se asocia a la impresión e industrias conexas, la industria química y de forma general, por el uso de solventes para distintas actividades. Dada la variedad de procesos y sustancias empleadas en el sector industrial, es recomendable trabajar en la homologación de instrumentos a nivel local y a nivel federal, para apoyar en la disminución de COV y de compuestos tóxicos de manera paralela.

Por último, la contaminación por SO_2 se asocia principalmente a la industria del cemento (fabricación de productos a base de minerales no metálicos) y el papel. Considerando que la calidad del combustible usado en la ZMVM repercute en el volumen de emisiones contaminantes, resulta relevante vigilar tanto la distribución de combustibles con bajo contenido de azufre para mitigar las emisiones de este contaminante como el cumplimiento de la normatividad que regula su calidad, además de ampliar los municipios de la ZMVM considerados para la distribución de combustibles de alta calidad. Se destaca que la calidad de los combustibles también incide en otros sectores, particularmente en la generación de electricidad, que contribuye significativamente a las emisiones de partículas y carbono negro.

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT, CRE y PROFEPA), Ciudad de México (SEDEMA) y Estado de México (SMAGEM)

Acciones y actividades:

8.1. Marco regulatorio para la reducción de COV, partículas, tóxicos y gases de combustión.

Actualizar el marco normativo aplicable al sector industrial de la ZMVM, así como su correcta vigilancia, permitirá controlar la emisión de contaminantes. Estas actualizaciones buscan ampliar el alcance de las actividades reguladas, así como establecer límites máximos permisibles más estrictos y diferenciados por sector, equipo o proceso, con base en las tecnologías de control disponibles y la definición de los métodos de medición.

8.1.1 Actualizar la NOM-085-SEMARNAT-2011 de equipos de combustión de calentamiento indirecto en el sector industrial.

8.1.2 Actualizar la NOM-043-SEMARNAT-1993 de partículas, estableciendo límites máximos de emisión más estrictos.

8.1.3 Actualizar la NOM-040-SEMARNAT-2002 de emisiones en la fabricación del cemento para ampliar el alcance de las actividades reguladas.

8.1.4 Actualizar la NADF-021-AMBT-2011 que regula las emisiones de partículas en concreteras y homologar la regulación en el Estado de México.

8.1.5 Homologar la norma NADF-011-AMBT-2018[7] para su aplicación en el Estado de México y crear una norma para regular las emisiones de COV en las fuentes fijas de competencia federal.

8.1.6 Homologar la norma NADF-016-AMBT-2016 para su aplicación en el Estado de México. Esta norma establece límites de emisión para equipos de combustión de calentamiento indirecto de 5 cc (176.5 MJ/h) hasta 15 cc (529.5 MJ/h).

8.1.7 Vigilar que el combustible industrial distribuido en la ZMVM cumpla con la calidad establecida en la NOM-016-CRE-2016. Se propone también una actualización a la NOM para incluir a los 59 municipios del Estado de México y al municipio de Tizayuca en la delimitación de la ZMVM.

8.2. Reducción de la emisión de partículas en los sectores industriales de mayor contribución.

Esta acción se enfoca en reducir las emisiones de partículas generadas en tres giros prioritarios (industria metalúrgica del aluminio, industria siderúrgica e industria de fabricación de vidrio). Se propone homologar los criterios de auditoría ambiental a nivel federal y local, así como generar información del sector, a través de la inspección y vigilancia, con la finalidad de identificar puntos de generación de partículas y si se cuenta con sistemas de control, así como desarrollar esquemas de reducción de emisiones (auditoría ambiental, creación de convenios, incentivos fiscales y/o ambientales) con el fin de mejorar los procesos productivos con tecnologías de control más eficientes. Estos esquemas deben ser específicos de la empresa a regular, por lo que aquí no se definen acciones puntuales.

8.2.1 Establecer acciones de reducción de contaminantes en la industria metalúrgica del aluminio.

8.2.2 Establecer acciones de reducción de contaminantes en la industria siderúrgica.

8.2.3 Establecer acciones de reducción de contaminantes en la industria de fabricación de vidrio.

7 Que establece los criterios para la reducción de las emisiones a la atmósfera de COV emitidos por fuentes puntuales de competencia de la Ciudad de México.

Medida 9.
Reducción de las emisiones asociadas a la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica

Objetivo: Reducir las emisiones contaminantes de partículas finas, NO_X y carbono negro en la generación de energía eléctrica, mediante la creación de instrumentos regulatorios y el uso de tecnologías de control de emisiones.

Justificación: El consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica genera emisiones de contaminantes atmosféricos, así como gases y compuestos de efecto invernadero. Dentro de la ZMVM se localizan 19 empresas de este sector, que aportan 5.6% del total de partículas $PM_{2.5}$, 13.5% del carbono negro y 4.0% del CO_2eq (ver Tabla 7.10).

Para reducir emisiones en este sector, es necesario, en primer lugar, establecer límites de emisión y, posteriormente, ejecutar actividades de monitoreo continuo. Por otra parte, los establecimientos industriales, comerciales y de servicios pueden contar con plantas generadoras de energía eléctrica de emergencia (PGEEE) para atender fallas en el sistema eléctrico. Estas plantas operan principalmente a base de diésel, y suelen no contar con tecnologías o sistemas para el control de emisiones. Actualmente, las PGEEE de cualquier capacidad, que sean destinadas exclusivamente al uso propio en emergencias o interrupciones en el suministro eléctrico, no requieren permiso, por lo que tampoco hay registros de los equipos ni de las condiciones de operación. En este contexto, integrar un padrón de equipos, así como establecer especificaciones mínimas de operación y mantenimiento, o incluso regulaciones a nivel nacional, contribuiría a controlar las emisiones.

Tabla 7.10 Emisiones de contaminantes por la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica

	Emisiones en 2018 (t/año)				
Fuente contaminante	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**NO_x**	**CO_2eq**	**Carbono negro**
Total, ZMVM	**34 779.5 100.0%**	**16 500.1 100.0%**	**144 597.8 100.0%**	**75 165 506.7 100.0%**	**2615.3 100.0%**
Total, fuentes puntuales	**4184.2 12.0%**	**3174.4 19.2%**	**9506.2 6.6%**	**14 239 552.0 18.9%**	**534.2 20.4%**
Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	918.4 **2.6%**	918.3 **5.6%**	2841.9 **2.0%**	3 019 602.6 **4.0%**	352.6 **13.5%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT, ASEA, SENER y SAT), Ciudad de México (SEDEMA) y Estado de México (SMAGEM)

Acciones y actividades:

9.1. Reducción de las emisiones de contaminantes asociadas a la generación de electricidad.	La acción busca la reducción de emisiones a través de regulaciones sobre las emisiones y la operación de los procesos y equipos que las generan. **9.1.1 Establecer el monitoreo continuo de las emisiones del sistema de generación eléctrica, para el cumplimiento de normas.** Contempla la publicación de la NOM-168-SEMARNAT-ASEA-2016 "Niveles máximos permisibles de emisión provenientes de turbinas de gas, a ciclo abierto o ciclo combinado, aeroderivadas y su medición", misma que establece el monitoreo continuo de algunos contaminantes, así como el establecimiento de un sistema de seguimiento de la norma para la revisión y evaluación de registros. **9.1.2. Establecer un registro de las plantas generadoras de energía eléctrica de emergencia (PGEEE) y desarrollar lineamientos de operación.**

Medida 10.
Mitigación de emisiones por quema a cielo abierto de residuos

Objetivo: Reducir las emisiones provenientes de la quema a cielo abierto y de residuos no gestionados para mejorar la calidad del aire y disminuir la exposición de la población a contaminantes.

Justificación: En 2018 se recolectaron más de 13 mil toneladas diarias de residuos sólidos en la Ciudad de México, en tanto que en los 59 municipios del Estado de México y Tizayuca, Hidalgo, se estimó una generación de casi 12 mil y 113 toneladas al día, respectivamente. Reducir la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y recolectar la totalidad de estos es un objetivo primordial para la protección del ambiente y de la salud de la población; no obstante, se pueden realizar mejoras en los sistemas de recolección para que la población no recurra a la quema de residuos, así como a su disposición en tiraderos clandestinos, actividades que generan contaminantes atmosféricos en las cantidades estimadas y mostradas en la Tabla 7.11. Se destaca el aporte a partículas, carbono negro y compuestos tóxicos por la quema a cielo abierto de residuos, así como las emisiones de metano por la descomposición de RSU no gestionados.

Tabla 7.11 Emisiones de contaminantes por la quema a cielo abierto de residuos

Fuente contaminante	Emisiones en 2018 (t/año)					
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2	Carbono negro	Tóxicos	CH_4
Total, ZMVM	34 779.5 **100.0%**	16 500.1 **100.0%**	3068.1 **100.0%**	2615.3 **100.0%**	122 004.8 **100.0%**	295 699.8 **100.0%**
Total, fuentes de área	15 385.4 **44.2%**	5906.1 **35.8%**	990.7 **32.3%**	554.7 **21.2%**	84 185.2 **69.0%**	290 798.3 **98.3%**
Quema a cielo abierto	1884.0 **5.4%**	1786.4 **10.8%**	111.6 **3.6%**	134.0 **5.1%**	3850.4 **3.2%**	886.5 **0.3%**
Residuos sólidos no gestionados	NA **-**	NA **-**	NA **-**	NA **-**	NA **-**	6310.6 **2.1%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Ciudad de México (SEDEMA y SOBSE), Estado de México (SMAGEM) y Estado de Hidalgo (SEMARNATH)

Acciones y actividades:

10.1. Reducción de emisiones por quema a cielo abierto y residuos no gestionados.	Esta acción propone reducir las emisiones provenientes de la quema a cielo abierto y residuos no gestionados a través de mejoras en la logística de recolección, el fortalecimiento de la vigilancia y la cultura ambiental en la ZMVM. **10.1.1 Incrementar la recolección de RSU para evitar la quema a cielo abierto y los tiraderos clandestinos.** Implica mejoras en la logística para incrementar la frecuencia y eficiencia de los servicios de recolección. **10.1.2 Vigilar e impulsar la cultura ambiental para reducir la disposición inadecuada de RSU.**

Medida 11.
Mejora de la gestión de los residuos sólidos para reducir las emisiones del sector

Objetivo: Controlar las emisiones de gases contaminantes mediante la reducción de la cantidad de RSU[8] enviados a sitios de disposición final, así como por el tratamiento y aprovechamiento de nuevas tecnologías.

Justificación: En la ZMVM se generan al día más de 25 mil toneladas de RSU. La infraestructura para el manejo de los residuos varía por entidad y se estima que, de la generación total de residuos, entre el 60% y 90% son enviados a sitios de disposición final (SDF). No obstante, también se registran actividades de compostaje, reciclaje y uso como combustibles alternos. La Tabla 7.12 muestra las principales emisiones generadas en SDF[9] y por el compostaje (tratamiento biológico). Por lo tanto, resulta necesario incrementar la separación, el reciclaje, el uso de nuevas tecnologías y la implementación de programas para el tratamiento y aprovechamiento de los RSU, sin perder de vista estrategias de reducción en la fuente.

Tabla 7.12 Emisiones de contaminantes por la gestión de residuos sólidos urbanos

	Emisiones en 2018 (t/año)			
Fuente contaminante	**COV**	**CH_4**	**N_2O**	**CO_2eq**
Total, ZMVM	413 820.9 **100.0%**	295 699.8 **100.0%**	2544.1 **100.0%**	75 165 506.7 **100.0%**
Total, fuentes de área	271 133.4 **65.5%**	290 798.3 **98.3%**	879.9 **34.6%**	17 069 895.0 **22.7%**
Rellenos sanitarios	5081.4 **1.2%**	206 778.0 **69.9%**	<0.1 **NS**	5 799 729.5 **7.7%**
Tratamiento biológico de residuos	1270.1 **0.3%**	2069.7 **0.7%**	170.1 **6.7%**	103 029.8 **0.1%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Ciudad de México (SEDEMA y SOBSE) y Estado de México (SMAGEM)

Acciones y actividades:

11.1. Tratamiento y aprovechamiento de residuos sólidos urbanos.

Esta acción se enfoca en controlar las emisiones provenientes de la gestión y disposición de RSU, mediante la reducción de la cantidad de residuos enviados a sitios de disposición final y su aprovechamiento con nuevas tecnologías.

11.1.1 Fortalecer la separación de RSU para reducir las toneladas de residuos enviados a sitios de disposición final, a través de tratamientos alternativos y reciclaje.

11.1.2 Aprovechar las emisiones de biogás generado en sitios de disposición final de RSU.

8 El Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México establece como meta a futuro que el 100% de los residuos urbanos se aprovechan sustentablemente a través de establecer estímulos, adoptar programas de aprovechamiento sustentable con la participación de la iniciativa privada para instalar nuevas tecnologías, incorporar programas de participación ciudadana para una mejor y mayor separación de los residuos, desde la fuente, que facilite la calidad y procesamiento de los residuos sólidos.

9 El Inventario de Emisiones consideró once rellenos sanitarios en 2018.

Medida 12.
Mejora de la gestión de aguas residuales tratadas y no tratadas para la reducción de emisiones

Objetivo: Reducir emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero generados por las aguas residuales[10].

Justificación: De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Comisión del Agua del Estado de México, solo un 13% de las aguas residuales recibe tratamiento después de utilizarse. Esto contribuye a la contaminación del aire y al calentamiento global, tal como se observa en las estimaciones del inventario de emisiones (ver Tabla 7.13).

Tabla 7.13 Emisiones de contaminantes por la gestión y tratamiento de aguas residuales

	Emisiones en 2018 (t/año)				
Fuente contaminante	**COV**	**Tóxicos**	**CH_4**	**N_2O**	**CO_2eq**
Total, ZMVM	413 820.9 **100.0%**	122 004.8 **100.0%**	295 699.8 **100.0%**	2544.1 **100.0%**	75 165 506.7 **100.0%**
Total, fuentes de área	271 133.4 **65.5%**	84 185.2 **69.0%**	290 798.3 **98.3%**	879.9 **34.6%**	17 069 895.0 **22.7%**
Aguas residuales no tratadas	15 920.4 **3.8%**	8624.7 **7.1%**	37 154.3 **12.6%**	228.0 **9.0%**	1 100 732.5 **1.5%**
Tratamiento de aguas residuales	2097.5 **0.5%**	1136.3 **0.9%**	18 982.0 **6.4%**	NA **-**	531 497.3 **0.7%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Para reducir estas emisiones, es necesario disminuir el volumen de aguas residuales que se generan en la ZMVM, y eficientar su tratamiento. Asimismo, se requiere incrementar y rehabilitar la infraestructura para el tratamiento de agua residual. Esto permitirá a largo plazo aprovechar las aguas residuales y pluviales.

Entidades responsables: Ciudad de México (SACMEX y SEDEMA) y Estado de México (CAEM y SMAGEM)

Acciones y actividades:

12.1. Tratamiento y reúso de agua residual.

Esta acción se enfoca en reducir emisiones generadas por el tratamiento de las aguas residuales, mediante la rehabilitación de infraestructura, campañas de sensibilización, e incentivos y programas que permitan reducir la crisis hídrica en la ZMVM.

12.1.1 Incrementar y rehabilitar la infraestructura hidráulica. Se enfoca en la infraestructura para el tratamiento de aguas.

10 Esta medida coadyuvará a que, a largo plazo, al menos el 50% de las aguas residuales reciban un tratamiento y sean reutilizadas, de acuerdo con las metas del Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México.

12.1.2 Fomentar la cultura hídrica. Esta actividad considera campañas de sensibilización para modificar patrones conductuales y reducir el consumo de la población, así como el aprovechamiento del agua de lluvia.

12.1.3 Fomentar el uso y tratamiento de aguas residuales. Implica incrementar el volumen de agua residual que recibe tratamiento y fomentar el uso del agua tratada en los sectores comercial, industrial y agrícola.

Medida 13.
Control de emisiones en fuentes naturales

Objetivo: Reducir las emisiones provenientes de fuentes naturales, en específico la generación de partículas suspendidas por la erosión eólica del suelo y por los incendios forestales.

Justificación: En la ZMVM, aproximadamente un cuarto de la superficie total corresponde a suelo forestal y áreas verdes urbanas. La pérdida y deterioro de esta cobertura afecta negativamente la calidad del aire; la degradación del suelo continúa debido al incremento del desarrollo urbano, al aumento en el número de viviendas y los asentamientos humanos irregulares, entre otras causas. Al estar el suelo desprovisto de vegetación, se favorece el fenómeno de la erosión eólica y la suspensión de partículas. Aunado a esto, las condiciones meteorológicas y diversas actividades agrícolas, pecuarias, industriales, de urbanización y de sobreexplotación de la vegetación propias de los habitantes, acentúan este fenómeno, que contribuye con 4.2% de las emisiones totales de PM_{10} (ver Tabla 7.14).

Tabla 7.14 Emisiones de contaminantes por fuentes naturales

Fuente contaminante	Emisiones en 2018 (t/año) PM_{10}		$PM_{2.5}$	
Total, ZMVM	**34 779.5**	**100.0%**	**16 500.1**	**100.0%**
Total, fuentes de área	**15 385.4**	**44.2%**	**5906.1**	**35.8%**
Incendios forestales	79.0	**0.2%**	66.9	**0.4%**
Total, vegetación y suelos	**1446.6**	**4.2%**	**322.1**	**2.0%**
Erosión eólica del suelo	1446.6	**4.2%**	322.1	**2.0%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Por otro lado, los incendios forestales, en su mayoría provocados por actividades antropogénicas (p. ej. vandálicas y agropecuarias) son eventos que emiten cantidades importantes de contaminantes como CO, NO_X y partículas suspendidas. Si bien los incendios no tienen un aporte significativo al total de emisiones, sí pueden tener una contribución muy alta en algunos días del año, agravando notablemente la calidad del aire. Asimismo, la erradicación y control de los incendios forestales resulta relevante por la afectación a bosques, dado que la pérdida de vegetación expone al suelo a la erosión y se pierden otros servicios ecosistémicos.

Entidades responsables: Gobierno Federal (CONAFOR, SADER, SEMARNAT y PROFEPA), Ciudad de México (SEDEMA), Estado de México (PROBOSQUE y SMAGEM) y Estado de Hidalgo (SEMARNATH)

Acciones y actividades:

13.1. Mejora de la capacidad de manejo del fuego.	Esta acción se enfoca en evitar eventos de elevada concentración por partículas derivadas de incendios forestales, mediante el fortalecimiento de las capacidades institucionales, equipamiento y tecnología para prevenir, detectar y controlar los incendios forestales. **13.1.1 Fortalecer las capacidades de combate a incendios.** Esta actividad comprende capacitaciones a instancias responsables para actuar en eventos de incendios, así como mejoras en el equipamiento y sistemas de detección temprana. Asimismo, contempla la realización de un estudio diagnóstico para la mejora de los programas de incendios forestales. **13.1.2 Realizar campañas de concientización y vigilancia para prevenir incendios forestales.**
13.2. Control de partículas fugitivas.	Se busca reducir la pérdida de cubierta vegetal en suelo urbano y forestal, con la finalidad de controlar la erosión eólica en suelos desprovistos de vegetación. La acción incluye actividades para identificar espacios susceptibles a la pérdida de vegetación y restaurar suelos forestales y áreas verdes urbanas (AVU). **13.2.1 Realizar un estudio de identificación de zonas susceptibles de pérdida de vegetación.** La finalidad es reorientar programas para reducir las superficies detectadas como erosionadas. **13.2.2 Controlar la emisión de partículas fugitivas en zonas desprovistas de vegetación y susceptibles de erosión eólica en AVU.** Se contempla la reforestación de estos sitios con ejemplares que tengan potencial de captura de partículas para incrementar los servicios ambientales que recibe la ciudadanía. **13.2.3 Controlar las emisiones de partículas fugitivas en zonas desprovistas de vegetación y susceptibles de erosión eólica en suelo forestal o con clasificación de valor ambiental.** Esta actividad se orienta hacia actividades de reforestación.

Medida 14.
Reducción de emisiones en fuentes misceláneas

Objetivo: Reducir las emisiones provenientes de fuentes de área misceláneas dentro de la ZMVM, principalmente a través de instrumentos regulatorios, cambios normativos y actividades de monitoreo y vigilancia.

Justificación: Dentro de las fuentes de área, es posible encontrar actividades emisoras misceláneas que se realizan cotidianamente y que no es posible agrupar en otras medidas. Por lo tanto, se plantea una medida separada que atienda a esta diversidad de fuentes significativas. Las fuentes específicas que se consideran en esta medida son:

- Emisiones de COV por la actividad de repintado automotriz, que genera emisiones no controladas de COV y compuestos tóxicos por el consumo de pinturas y solventes. Esta actividad se desarrolla principalmente en pequeños establecimientos y en vía pública, sin ningún control de emisiones. Considerando la complejidad para regular y vigilar la actividad en vía pública, se buscará crear una nueva norma que regule el contenido de COV en las pinturas y recubrimientos utilizados.
- Emisiones de COV durante la limpieza y recubrimiento de superficies industriales. El consumo de recubrimientos y limpiadores genera emisiones fugitivas de COV y compuestos tóxicos, y actualmente no existen límites normados que regulen su contenido en este tipo de productos.
- Emisiones provenientes de maquinaria agrícola y de construcción. La combustión, principalmente de diésel, genera altas emisiones de partículas finas. México no cuenta con una norma que regule las emisiones de escape de la maquinaria, ya sea nueva, usada o de importación, por lo que resulta necesario regular tanto el registro de las unidades como el uso de tecnologías de control de emisiones.
- Emisiones de COV durante la distribución y manejo de gasolinas en las estaciones de servicio. En ese sentido, si bien la NOM-004-ASEA-2017 define la eficiencia, mantenimiento y los parámetros de operación que deberán cumplir los Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV) para el control de emisiones en estaciones de servicio para expendio al público de gasolinas, es necesario mejorar la vigilancia del cumplimiento de la normativa y ampliar su alcance a toda la ZMVM.

Las categorías emisoras relevantes para la medida y su aporte a las emisiones totales se resume en la tabla 7.15:

Tabla 7.15 Emisiones de contaminantes por la gestión de residuos sólidos urbanos

Fuente contaminante	Emisiones en 2018 (t/año) PM2.5	COV	Carbono negro	Tóxicos
Total, ZMVM	16 500.1 **100.0%**	413 820.9 **100.0%**	2615.3 **100.0%**	122 004.8 **100.0%**
Total, fuentes de área	5906.1 **35.8%**	271 133.4 **65.5%**	554.7 **21.2%**	84 185.2 **69.0%**
Repintado automotriz	NA **-**	4071.2 **1.0%**	NA **-**	2862.0 **2.3%**
Recubrimiento de superficies industriales	NA **-**	2053.7 **0.5%**	NA **-**	1168.1 **1.0%**
Limpieza de superficies industriales	NA **-**	18 506.7 **4.5%**	NA **-**	18 691.8 **15.3%**

Tabla 7.15 Emisiones de contaminantes por la gestión de residuos sólidos urbanos *(continuación)*

Fuente contaminante	Emisiones en 2018 (t/año) PM2.5	COV	Carbono negro	Tóxicos
Maquinaria agrícola y de construcción	305.5 **1.9%**	366.4 **0.1%**	158.2 **6.0%**	184.1 **0.2%**
Distribución de gasolinas	NA **-**	8869.0 **2.1%**	NA **-**	3605.2 **3.0%**

Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Fuente: *Elaboración propia con base en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).*

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT, SE, SAT, PROFEPA y ASEA), Ciudad de México (SEDEMA), Estado de México (SMAGEM) y estaciones de servicio

Acciones y actividades:

14.1. Reducción de las emisiones fugitivas de COV por la actividad de repintado automotriz.

Esta acción se centra en abatir las emisiones COV generadas por la actividad de repintado automotriz.

14.1.1 Crear la Norma Oficial Mexicana, recubrimientos – límites máximos permisibles de contenido de compuestos orgánicos volátiles en recubrimientos de pintado automotriz.

14.2. Limitación del contenido de COV en productos de limpieza y recubrimientos de superficies industriales.

La acción reducirá las emisiones de COV generadas en la actividad del mantenimiento de superficies industriales, a través de la regulación de su contenido en limpiadores y recubrimientos industriales.

14.2.1 Crear la Norma Oficial Mexicana, limpiadores y recubrimientos – límites máximos permisibles de contenido de compuestos orgánicos volátiles en limpiadores y recubrimientos industriales.

14.3. Regulación de emisiones provenientes de la maquinaria fuera de ruta.

La acción se enfoca en reducir las emisiones de partículas y carbono negro mediante la elaboración de una norma que permita la regulación de la maquinaria agrícola y de construcción, el registro de la maquinaria y la verificación de los estándares de emisión establecidos, así como el desarrollo de lineamientos para maquinaria de construcción en obras de gobierno.

14.3.1 Elaborar una Norma Oficial Mexicana para maquinaria nueva de uso agrícola y de construcción, que incorpore límites máximos permisibles de emisión, así como los requisitos técnicos que debe cumplir el sector.

14.3.2 Establecer un registro para equipo y maquinaria fuera de ruta (maquinaria que no circula por carretera).

14.3.3 Desarrollar lineamientos ambientales para la maquinaria de construcción en la ejecución de obras de gobierno.

14.4. Monitoreo en estaciones de servicio.

La acción persigue la implementación de actividades de vigilancia y monitoreo directo en estaciones de servicio, para verificar y garantizar el cumplimiento de los SRV, así como una modificación a la NOM-004-ASEA-2017 para ampliar su alcance territorial y facilitar el monitoreo continuo.

14.4.1 Actualizar la NOM-004-ASEA-2017. Esta actualización considera aumentar el alcance territorial para cubrir a toda la ZMVM, y parámetros tecnológicos para la eficiencia, operación y mantenimiento de sistemas de medición remota.

14.4.2 Instalar sistemas de monitoreo remoto. Implica su instalación en cada estación de servicio, de forma gradual, y la posterior conexión a un sistema centralizado de detección a nivel federal.

Medida 15.
Comunicación y prevención de riesgos a la salud

Objetivo: Procurar la promoción de la salud y la reducción de la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos, a través de acciones regulatorias, la comunicación de riesgos y la generación de información que relacione la calidad del aire y la salud.

Justificación: En la ZMVM, la concentración de contaminantes en la atmósfera, en específico para O_3 y partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, supera los límites normados, así como los valores recomendados en las GCA de la OMS. Ante esta situación, se requiere mejorar las acciones encaminadas a comunicar el estado de la calidad del aire y reducir el riesgo de exposición de la población, tanto en eventos extraordinarios de contaminación severa como en el día a día. En este sentido, se detectan las siguientes áreas de oportunidad en la ZMVM:

- Actualizar las regulaciones que rigen la operación de los sistemas de monitoreo de calidad del aire, incluyendo estándares para la protección de la salud pública en relación con la concentración de contaminantes criterio y los métodos para la medición de los contaminantes en la atmósfera, y mejorar la comunicación del estado de la calidad del aire a la población en general.
- Incorporar nuevos lineamientos en los programas de contingencias atmosféricas, con el objeto de reducir la exposición de la población y con ello disminuir los efectos adversos a la salud humana durante episodios extraordinarios de contaminación severa.
- Informar de manera clara y oportuna a la población sobre el estado general de la calidad del aire y los posibles riesgos asociados a los niveles de contaminación, para que implementen acciones que reduzcan su exposición.
- Concientizar a la población sobre las fuentes principales de contaminantes atmosféricos y las acciones que pueden ejecutar para contribuir a mejorar la calidad del aire.
- Fortalecer la integración y coordinación entre el sector salud y el sector ambiental, a través de la generación de información de eventos en salud relacionados con la contaminación del aire en la ZMVM, para sustentar el diseño, implementación y evaluación de políticas públicas dirigidas a proteger la salud de la población.

Entidades responsables: Gobierno Federal (COFEPRIS y SEMARNAT), CAMe, Ciudad de México (SEDEMA, SEDESA, SSP y APS), Estado de México (SMAGEM y Secretaría de Salud) y Estado de Hidalgo (SEMARNATH)

Acciones y actividades:

15.1. Regulación de calidad del aire para protección a la salud.	La acción busca actualizar y desarrollar normatividad relacionada con las actividades de monitoreo atmosférico, con la finalidad de optimizar la medición y difusión de la información de calidad del aire, en beneficio de la salud de la población. **15.1.1 Elaborar una norma de salud ambiental que establezca límites permisibles de compuestos tóxicos (BTX[11]) en el aire ambiente y criterios para su evaluación.** **15.1.2 Actualizar los estándares nacionales de salud ambiental que establecen límites permisibles de contaminantes criterio en el aire ambiente como medida para la protección a la salud.** Se propone actualizar las siguientes normas: NOM-020-SSA1-2014, NOM-021-SSA1-1993, NOM-023-SSA1-1993, NOM-025-SSA1-2014 y NOM-026-SSA1-1993. **15.1.3 Revisar los criterios establecidos en la NOM-172-SEMARNAT-2019,** Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. Se contempla publicar una norma que considere los cambios en las normas de salud ambiental. **15.1.4 Actualizar, o en su caso, definir nuevos métodos de medición de contaminantes criterio en el aire ambiente y sus especificaciones de operación.** Se propone actualizar las normas NOM-034-SEMARNAT-1993, NOM-035-SEMARNAT-1993, NOM-036-SEMARNAT-1993, NOM-037-SEMARNAT-1993 y NOM-038-SEMARNAT-1993, así como crear una NOM para el método de medición y monitoreo de partículas suspendidas menores o igual a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente). **15.1.5 Actualizar la NOM-156-SEMARNAT-2012,** Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.
15.2. Actualización del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas.	Esta acción contempla el desarrollo de instrumentos regulatorios y mecanismos de comunicación, para su aplicación en episodios de contingencia ambiental atmosférica, con el objetivo de reducir la exposición y proteger la salud de la población. En este sentido, cualquier actualización regulatoria deberá considerar los ajustes resultantes de otras medidas y acciones, para que sean sinérgicas con el programa de contingencias. **15.2.1 Actualizar el programa de contingencias atmosféricas de la ZMVM.** Este podrá contemplar nuevos umbrales de concentración, criterios distintos para su activación, así como medidas y acciones aplicables, competencias, exenciones y sanciones, entre otros apartados. **15.2.2 Desarrollar mecanismos de seguimiento y operación del programa de contingencias atmosféricas.**
15.3. Desarrollo e implementación de una Estrategia Integral de Comunicación de Calidad del Aire.	El objetivo de esta acción es la concientización y educación de la población en general, a través de la generación de información veraz, relevante y oportuna sobre los niveles de contaminación en el aire ambiente, así como las condiciones apropiadas para que la ciudadanía tome acciones individuales para reducir su exposición y contribuir a la mitigación de emisiones. La Estrategia también se enfoca en construir capacidades y recabar el apoyo de múltiples actores que deben involucrarse en la gestión de la calidad del aire a nivel local. Los lineamientos de la Estrategia se detallan en el Capítulo 8. **15.3.1 Diseñar una Estrategia Integral de Comunicación, sensibilización y participación ciudadana para reducir la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos y reducir las emisiones.** **15.3.2 Celebrar convenios de colaboración con actores relevantes que apoyen la Estrategia Integral de Comunicación y para informar sobre el estado de la calidad del aire a la población.** **15.3.3 Implementar una aplicación para alertas personalizadas sobre el estado de la calidad del aire y el índice ultravioleta (UV).** **15.3.4 Fortalecer la difusión de información a través de diferentes canales de comunicación.** Entre estos se consideran sitios web, aplicaciones para teléfonos móviles y publicaciones en redes sociales. **15.3.5 Fomentar la capacitación del personal del sector salud y educativo para incrementar el conocimiento del problema de calidad del aire y el uso de las herramientas de difusión para protección de la salud.** **15.3.6 Implementar un programa de difusión de información de calidad del aire en áreas rurales,** enfocado a la reducción de quema de biomasa en viviendas. **15.3.7 Evaluar el establecimiento de sistemas adicionales para la difusión de información de calidad del aire y contingencias ambientales en zonas rurales y urbanas.** **15.3.8 Instrumentar un programa para reducir la exposición personal por la elaboración artesanal de ladrillos.**

11 Benceno, Tolueno y Xilenos.

15.4. Integración de un sistema de información en salud y calidad del aire de la ZMVM.	Esta acción se enfoca en evaluar la factibilidad y, en su caso, establecer un sistema de información en salud y calidad del aire de la ZMVM, con el objetivo de recolectar, integrar, analizar y publicar información de eventos en salud relacionada a la exposición aguda y crónica a la contaminación del aire en la ZMVM, y que sirva como herramienta para la toma de decisiones. **15.4.1 Diseñar y actualizar de forma continua y colaborativa una plataforma digital de información en calidad del aire y salud de la ZMVM.** **15.4.2 Generar espacios de encuentro, colaboración y presentación, discusión y traducción de la evidencia científica en propuestas de política pública en materia de calidad del aire y salud,** para informar la práctica clínica. **15.4.3 Consolidar el Sistema de vigilancia epidemiológica de efectos a la salud relacionados con la contaminación atmosférica (SIVEESCA)** como una herramienta para la toma de decisiones y ampliar su cobertura a la ZMVM.

Medida 16.
Seguimiento institucional

Objetivo: Garantizar una correcta implementación del ProAire y el cumplimiento de sus objetivos, a través de lineamientos para la evaluación, financiamiento y difusión de resultados, así como la integración de tecnologías de vanguardia para desarrollar mecanismos de seguimiento institucional en los diferentes niveles de gobierno.

Justificación: Con el seguimiento y evaluación adecuados, se podrán detectar desviaciones en la ejecución del ProAire, implementar medidas correctivas para garantizar el cumplimiento de las metas y facilitar la difusión de los resultados a partes interesadas y la población en general. Existe un área de oportunidad para establecer un sistema de seguimiento de vanguardia a través de plataformas o repositorios digitales e interinstitucionales, que aprovechen las tecnologías de la información para la recolección de datos de interés (seguimiento a indicadores, reportes de emisiones en sectores específicos, trámites), su procesamiento y subsecuente análisis.

Asimismo, las medidas del ProAire ZMVM 2021-2030 requieren de recursos financieros para su instrumentación, ya sea para contratar personal, adquirir tecnología, realizar obras, operar y mantener infraestructura, realizar investigaciones y estudios, entre otros. En ese sentido, contar con una estrategia de financiamiento es necesario para superar retos asociados a limitantes en el gasto público, elevadas inversiones iniciales, costos operativos a largo plazo, obstáculos legales e institucionales para la asignación o etiquetado de recursos constantes, entre otros.

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT, SE y ASEA), Ciudad de México (SEDEMA), Estado de México (SMAGEM) y Estado de Hidalgo (SEMARNATH)

Acciones y actividades:

16.1. Evaluación, seguimiento y difusión periódica de los resultados de implementación del ProAire ZMVM 2021-2030.	Esta acción tiene por objetivo definir estrategias para el seguimiento sistemático de la ejecución de las medidas y sus resultados, para detectar a tiempo las desviaciones de los programas establecidos en las rutas críticas de cada medida y establecer acciones de corrección o aceleramiento durante la ejecución del Programa. Asimismo, establece la periodicidad para hacer públicos los resultados del ProAire. Las siguientes actividades apoyan la mejora continua del ProAire, la transparencia y la rendición de cuentas. **16.1.1 Desarrollar instrumentos para el seguimiento y reporte del avance de las medidas del ProAire.** Se propondrá un instrumento para el seguimiento y cumplimiento de metas que sea la base para el informe de resultados y se evaluará la implementación de un sistema de reporte para el seguimiento sistemático. **16.1.2 Realizar evaluaciones periódicas del avance del ProAire.** Se llevarán a cabo evaluaciones integrales para identificar áreas de oportunidad y ajustar acciones, además de una evaluación para fortalecer la política ambiental.

	16.1.3 Comunicar a la población sobre el progreso del ProAire de manera periódica.
16.2. Establecimiento de plataformas de seguimiento institucional para sectores altamente contaminantes.	La acción se enfoca en integrar tecnologías de vanguardia que propicien la intercomunicación entre las entidades responsables de la verificación de cumplimiento de la normatividad y actores regulados, y agilicen la tramitología actual. En este sentido, se prevé que esta acción genere información relevante para el seguimiento del ProAire y para la creación y evaluación de otras políticas públicas. **16.2.1 Desarrollar sistemas de reporte de desempeño ambiental,** para compartir información entre dependencias locales y federales. Se busca apoyar a las actividades de seguimiento y vigilancia, así como la agilización de permisos y autorizaciones. Se evaluará la recolección de datos sobre las mediciones realizadas por sistemas de monitoreo continuo, así como permisos y autorizaciones que se otorgan en materia ambiental (COA, LAU-CDMX, COI, entre otros).
16.3. Estrategia Integral de Financiamiento.	Desarrollar e implementar una Estrategia Integral de Financiamiento (EIF) permitirá asegurar la disponibilidad de fondos estables y suficientes para lograr la correcta implementación de las medidas del Programa. Los lineamientos y principios rectores de la Estrategia se detallan en el Capítulo 9. **16.3.1 Elaborar la EIF según cuatro principios** (Sostenibilidad Financiera, Practicidad Económica, Corresponsabilidad e Involucramiento del Sector Privado, Académico y Social, y Colaboración Internacional). **16.3.2 Implementar la EIF.** Esta actividad consiste en definir plazos, realizar modificaciones legales, actualizar o crear instrumentos fiscales, económicos y de fomento, crear fondos ambientales, establecer alianzas público-privadas, emitir bonos, crear convenios de colaboración y llevar a cabo otras actividades, según se contemple en la EIF.

Medida 17.
Mejora del monitoreo ambiental

Objetivo: Mejorar el monitoreo de calidad del aire en relación con las concentraciones de contaminantes normados y precursores del smog fotoquímico en la ZMVM.

Justificación: El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) tiene una cobertura metropolitana y es la herramienta principal para generar y difundir información sobre la calidad del aire, prevenir y alertar a la población en episodios de alta contaminación, así como para el seguimiento y la generación de conocimiento científico que apoya a la gestión de calidad del aire. No obstante, el SIMAT cubre entre el 60% y 75% de la población de la ZMVM dependiendo del contaminante medido. A este sistema se suma una estación en Tizayuca, operada por el Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo, en tanto que, en los municipios de Huixquilucan e Ixtapaluca, en el Estado de México, la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de Toluca instaló estaciones de monitoreo automático, las cuales se espera que entren en operación en los primeros años a partir de la publicación de este documento.

Para fortalecer el monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM, se requiere de desarrollo tecnológico, capacitación a operadores, lineamientos para la validación y control de calidad de la información generada. Asimismo, se debe evaluar la posibilidad de complementar el monitoreo con sensores más económicos y versátiles, siempre y cuando se desarrollen criterios de calidad y objetivos específicos para su uso, operación, validación de datos y difusión. Finalmente, dado que en la ZMVM interactúan autoridades de tres entidades federativas, también se requieren mecanismos homologados de comunicación y coordinación entre las instituciones que participan en el monitoreo de calidad del aire dentro de la ZMVM.

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT e INECC), Ciudad de México (SEDEMA y SEDESA), Estado de México (SMAGEM y Secretaría de Salud) y Estado de Hidalgo (SEMARNATH y Secretaría de Salud)

Acciones y actividades:

17.1. Operación de las redes de monitoreo ambiental.	La acción se enfoca en mejorar el monitoreo de calidad del aire de contaminantes normados y precursores del smog fotoquímico con el uso de métodos tradicionales y de otras tecnologías en la ZMVM, así como en fortalecer la coordinación a nivel metropolitano. **17.1.1 Medir la concentración en el aire ambiente de compuestos que participan en la producción de ozono, partículas finas y tóxicos no normados.** **17.1.2 Mejorar la coordinación entre los sistemas de monitoreo metropolitanos para el Valle de México.** **17.1.3 Evaluar y, en su caso, complementar la medición de contaminantes criterio y otros compuestos con nuevas tecnologías** (sensores de bajo costo, satelital, otras). Se determinará la factibilidad de uso de tecnologías no reguladas.

17.1.4 Asegurar la operación eficiente de las redes de monitoreo de contaminantes normados.

17.1.5 Realizar la evaluación quinquenal de la cobertura espacial del monitoreo de contaminantes normados y determinar la necesidad de modificar la configuración de la red, ya sea por incremento de la cobertura o reubicación de estaciones.

Medida 18.
Control de contaminación en el corredor industrial de Tula-Vito-Apasco

Objetivo: Reducir las emisiones en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, para coadyuvar a evitar el incremento de contaminantes que afectan la calidad del aire local de la ZMVM.

Justificación: Si bien la región de Tula, Hidalgo, se ubica fuera de los límites de la ZMVM, en ella se concentra una importante actividad industrial que resulta en emisiones significativas de SO2 , que impactan en la calidad del aire de la zona metropolitana. En específico, se destacan las emisiones por la generación de energía eléctrica y la industria del petróleo y petroquímica, en dos fuentes puntuales de jurisdicción federal: la planta termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la refinería Miguel Hidalgo de Petróleos Mexicanos (PEMEX).

El consumo de combustóleo en estas instalaciones, entre otras actividades, resulta en la emisión de 45 veces más SO_2 que el resto de las fuentes de la ZMVM. Como los vientos predominantes soplan del norte hacia el sur durante la mayor parte del año, y dado que la ZMVM se ubica viento abajo del corredor industrial antes referido, los contaminantes atmosféricos son transportados desde Tula hacia la Zona Metropolitana. Por ejemplo, las estaciones de monitoreo atmosférico localizadas en el noroeste de la ZMVM registran los mayores niveles de SO_2. Diversos estudios y campañas de medición también muestran cómo las emisiones generadas en el corredor pueden transportarse hacia la ZMVM bajo diferentes condiciones meteorológicas, y tienen un aporte significativo en la concentración de SO_2 local12. Por lo tanto, para mejorar la calidad del aire local también se requieren acciones encaminadas a reducir el uso de combustibles fósiles con elevado contenido de azufre en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco.

Entidades responsables: Gobierno Federal (SENER, ASEA, SEMARNAT y PROFEPA) y Estado de Hidalgo (PROESPA)

12 Para más información, consultar la sección 5.5.1 en el Capítulo 5.

Acciones y actividades:

18.1. Control de contaminación en el corredor industrial de Tula-Vito-Apasco.	Esta acción busca reducir las emisiones en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco. Se propone que la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y la refinería Miguel Hidalgo cambien sus procesos y/o el combustible empleado, así como acciones de inspección y vigilancia en todo el sector industrial del corredor. **18.1.1 Reducir las emisiones de SO_2 en la generación de energía eléctrica de autoabastecimiento en la refinería Miguel Hidalgo.** **18.1.2 Reducir las emisiones de SO_2 en la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos.** **18.1.3 Elaborar un programa de inspección de cumplimiento normativo, para establecer acciones de reducción de emisiones en el sector industrial del corredor.** Dicho programa contempla medidas correctivas (instalación de monitores continuos de emisiones o de sistemas de control, entre otras) para garantizar el cumplimiento ambiental y la reducción de emisiones.

Medida AI.
Investigación para mejorar la gestión de la calidad del aire y la salud de la población

Objetivo: Realizar proyectos y estudios, con base en una agenda de investigación, para informar el diseño, implementación y evaluación de políticas públicas para mejorar la calidad del aire de la ZMVM y proteger la salud de la población.

Justificación: La colaboración científica entre la comunidad académica y el gobierno aumenta el entendimiento de las causas y efectos de la contaminación atmosférica. A su vez, esta información sirve como evidencia para desarrollar, implementar y evaluar los programas de calidad del aire. A lo largo del desarrollo del presente ProAire, se identificaron los principales temas, oportunidades, problemas y retos actuales para mejorar la calidad del aire, con el apoyo de investigadores expertos en el tema, y hacia los cuales tendrían que dirigirse los esfuerzos de investigación. Este trabajo se basó en la revisión de documentos producto del trabajo colectivo de la comunidad científica en materia de contaminación atmosférica (ICM *et al*., 2018; INECC *et al*., 2019; PNUD & INECC, 2018). Asimismo, se tomaron en cuenta las necesidades mencionadas por las autoridades ambientales de las entidades federativas que conforman la ZMVM. Por último, el Comité Científico Técnico de Vigilancia sobre la Contaminación Atmosférica de la Ciudad de México también aportó insumos, y los resultados del proceso participativo para la integración del ProAire ZMVM 20021-2030 permitieron complementar el proceso. Este trabajo hizo posible la integración de una **Agenda de Investigación**, que se resume en la medida AI y sus tres acciones.

Para comprender mejor los cambios en la química atmosférica y los procesos que actualmente controlan la formación de O_3 y partículas en la ZMVM, es fundamental llevar a cabo estudios enfocados en investigar la sensibilidad del O_3 a los COV y NO_X, la formación de especies secundarias y la emisión de contaminantes provenientes de otras fuentes, o bien el cambio en las tasas de emisión de las existentes. También es importante incluir un análisis sobre los posibles impactos del cambio climático sobre la meteorología local y regional, así como en la química y la contaminación atmosféricas.

Por otro lado, se detectan necesidades de investigación para mejorar el inventario de emisiones de la ZMVM. En específico, se requiere de la actualización de factores de emisión, el diagnóstico de categorías no reguladas para mejorar los datos de actividad y la incorporación de fuentes no contempladas actualmente.

Finalmente, también se observa la necesidad de generar conocimiento sobre los impactos en la salud asociados con la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos. Se requieren más estudios toxicológicos y epidemiológicos locales de efectos agudos y crónicos a la salud, en relación con los niveles de calidad del aire y con especial atención a los grupos de población más vulnerables.

Entidades responsables: Gobierno Federal (SEMARNAT), Ciudad de México (SEDEMA y SEDESA), Estado de México (SMAGEM y Secretaría de Salud) y Estado de Hidalgo (SEMARNATH)

Acciones y actividades:

AI.1. Investigación en calidad del aire y química atmosférica.	Esta acción se enfoca en realizar proyectos de investigación para comprender los cambios en los complejos procesos atmosféricos y garantizar que el inventario y los modelos de calidad del aire proporcionen información confiable para evaluar las medidas de control propuestas. **AI.1.1 Celebrar convenios de coordinación para el financiamiento de proyectos de investigación en temas prioritarios.** **AI.1.2 Desarrollar estudios de los cambios en los procesos de contaminación y química atmosférica para reducir la concentración de O_3 y partículas $PM_{2.5}$.** **AI.1.3 Realizar estudios para determinar los procesos de formación de contaminantes secundarios, producción de radicales y diferenciación de periodos** (diurno y nocturno). **AI.1.4 Desarrollar proyectos de investigación para mejorar la gestión de la calidad del aire y mitigar el cambio climático.** Se propone evaluar los impactos del cambio climático en la calidad del aire (penalización climática, cambios en el clima, afectaciones sobre la vegetación e infraestructura, entre otros). **AI.1.5 Desarrollar proyectos de investigación para mejorar el sistema de pronóstico y modelación de la calidad del aire.**
AI.2. Investigación para mejorar el inventario de emisiones.	La acción busca impulsar la mejora del inventario de emisiones de contaminantes, compuestos tóxicos y gases y compuestos de efecto invernadero de la ZMVM, así como reducir la incertidumbre de las estimaciones, a través de actividades de investigación concretas que permitan incrementar la precisión y el nivel de desagregación de las emisiones contaminantes. **AI.2.1 Realizar diagnósticos de emisiones provenientes de fuentes de área para determinar factores de emisión y/o datos de actividad.** **AI.2.2 Evaluar la representatividad y precisión de la especiación y estimación de emisiones de COV en el inventario de emisiones,** así como las fuentes de área que faltan de caracterizar. **AI.2.3 Actualizar continuamente los factores de emisión y datos de actividad con base en mediciones directas y encuestas de fuentes claves de emisión,** así como la aplicación de técnicas y metodologías de evaluación y reporte.

AI.3. Investigación en salud.

Esta acción describe las necesidades de investigación detectadas para generar conocimiento sobre los impactos en la salud asociados con la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos.

AI.3.1 Plantear estudios toxicológicos y epidemiológicos locales de efectos agudos y crónicos a la salud por la contaminación atmosférica diferenciados por género y grupo etario.

AI.3.2 Proponer investigaciones sobre los impactos a la salud por la calidad del aire en la ZMVM, diferenciados por género, grupo etario o factores socioeconómicos.

AI.3.3 Proponer la evaluación de los impactos a la salud diferenciados por grupos vulnerables y los impactos económicos de las acciones implementadas para mejorar la calidad del aire.

7.5 Costos y beneficios de la implementación del ProAire

El beneficio principal de las medidas del ProAire ZMVM 2021-2030 es la reducción de emisiones de contaminantes criterio y sus precursores, para así mejorar la calidad del aire y proteger la salud de la población. Asimismo, la implementación de las distintas acciones también permite reducir la generación de gases de efecto invernadero y contaminantes de vida corta que potencian el cambio climático. Además de esto, se registran distintos cobeneficios en términos del fortalecimiento institucional, generación y difusión de información de calidad del aire y salud y, de forma general, una mejor calidad de vida de la población de la metrópoli.

7.5.1 Reducciones en emisiones

A continuación, se resumen las reducciones en emisiones esperadas de la implementación del ProAire. Estas se pueden expresar de dos formas distintas. En primer lugar, se tienen las reducciones acumuladas, esto es, las toneladas totales de contaminantes que no serán liberadas a la atmósfera por la ejecución del Programa durante la totalidad de su periodo de implementación. La Tabla 7.16 presenta las reducciones acumuladas en las emisiones de contaminantes criterio y sus precursores, por medida, para el periodo 2021-2030; la Tabla 7.17 muestra la misma información, pero para compuestos y gases de efecto invernadero. En las fichas del Anexo 7 es posible encontrar las reducciones acumuladas por acción, para el periodo 2021-2024 y 2021-2030.

Tabla 7.16 Reducciones acumuladas en emisiones de contaminantes

Medidas		Reducciones acumuladas (toneladas) en el periodo 2021-2030						
No.	**Sector**	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**	**SO_2**	**CO**	**NO_x**	**COV**	**Tóxicos**
1	Transporte de carga	16 632	13 697	-	4145	68 380	26 415	8800
2	Transporte particular individual	9824	3452	605	702 469	283 530	252 737	87 084
3	Transporte público de pasajeros	11 809	8227	763	300 233	110 339	86 774	3634
4	Sector doméstico	80	80	272	440	299	241 691	43 926
5	Gas L.P. en los sectores industrial, comercial y de servicios	6	6	1	19	83	7322	854
6	Vialidades	5621	1242	-	-	-	-	124
7	Labranza y cosecha	1432	318	-	-	-	-	-
8	Industria	4074	2831	1682	1483	520	24 508	13 476
9	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	2939	2938	-	-	8715	-	-
10	Quema a cielo abierto	11 478	10 883	680	115 228	4081	15 716	12 435
11	Residuos sólidos	-	-	-	1338	-	1558	2381
12	Aguas residuales	-	-	-	-	-	10 398	5633
13	Fuentes naturales	963	257	-	381	-	-	9
14	Fuentes misceláneas	206	200	1	1097	1358	67 062	36 710
Total		**64 891**	**43 960**	**4003**	**1 124 119**	**476 710**	**734 181**	**215 065**

Notas: Los números rojos representan incrementos en las emisiones. Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Las medidas 1 (acción 1.3) y 2 (acción 2.2), además de estimar reducciones netas en emisiones, también contribuyen con emisiones evitadas; esto se refiere a que se dejan de emitir en horarios y zonas restringidas, sin embargo, se liberarán al aire en otras zonas de la ZMVM. En la tabla se muestran las emisiones netas mitigadas, mientras que las fichas descriptivas por acción resumen el beneficio tanto de reducciones mitigadas como evitadas. Por lo tanto, al sumar los beneficios en emisiones de las fichas de las medidas 1 y 2, el total es distinto al valor mostrado arriba.

La ficha descriptiva de la acción 2.4 señala reducciones en emisiones asociadas a una serie de intervenciones urbanas, con fines meramente ilustrativos. Los datos fueron obtenidos de un ejercicio conjunto entre la SEMOVI, SEDEMA y CAPSUS en 2019, mediante la plataforma Urban Performance, la cual evalúa emisiones bajo distintos de escenarios de crecimiento urbano. Estas reducciones no se incluyen en la sumatoria de la medida 2, ni el total de reducciones acumuladas del ProAire ZMVM 2021-2030, dado que no corresponden únicamente a emisiones del sector transporte, y podrían implicar un doble conteo de emisiones.

Las medidas 15, 16, 17 y AI no cuentan con estimaciones, dado que no inciden directamente en la reducción de emisiones o estas no fueron estimadas. La medida 18, si bien sí reduce emisiones en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, estas ocurren fuera de la ZMVM, por lo que no se contabilizan para fines de reporte.

Fuente: *Estimaciones de la SEDEMA (2021).*

Tabla 7.17 Reducciones acumuladas en emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero

Medidas		Reducciones acumuladas (toneladas) en el periodo 2021-2030				
No.	**Sector**	**Carbono negro**	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**	**CO_2eq**
1	Transporte de carga	2196	-	-	-	-
2	Transporte particular individual	575	44 028 335	2330	1206	44 413 084
3	Transporte público de pasajeros	2876	18 678 296	5611	692	19 018 796
4	Sector doméstico	5	35 558	76	<1	37 709
5	Gas L.P. en los sectores industrial, comercial y de servicios	<1	146 698	6	<1	146 917
6	Vialidades	111	-	-	-	-
7	Labranza y cosecha	-	-	-	-	-
8	Industria	150	5548	<1	<1	5609
9	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	1128	-	-	-	-
10	Quema a cielo abierto	816	2 179 406	25 369	-	2 889 750
11	Residuos sólidos	-	-	336 548	808	9 209 098
12	Aguas residuales	-	-	26 470	157	782 657
13	Fuentes naturales	<1	8341	19	1	9181
14	Fuentes misceláneas	103	167 312	81	1	169 710
Total		**7950**	**65 178 378**	**396 359**	**1248**	**76 607 093**

Notas: Los números rojos representan incrementos en las emisiones.

Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Las medidas 1 (acción 1.3) y 2 (acción 2.2), además de estimar reducciones netas en emisiones, también contribuyen con emisiones evitadas; esto se refiere a que se dejan de emitir en horarios y zonas restringidas, sin embargo, se liberarán al aire en otras zonas de la ZMVM. En la tabla se muestran las emisiones netas mitigadas, mientras que las fichas descriptivas por acción resumen el beneficio tanto de reducciones mitigadas como evitadas. Por lo tanto, al sumar los beneficios en emisiones de las fichas de las medidas 1 y 2, el total es distinto al valor mostrado arriba.

La ficha descriptiva de la acción 2.4 señala reducciones en emisiones asociadas a una serie de intervenciones urbanas, con fines meramente ilustrativos. Los datos fueron obtenidos de un ejercicio conjunto entre la SEMOVI, SEDEMA y CAPSUS en 2019, mediante la plataforma Urban Performance, la cual evalúa emisiones bajo distintos de escenarios de crecimiento urbano. Estas reducciones no se incluyen en la sumatoria de la medida 2, ni el total de reducciones acumuladas del ProAire ZMVM 2021-2030, dado que no corresponden únicamente a emisiones del sector transporte, podrían implicar un doble conteo de emisiones.

Las medidas 15, 16, 17 y AI no cuentan con estimaciones, dado que no inciden directamente en la reducción de emisiones o estas no fueron estimadas. La medida 18, si bien sí reduce emisiones en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco, estas ocurren fuera de la ZMVM, por lo que no se contabilizan para fines de reporte.

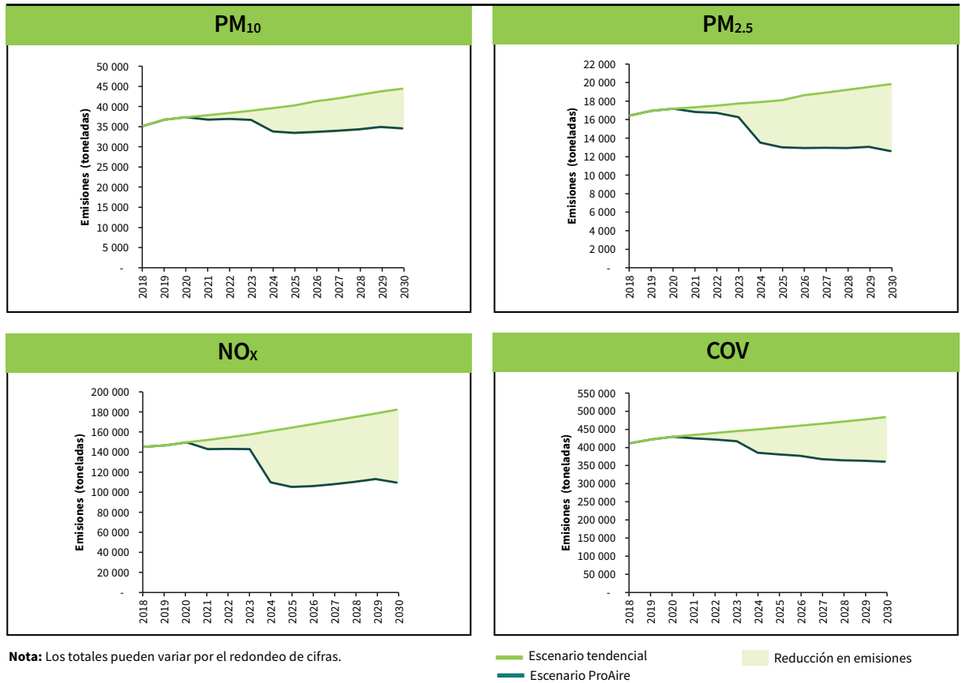
Fuente: *Estimaciones de la SEDEMA (2021).*

La segunda forma de expresar las reducciones en emisiones es respecto de un escenario tendencial de emisiones[13]. En este caso, se compara el crecimiento de las emisiones sin la implementación de acciones o políticas, con las reducciones anuales esperadas de la implementación del ProAire. Este enfoque permite determinar un porcentaje de reducción de emisiones a 2030. La Figura 7.3 resume las reducciones en emisiones en el año 2030, respecto del escenario tendencial, y muestra gráficamente el comportamiento de las emisiones para los cuatro contaminantes prioritarios en la ZMVM, sin y con la implementación del ProAire.

13 Los resultados del escenario tendencial de emisiones se describen en el Capítulo 5.

	Emisiones en 2030 (toneladas)		
Contaminante	**Escenario tendencial**	**Escenario de aplicación del ProAire**	**Reducción en emisiones**
PM_{10}	44 765	34 167	**23.7%**
$PM_{2.5}$	19 895	12 655	**36.4%**
SO_2	3655	2932	**19.8%**
CO	1 029 954	868 697	**15.7%**
NO_x	181 792	108 651	**40.2%**
COV	486 555	361 243	**25.8%**
NH_3	50 413	49 916	**1.0%**

	Emisiones en 2030 (toneladas)		
Contaminante	**Escenario tendencial**	**Escenario de aplicación del ProAire**	**Reducción en emisiones**
Carbono negro	3377	2056	**39.1%**
Tóxicos	151 490	115 938	**23.5%**
CO_2	85 759 158	76 794 472	**10.5%**
CH_4	357 987	275 345	**23.1%**
N_2O	3006	2816	**6.3%**
CO_2eq	96 582 363	85 253 340	**11.7%**



Nota: Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Figura 7.3 Reducción de emisiones en 2030 y escenarios para contaminantes prioritarios

Fuente: *Elaboración propia con base en estimaciones de la SEDEMA (2021).*

7.5.2 Costo de implementación

El costo total de la implementación del ProAire se estima en **$280.71 mil millones de pesos mexicanos**, a precios de 2021. El costo por medida se presenta en la Tabla 7.18. Si bien este valor contempla el costo de la medida 18, que atiende las emisiones de SO_2 provenientes del corredor Tula-Vito-Apasco, se puntualiza que las acciones de dicha medida atienden dos fuentes fijas de jurisdicción exclusivamente federal.

Al cuantificar los recursos económicos necesarios para la gestión de la calidad del aire, resulta relevante comparar las reducciones en emisiones con los costos de implementación, para así determinar un valor de costo-efectividad. Dado que las distintas medidas inciden en la reducción de emisiones de diferentes contaminantes, y que estas, a su vez, están compuestas por acciones específicas dirigidas a una fuente y/o contaminante particular, se recomienda revisar la información del costo-efectividad por acción, que está disponible en las fichas descriptivas del Anexo 7. Al comparar el costo de reducir una tonelada de un contaminante concreto a través de una acción específica, es posible observar qué acciones son las más efectivas, en términos de los recursos necesarios para mitigar las emisiones, y cuya implementación debería ser prioritaria.

Tabla 7.18 Costos de implementación de las medidas del ProAire ZMVM 2021-2030

Medida No.	Sector	Costo de implementación (M.N.)	Medida No.	Sector	Costo de implementación (M.N.)
1	Transporte de carga	$34,981,900,000	11	Residuos sólidos	$5,410,300,000
2	Transporte particular individual	$98,546,200,000	12	Aguas residuales	$368,700,000
3	Transporte público de pasajeros	$112,787,800,000	13	Fuentes naturales	$410,000,000
4	Sector doméstico	$707,900,000	14	Fuentes misceláneas	$19,000,000
5	Gas L.P. en los sectores industrial, comercial y de servicios	$25,900,000	15	Comunicación y prevención de riesgos a la salud	$110,000,000
6	Vialidades	$1,854,900,000	16	Seguimiento institucional y urbanización sustentable	$28,700,000
7	Labranza y cosecha	$29,000,000	17	Monitoreo ambiental	$521,800,000
8	Industria	$23,100,000	18	Corredor industrial Tula-Vito-Apasco	$24,385,300,000
9	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica	$900,000	AI	Agenda de investigación	$304,000,000
10	Quema a cielo abierto	$201,700,000	**Total**		**$280,717,100,000**

Fuente: *Estimaciones de la SEDEMA (2021).*



7.5.3 Beneficios en la calidad del aire y salud

Reducir las emisiones en un sistema urbano no garantiza una disminución proporcional en los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos, en particular cuando se trata de contaminantes secundarios. Estos últimos dependen de los cambios en la emisión de sus precursores y la relación entre ellos, así como de las condiciones fisiográficas y meteorológicas de la zona.

Considerando lo anterior, para evaluar los beneficios que tendrían las reducciones en emisiones por la aplicación del ProAire ZMVM 2021-2030, se requiere de herramientas que, en primer lugar, puedan simular los cambios en las concentraciones de contaminantes primarios y secundarios, para después estimar los beneficios en salud y económicos asociados (por ejemplo, mortalidad evitable).

Como se ha expuesto anteriormente, entre los objetivos del presente ProAire se encuentran, reducir la concentración de partículas finas ($PM_{2.5}$), así como las concentraciones máximas de O_3, con el fin de proteger la salud de la población y toda vez que son los contaminantes de mayor problema en la ZMVM. En el caso de ozono, se busca también que el ProAire contribuya a reducir los valores máximos para poder prevenir eventos de contingencias ambientales.

A continuación, se presentan los resultados de algunas evaluaciones que permiten dimensionar los beneficios en la calidad del aire y en salud, por la ejecución del ProAire. Los resultados se presentan para las $PM_{2.5}$, el O_3, y para el NO_2, este último mostró beneficio considerable.

Otros contaminantes, así como la descripción metodológica pueden ser consultados en el Anexo 7.2. Es importante comentar que estos resultados corresponden a un escenario condicionado, en el que se cumpla la implementación en tiempo y forma de las medidas evaluadas.

Beneficios en la calidad del aire

Con el objetivo de estimar el impacto del ProAire ZMVM 2021-2030 en las concentraciones de los contaminantes criterio y sus precursores al año 2030, se utilizó el sistema de pronóstico de calidad del aire para la Ciudad de México (AQFS-CDMX). La evaluación del ProAire se realizó considerando como base el inventario de emisiones 2018, y apartir de estas emisiones se desarrollaron factores que representaron el cambio en las emisiones, con y sin la aplicación del ProAire en el año 2030, para su modelación en el sistema de pronóstico.

A continuación se realizó la comparación de la concentración de contaminantes entre el escenario modelado de la línea base 2030 y el del ProAire ZMVM 2030. Para el análisis del impacto en la calidad del aire, se calcularon los indicadores del promedio anual de los máximos diarios (1h) para los contaminantes gaseosos, el máximo horario de O_3, y en el caso de las $PM_{2.5}$, se obtuvo la media anual de los promedios de 24 horas, así mismo, de estos indicadores se obtuvo el valor máximo por celda.

Finalmente se realizó un análisis por región, en el cual se obtuvo el valor promedio de las métricas mencionadas para cada una de las zonas y se analizaron sus diferencias entre el escenario con y sin ProAire (ver clasificación de regiones en el Anexo 7.2).

La modelación determinó que los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ promedio para toda la ZMVM serían ~22% (~4 µg/m^3) menores en el escenario con aplicación del ProAire, donde la mayor reducción ocurrió en las regiones del centro (CE) y suroeste (SO) de la ZMVM.

Los resultados obtenidos indicaron que la implementación del ProAire ZMVM 2021-2030, reduciría el promedio anual de los máximos diarios de O_3 en ~2% (~3 ppb) en toda la ZMVM (Ver Figura 7.4) y, si sólo se considera el valor máximo horario de O_3, la reducción sería de hasta el ~7% (~13 ppb) con la aplicación del ProAire.

En cuanto a la modelación de los compuestos orgánicos volátiles (COV), se presentó una reducción del 29% en el promedio anual de los datos horarios, para todo el periodo en la ZMVM (Ver Figura 7.4).

Por otro lado, la reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) fue del 40% en el promedio anual para todo el periodo en la ZMVM, así mismo se observó una disminución de ácido nitroso (HONO) de hasta ~35%, el cual también participa en la formación y acumulación del O_3 y de las $PM_{2.5}$ secundarias.

Las modelaciones de la calidad del aire, determinaron que se requiere reducir más del 70% de las emisiones de COV y NO_x para poder alcanzar los valores de 90 ppb de O_3, concentración que será establecida en la nueva norma oficial mexicana de este contaminante. Para lograr cumplir con dicha concentración, es indispensable modificar la estructura energética bajo la cual opera el Valle de México, así como mejorar el marco regulatorio y la vigilancia en sectores contaminantes que actualmente no cuentan con regulación.

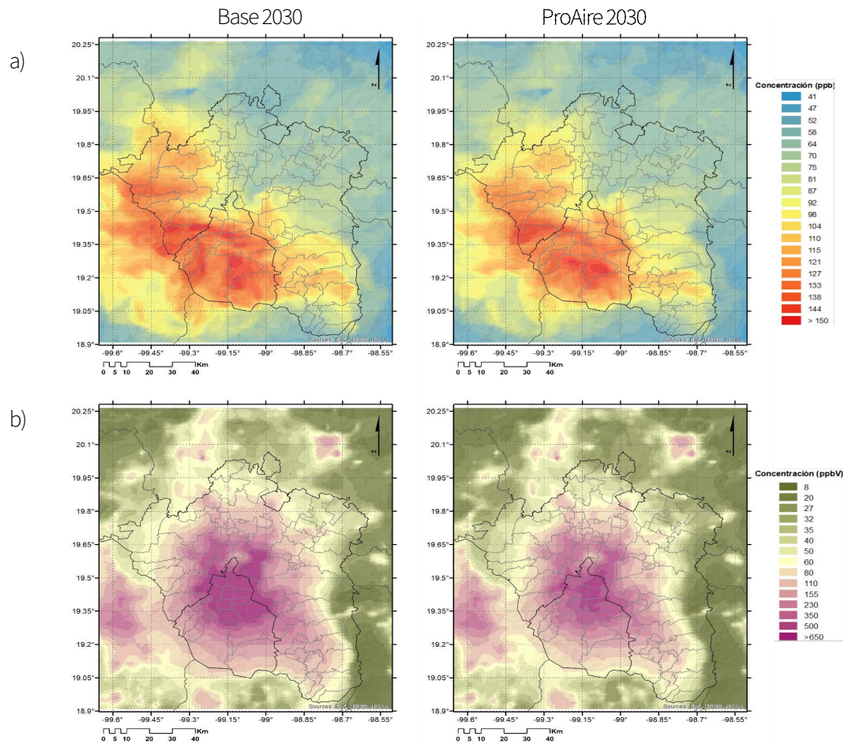


Figura 7.4 Mapas del promedio de los máximos de O_3 (ppb) (a) y promedio máximo diario de NMCOV (ppbV) para todo el periodo considerado (b) en la ZMVM para el escenario base y el escenario con ProAire 2030

Beneficios en salud

Para estimar los beneficios en salud que tendrían los cambios en la calidad del aire en $PM_{2.5}$, NO_2 y O_3 en el año 2030, de implementarse las medidas del ProAire y los ahorros económicos asociados a estos, se llevó a cabo una evaluación de impacto en salud (EIS) empleando el Programa de análisis y mapeo de beneficios ambientales - Edición comunitaria (BenMAP-CE, por sus siglas en inglés), así como una valoración económica de los impactos estimados.

Se compararon, el escenario base que corresponde a la calidad del aire que se tendría en 2030 de seguir la tendencia actual de emisiones, y el escenario control que se refiere a la calidad del aire que se presentaría en el año 2030, considerando la reducción de emisiones por la implementación de las medidas del ProAire.

La diferencia en la concentración de contaminantes entre dichos escenarios, permite cuantificar los beneficios en salud y económicos que se obtendrían por la implementación del Programa en el año 2030. Los insumos y consideraciones empleados en esta EIS se resumen a continuación:

a) Evaluación de la exposición de la población a la contaminación del aire: se empleó la diferencia en la concentración de contaminantes entre el escenario base 2030 y el escenario con ProAire 2030 a nivel de celdas de 1 km x 1 km, para toda la ZMVM, mismos que fueron simulados con el Sistema de Pronóstico de Calidad del Aire, AQFS-CDMX. Las métricas empleadas fueron la media anual del promedio de 24 horas para $PM_{2.5}$, el promedio anual de la concentración de una hora para NO_2 y el promedio de la temporada de ozono del máximo diario de la concentración de una hora para O_3.

b) Eventos en salud: con base en una revisión de la evidencia científica internacional, se seleccionó la mortalidad anual por causas generales[14] para el caso de $PM_{2.5}$ y NO_2, así como la mortalidad anual por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) para O_3.

c) Las funciones concentración-respuesta (FCR), que cuantifican el impacto en salud por unidad de concentración de un contaminante particular, se obtuvieron de estudios epidemiológicos recientes y son empleadas en EIS a nivel nacional e internacional.

d) Se utilizaron datos de población y de mortalidad a nivel municipal proyectados a 2030 para el grupo de edad de 25 años y más.

Los impactos en salud se calcularon a nivel de celda, para después agregarse a nivel municipal, estatal y para toda la ZMVM.

Finalmente, se estimaron los beneficios económicos de dichos impactos empleando el valor de una vida estadística (VSL, por sus siglas en inglés), reportado por la OECD (2012) de 2005 y transferido a México a precios del 2018 (para mayor referencia se puede consultar el Anexo 6.2). Este valor es consistente con el VSL usado en evaluaciones recientes para monetizar los beneficios de diversas intervenciones.

Los resultados indican que la aplicación de las medidas del ProAire en la ZMVM daría lugar a una mejora en los niveles promedio ponderados por la población[15] de $PM_{2.5}$, NO_2 y O_3 en el año 2030 en comparación con el escenario base o tendencial a 2030, logrando un cambio del -24% para $PM_{2.5}$ (-6.4 µg/m³), -34% de NO_2 (-7 ppb) y -0.2% de O_3 (-0.2 ppb) (Figura 7.5).

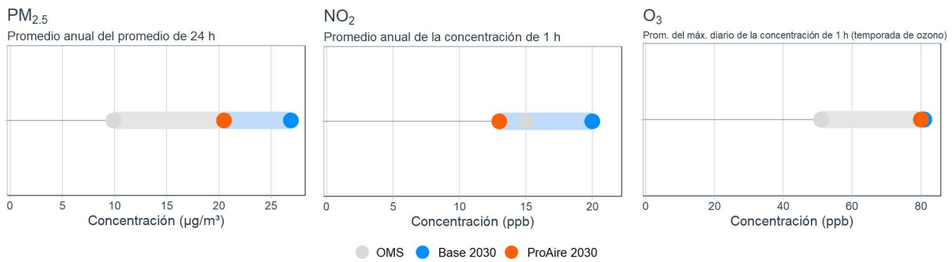


Figura 7.5 Concentración promedio ponderada por la población para $PM_{2.5}$, NO_2 y O_3 de los escenarios de la Guía de Calidad del Aire (GCA) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) del año 2005, escenario base 2030 y escenario con ProAire 2030 en la ZMVM[16]

14 En el caso de $PM_{2.5}$ se incluyeron las causas de muerte no accidentales que consideran las enfermedades crónico-degenerativas y las infecciones respiratorias de vías inferiores. En el caso de NO_2 se consideraron las causas conocidas como naturales que excluyen las muertes por causas externas. Aunque similares, existen diferencias entre ellas.
15 La concentración promedio ponderada por la población de cada contaminante se refiere al promedio en el que se le da mayor peso a la concentración de contaminantes de las zonas donde habita la mayor parte de la población, siendo un mejor indicador de la exposición de la población que el promedio simple (HEI, 2020).
16 En el caso de O_3 para el escenario de la OMS, se empleó un valor de 75 ppb para la métrica del promedio de la temporada de ozono del máximo de la concentración de una hora. La OMS no cuenta con un valor guía para esta métrica, por lo que se calculó tomando la proporción entre los valores de las normas oficiales mexicanas de salud ambiental para una hora y ocho horas y aplicándola al valor de ocho horas de la OMS.

En los mapas de la Figura 7.6 se observa el cambio en la concentración de dichos contaminantes por la implementación del Programa a nivel de celda de 1 km x 1 km en la ZMVM.

Debido a la menor exposición promedio que tendría la población de la ZMVM a dichos contaminantes en el escenario con aplicación del del ProAire, se calcula que se podrían evitar al menos seis mil muertes en el año 2030. Esto equivale a un valor estimado de 13 mil millones de dólares o 119 mil 256 millones de pesos lo que representa el 2.3% del PIB de la ZMVM en el año 2018. Dichos ahorros económicos del año (2030), compensarían en más del 40% los costos de implementación de todo el Programa.

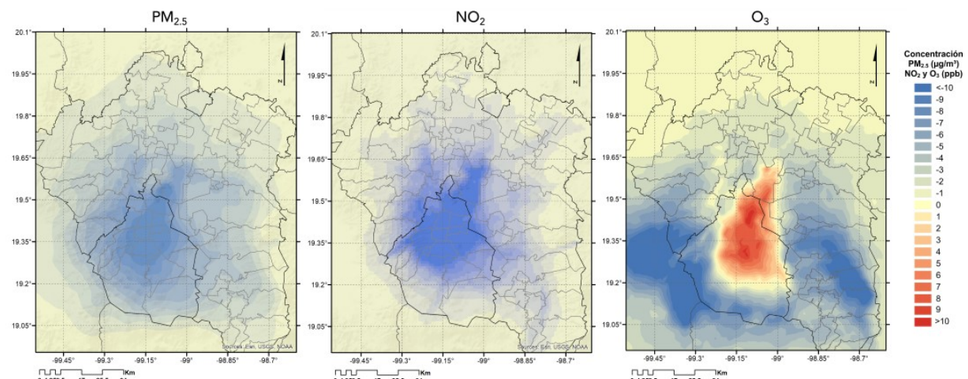


Figura 7.6 Cambio en la concentración de $PM_{2.5}$, NO_2 y O_3 entre los escenarios ProAire 2030 y base 2030 a nivel de celda de 1 km x 1 km en la ZMVM

Un hallazgo importante de este análisis es que el mayor número de muertes que se lograría evitar por la implementación del ProAire ZMVM se debe a los cambios en los niveles de NO_2, alcanzando valores por debajo de la GCA de la OMS (2005) y, en segundo lugar, a los cambios en $PM_{2.5}$ (Tabla 7.19). Esto se replica a nivel municipal, como se observa en la Figura 7.7.

Tabla 7.19 Diferencia en el número de muertes prematuras en 2030, por el cambio en la exposición a $PM_{2.5}$, NO_2 y O_3 en la ZMVM con la implementación del ProAire 2021-2030, respecto al escenario base 2030 y valoración económica.

Contaminante	Diferencia en el número de muertes prematuras (IC 95%) [a]	Valoración económica del cambio en el número de muertes prematuras, en millones de dólares (IC 95%) [b]
$PM_{2.5}$ (Media anual del promedio de 24 h)	-4,900 (-3500 a -6200)	-10,500 (-7,500 a -13,400)
NO_2 (Promedio anual de la concentración de 1 h)	-6000 (-4100 a -7900)	-13,000 (-8,800 a -17,100)
O_3 (Promedio de la temporada de ozono del máximo diario de la concentración de una hora de O_3)	7 (1 a 13)	15 (4 a 28)

[a] Muertes prematuras en el grupo de edad de 25 años y más.
[b] VSL reportado por la OECD (2012) para el año 2005 y transferido a México a precios del 2018: 2.16 millones de dólares.

Los resultados de la presente evaluación muestran que la implementación del ProAire 2021-2030, considerado como un escenario condicionado, podría contribuir de forma importante a mejorar la calidad del aire, proteger la salud de la población, y acelerar el cumplimiento del Objetivo 3 sobre Salud y Bienestar de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Los resultados son estimaciones basadas en distintos supuestos que se explican con detalle en el Anexo 7.2.

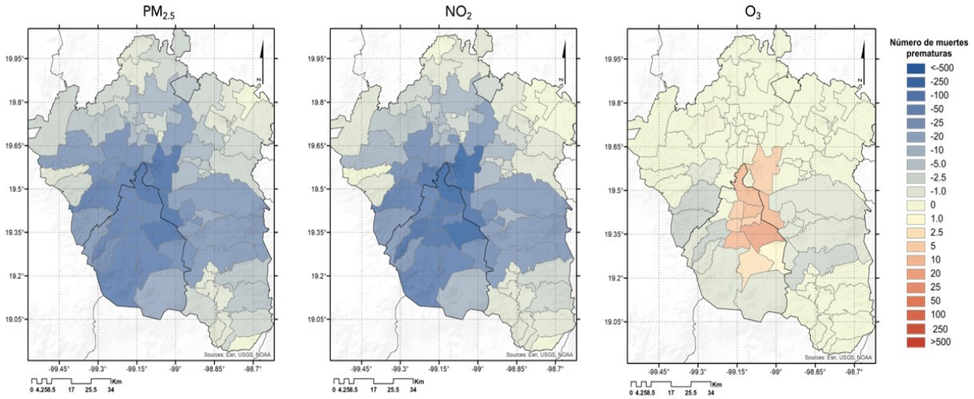


Figura 7.7 Cambio en el número de muertes prematuras en 2030 por el cambio en la exposición a $PM_{2.5}$, NO_2 y O_3 en la ZMVM a nivel municipal con la implementación del ProAire 2021-2030 respecto al escenario Base 2030

La implementación del ProAire ZMVM 2021-2030 también representa una oportunidad importante para incrementar la ambición de la mitigación de gases de efecto invernadero, toda vez que permite la integración de la gestión de la contaminación del aire y la planificación de la acción climática. La contaminación del aire y el cambio climático tienen muchas interacciones complejas y están estrechamente vinculadas.

Por ejemplo, el cambio climático y la calidad del aire comparten fuentes de emisión como el transporte, la industria y la generación de electricidad, por lo que es fundamental desarrollar una agenda conjunta que pueda potencializar los impactos positivos y los cobeneficios asociados, en lugar de tratar estos temas como dos agendas separadas (Malley & Kuylenstierna, 2019). En este contexto, este ProAire comparte acciones con el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México, 2021-2030.

7.6 Agenda regulatoria

Un componente indispensable de todo instrumento de planeación es el sustento jurídico de las acciones que contiene. En tal sentido, el ProAire ZMVM 2021-2030 contiene una serie de recomendaciones que suponen emprender procesos regulatorios encaminados a:

- Buscar que, en su condición de instrumento de la política ambiental, quede garantizada su legalidad y, por tanto, su validez y consecuente cumplimiento de los objetivos que persigue.
- Identificar vacíos o lagunas que impedirían la eficacia de las acciones contenidas en él.
- Desarrollar en el ámbito administrativo, como reglamentos o Normas Oficiales Mexicanas, las normas legales que sustentan sus acciones, con la finalidad de detallarlas en regulaciones técnicas de aplicación obligatoria.
- Precisar las competencias de las autoridades, principalmente ambientales, que participarán en su ejecución.
- Establecer mecanismos de evaluación y seguimiento de sus acciones.
- De manera particular, que el marco jurídico de las tres entidades federativas que intervienen cuente con una estructura y contenido uniforme, de tal suerte que las acciones puedan ser implementadas en igualdad de circunstancias y, por tanto, igualdad de posibilidades de cumplir con sus objetivos.

Los cambios regulatorios y normativos propuestos se resumen en las fichas descriptivas del Anexo 7.

Ejemplos de estas recomendaciones de procesos regulatorios son:

- En relación con la Acción 1.3 (Limitaciones y vigilancia de la circulación de transporte de carga contaminante), si bien es cierto que la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal (LAPTDF)) y el Código para la Biodiversidad del Estado de México (CPBEM) facultan a las autoridades competentes para llevar a cabo acciones de inspección y vigilancia y, en su caso, sancionar las infracciones a las disposiciones que resulten aplicables, se recomienda incluir la facultad expresa de establecer puntos de revisión de los vehículos en la vía pública.
- En relación con la Acción 2.3 (Reducción de la cantidad de viajes personales), sería oportuno incorporar en la legislación local aplicable, disposiciones que fomenten el trabajo y el estudio a distancia, mediante incentivos y la habilitación de centros de conectividad, para reducir el uso de vehículos particulares.

- En relación con la Acción 15.2 (Actualización del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas), por lo que respecta a los mecanismos de comunicación, si bien es cierto que la LAPTDF y el CPBEM establecen la obligación de dar a conocer las declaratorias de contingencias ambientales a través de los medios de comunicación masiva y de los instrumentos correspondientes, se recomienda diversificar y fortalecer los mecanismos de comunicación para reducir la exposición y proteger la salud de la población.
- En relación con la Acción 15.3 (Desarrollo e implementación de una Estrategia Integral de Comunicación de Calidad del Aire), si bien es cierto que la LAPTDF, el CPBEM y la Ley para la Protección al Ambiente del Estado de Hidalgo (LPAEH) establecen la obligación de las autoridades locales competentes para: (i) integrar inventarios o registros de emisiones a la atmósfera, y (ii) de contar con sistemas de información que incluyan dichos registros, se recomienda adicionar a dichas leyes el mandato de contar con estrategias integrales de comunicación.
- En relación con la Acción 15.4 (Integración de un sistema de información en salud y calidad del aire de la ZMVM), si bien existen disposiciones legales que fundamentan la adopción de la medida, se estima necesario proponer actualizaciones que vinculen los niveles de contaminación atmosférica con sus consecuencias sobre la salud de las personas, mediante la información disponible en los sistemas de información ambiental que, a su vez, son alimentados de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire.
- En relación con las acciones 16.1 (Evaluación, seguimiento y difusión periódica de los resultados de implementación del ProAire ZMVM 2021-2030) y 16.2 (Establecimiento de plataformas de seguimiento institucional para sectores altamente contaminantes), se desprende la necesidad de que la regulación de los ProAire en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, y en las legislaciones ambientales de la Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo incluyan estrategias para su seguimiento.

De esta forma, el ProAire ZMVM 2021-2030 no solamente se erige en un instrumento de política pública, sino también en un mecanismo que permite detonar los procesos de expedición de los instrumentos regulatorios necesarios para la ejecución de sus medidas y acciones. Al respecto, cabe mencionar que se trata de un Programa con un horizonte de una década, con lo cual no constituye un instrumento con un fin en sí mismo, sino con un proceso de implementación y maduración, incluso con miras a orientar y coadyuvar a las metas contenidas en otros instrumentos de política pública, como el Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México que cuenta con una visión ambiental 2040. Por último, se destaca que este proceso de mejora continua del ProAire ZMVM 2021-2030 será de particular importancia para el diseño del Programa que lo sustituya.

08

Comunicación y participación ciudadana

La comunicación y difusión efectiva en materia de calidad del aire motiva la participación social y apoya el cumplimiento de las medidas y objetivos de este ProAire.

08



La comunicación efectiva permite cumplir con algunos de los principales objetivos del ProAire ZMVM 2021-2030. A nivel individual, ayuda a motivar acciones personales de las y los ciudadanos para reducir el riesgo de exposición a concentraciones elevadas de contaminantes y proteger su salud, particularmente durante episodios de contaminación severa. Además, informar adecuadamente a la ciudadanía sobre las causas y consecuencias de los contaminantes atmosféricos, motiva la participación social e incrementa el alcance de implementación de las medidas y acciones propuestas en este ProAire. Por ello, la generación de información veraz y oportuna sobre los niveles de contaminación en el aire ambiente, y el uso adecuado de los canales y procesos de comunicación, son indispensables para alcanzar los objetivos de este Programa.

En este sentido, se requiere de una estrategia integral de comunicación, dirigida a cuatro audiencias diferenciadas:



El primer grupo es el público en general, al cual se le debe informar a través de canales accesibles y con contenidos claros sobre los niveles de los contaminantes presentes en el aire, las fuentes que los generan, sus consecuencias y los riesgos que causan a la salud pública. Esta información básica debe tener por objetivo crear un contexto que despierte el interés de la población para consultar las fuentes de información oficiales, tomar acciones que les ayuden a proteger su salud y fomentar la participación social en las medidas de mitigación requeridas.



La segunda audiencia es la población más vulnerable. La estrategia para este sector deberá ser diversa y atender a muchos segmentos de la población, incluyendo personas de la tercera edad, infantes, personas con condiciones médicas preexistentes y personas cuyas profesiones o conductas los exponen en mayor medida a los niveles promedio de contaminación atmosférica. Los mensajes a esta segunda audiencia tendrán que ser más específicos y contar con canales diferenciados, con el objetivo de ofrecer información que les permita tomar acciones para cuidar su salud y bienestar.



El tercer grupo son profesionistas que tienen algún rol especial en la aplicación de las medidas del ProAire. Este segmento se compone de las y los funcionarios públicos de los tres órdenes de gobierno y de los distintos sectores relevantes (medio ambiente, movilidad, energía, desarrollo urbano, etc.), personal del sector salud y educativo, el sector privado y los medios de comunicación. Cada uno de estos colectivos tiene una responsabilidad diferente en la reducción de emisiones de contaminantes a la atmósfera o en la comunicación de riesgos y protección a la salud de la población. Por ello, los mensajes y canales que se utilicen deberán diseñarse de forma que se transfiera conocimiento técnico a estos actores, para que su participación sea efectiva y oportuna.



Finalmente, la cuarta audiencia es el sector de especialistas, compuesto por personas expertas en el tema, como la academia y organizaciones no gubernamentales. Este grupo funge como creador y/o replicador del conocimiento, por lo que se deberán establecer plataformas y espacios que faciliten la difusión, intercambio y recepción de datos e información especializada en materia de calidad del aire y salud; así como los datos del monitoreo atmosférico, indicadores de salud, evidencia epidemiológica, resultados de la implementación de políticas públicas e investigaciones, entre otros.

Se debe reconocer que la planeación e implementación de intervenciones multisectoriales a corto, mediano y largo plazo debe contemplar la generación de condiciones apropiadas para que las acciones individuales de la población complementen y potencien la gestión de la calidad del aire. La comunicación efectiva permite construir capacidades y recabar el apoyo de múltiples actores que deben involucrarse en la gestión de la calidad del aire. Esto permite generar cambios estructurales en los esquemas de gobernanza ambiental y construir voluntad política. Cuando los sectores involucrados reconocen las causas y efectos de la contaminación atmosférica, se vuelve más sencillo abogar por políticas que reduzcan la emisión de contaminantes.

En este Capítulo se presenta el diagnóstico sobre la situación actual de los procesos de comunicación y difusión de información en materia de calidad del aire en la ZMVM. En primer lugar, se analizan los resultados de una encuesta de percepción ciudadana que se elaboró para conocer el estado de la opinión pública sobre la calidad del aire, con el fin de fundamentar nuevas estrategias de difusión de información. En seguida, se resumen los principales canales y protocolos de comunicación utilizados actualmente, para identificar posibles retos y áreas de oportunidad en términos de los mensajes, canales y audiencias para la comunicación de información relevante tanto de forma continua como eventual. Más adelante se aborda el involucramiento de la ciudadanía en el diseño de las políticas públicas de calidad del aire, con especial atención en aquellas actividades realizadas durante la elaboración del ProAire ZMVM 2021-2030. Finalmente, se proponen lineamientos y recomendaciones para el diseño de una Estrategia Integral de Comunicación con diversas líneas de acción en materia de difusión de información y participación ciudadana, la cual debe ser diseñada, planeada e implementada de forma coordinada por el sector salud y el sector ambiental.

8.1 Percepción ciudadana de la calidad del aire

Durante la integración del ProAire ZMVM 2021-2030, se realizó una encuesta[1] a 2145 personas que viven, estudian o trabajan en alguna de las 76 demarcaciones que componen a la ZMVM. El objetivo de esta encuesta, que se aplicó a través de un formulario digital, fue conocer la percepción de las y los habitantes de la zona de estudio, referente a la calidad de aire en sus zonas de residencia y desplazamiento, las principales fuentes de emisión y los impactos de salud asociados a la contaminación atmosférica, para apoyar la identificación de estrategias que guíen procesos de difusión de información y participación ciudadana. A continuación, se presentan los resultados y conclusiones principales de la encuesta de percepción. Las respuestas completas para el total de preguntas están disponibles en el Anexo 8.1.

Perfil de los encuestados

De las 2145 personas que participaron en la encuesta, el 76.4% indicó que pasa la mayor parte de su tiempo en la Ciudad de México, ya sea por motivos de trabajo, estudio o porque ahí viven, en tanto que el 23.0% lo hace en alguno de los 59 municipios conurbados del Estado de México y el 0.6% en Tizayuca, Hidalgo. La encuesta se limitó a mayores de 18 años, con la mayoría de la muestra dentro del rango de 30 a 44 años (37.7%), seguida por personas de 45 a 59 años (28.0%), de 18 a 29 años (24.3%) y mayores de 60 años (10.0%). El 80.2% de las y los participantes reportó contar con estudios de educación superior, el 15.1% estudios de bachillerato y el resto con educación básica. Considerando el cálculo de tamaños de muestra en poblaciones finitas (Levine *et al*., 2017), el margen de error de la encuesta es de 2.12% con un nivel de confianza del 95%.

1 La encuesta se elaboró en coordinación con la SEDEMA de la Ciudad de México, la SMAGEM del Estado de México y la SEMARNTH de Hidalgo. Esta se difundió de manera electrónica (formulario de Google Forms) a través de redes sociales y estuvo activa desde el 6 de agosto y hasta el 1º de septiembre de 2020.

Percepción general de la calidad del aire

Aproximadamente un tercio de la muestra (32.9%) considera que la contaminación del aire ocupa el primer lugar entre las problemáticas ambientales más graves en la ZMVM, seguida por la contaminación del agua y el saneamiento deficiente (21.3%). Por otro lado, solo 4.7% de las y los encuestados señalaron al cambio climático como el desafío principal, a pesar de ser una problemática considerada como una de las mayores crisis ambientales globales.

Más de dos terceras partes (68.3%) de las personas encuestadas creen que la calidad del aire en la ZMVM normalmente es mala, muy mala o extremadamente mala, mientras que el 27.8% indicó que es aceptable o regular. Solo 3.7% de la muestra respondió que la calidad del aire en la zona de estudio es buena o muy buena. A su vez, al preguntar a las y los participantes si consideran que la calidad del aire en la ZMVM ha mejorado en los últimos 20 años, 62.7% indicó estar total o parcialmente en desacuerdo con esta afirmación; se destaca que únicamente el 5.3% está totalmente de acuerdo, mientras que 25.7% indicó un acuerdo parcial y el 6.2% no tiene una postura clara al respecto. Estos resultados se resumen en la Figura 8.1.

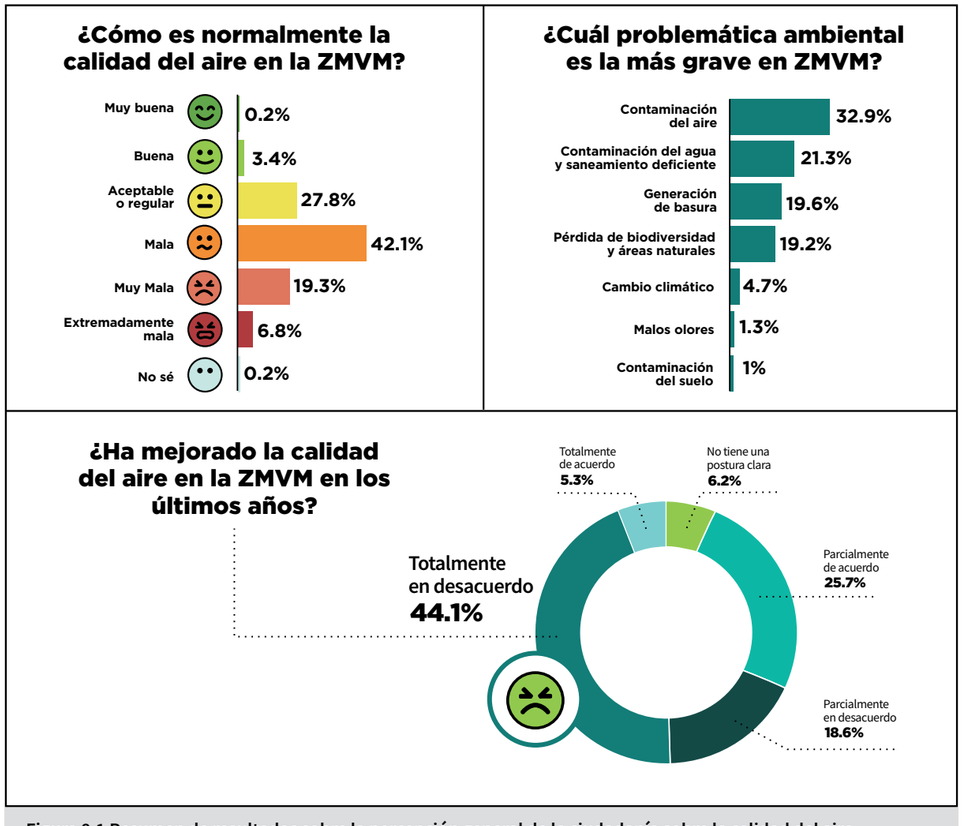


Figura 8.1 Resumen de resultados sobre la percepción general de la ciudadanía sobre la calidad del aire
Fuente: *Elaboración propia.*

Al preguntar cuáles son los tres principales canales que emplean para mantenerse informados sobre la calidad del aire, el 43.2% de las y los encuestados reportó que consulta sitios oficiales del gobierno en internet. A este medio le siguen las consultas en redes sociales de actores del gobierno (34.1%), la televisión (30.2%) y la aplicación para teléfonos móviles AIRE de la Ciudad de México (24.5%). En menor medida, algunas personas también seleccionaron la radio, el periódico impreso o electrónico, o las redes sociales de especialistas o de amistades. Se destaca que el 4.8% de las personas encuestadas señalaron no estar informadas sobre el estado de la calidad del aire.

Finalmente, para conocer si la población está al tanto de las acciones de gestión de la calidad del aire locales, se preguntó si conocían alguno de los ProAires vigentes en la ZMVM. El 61.8% especificó no estar familiarizado con ninguno de los programas, mientras que el 30.6% indicó conocer el ProAire de la ZMVM 2011-2020, el 15.9% el ProAire de la Megalópolis 2017-2030, el 8.1% el ProAire del Estado de México 2018-2030 y 4.5% el ProAire del Estado de Hidalgo 2016-2024. Es importante resaltar que esta pregunta no refleja si las personas encuestadas realmente conocen y entienden las implicaciones de las acciones definidas en cada programa.

Calidad del aire e impactos a la salud

La mayoría de las personas encuestadas (99.7%) opina que la contaminación del aire puede tener impactos perjudiciales sobre su salud. No obstante, la percepción individual sobre el nivel de riesgo muestra que poco menos de la mitad (46.3%) considera que su nivel de riesgo ante la contaminación atmosférica es moderado. Por otro lado, el 39.8% indicó que su nivel de riesgo es alto o muy alto, en tanto que el resto considera que se encuentran en un nivel de bajo a nulo. Los resultados también muestran que la percepción del nivel de riesgo aumenta con la edad. En el grupo de 18 a 29 años, 32.6% se percibe en un nivel de riesgo alto o muy alto, mientras que esta proporción incrementa a 41.0% en personas de 30 a 44 años, 42.4% para el grupo de 45 a 59 años, y 45.6% para mayores de 60 años.

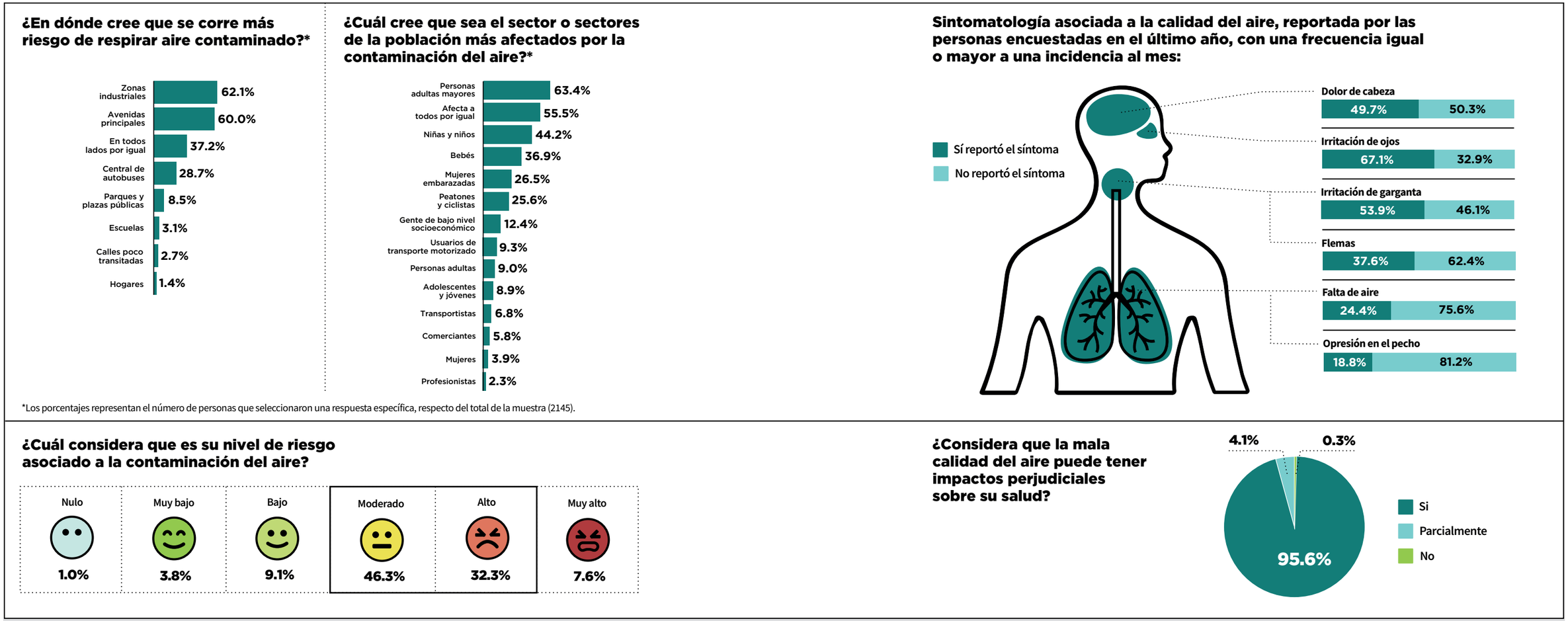
Asimismo, a las personas encuestadas se les proporcionó un listado de síntomas relacionados con la mala calidad del aire y se les pidió establecer la frecuencia con la cual experimentaron dichas afecciones durante el último año. Considerando la manifestación de estos síntomas al menos una vez al mes, la irritación en los ojos y garganta y el dolor de cabeza son los que se presentan con mayor frecuencia, seguidos por flemas, falta de aire y dolor u opresión en el pecho. Se destaca que solamente 50 personas (2.3%) reportaron que no presentaron ninguno de estos síntomas con una frecuencia igual o mayor a una incidencia al mes.

En cuanto a la vulnerabilidad de distintos grupos de población a la mala calidad del aire, el 63.4% de las y los encuestados indicaron que las personas adultas mayores son uno de los sectores más afectados por la contaminación atmosférica. Otros grupos que también fueron señalados por al menos un cuarto de la muestra fueron las niñas y niños, los bebés, las mujeres embarazadas, peatones y ciclistas, y personas de bajo nivel socioeconómico. Grupos como personas adultas, adolescentes y jóvenes, transportistas y comerciantes no fueron ubicados como grupos afectados significativamente por la mala calidad del aire, dado que menos del 10.0% los mencionó en su respuesta. Otro punto por destacar es que más de la mitad de las personas indicaron que la mala calidad del aire afecta a todos por igual.

También se preguntó sobre los lugares donde se corre mayor riesgo de respirar aire contaminado. En las respuestas se observó que la percepción general de la población es que las zonas industriales y avenidas principales es donde existe el mayor riesgo, aunque más de un tercio indicó que el nivel es el mismo en todos lados. Pocas personas especificaron que al interior de los hogares hay mayor riesgo de respirar aire contaminado; si

bien el ProAire se enfoca en la calidad del aire ambiente, el uso de combustibles como la biomasa y el carbón para la cocción de alimentos y el calentamiento del agua, particularmente en viviendas rurales, genera contaminantes que incrementan el riesgo de sufrir afectaciones en la salud (Organización Panamericana de la Salud, 2016). A esto se añade que muchas actividades domésticas, como el uso de productos de limpieza, liberan compuestos orgánicos volátiles que pueden ser tóxicos. Estos resultados, así como los descritos anteriormente, se resumen en la Figura 8.2.

Por último, a las y los encuestados se les solicitó indicar qué medidas adoptan cuando se activa una contingencia ambiental atmosférica. De un listado de acciones posibles, el 78.7% señaló que evita actividades al aire libre, el 46.2% sigue las recomendaciones del gobierno y el 39.1% se resguarda en casa y cierra ventanas. En un futuro será importante evaluar la posibilidad de la población de implementar acciones personales para evitar la exposición y cuidar su salud durante eventos de contaminación atmosférica severa, con base en sus condiciones socioeconómicas.



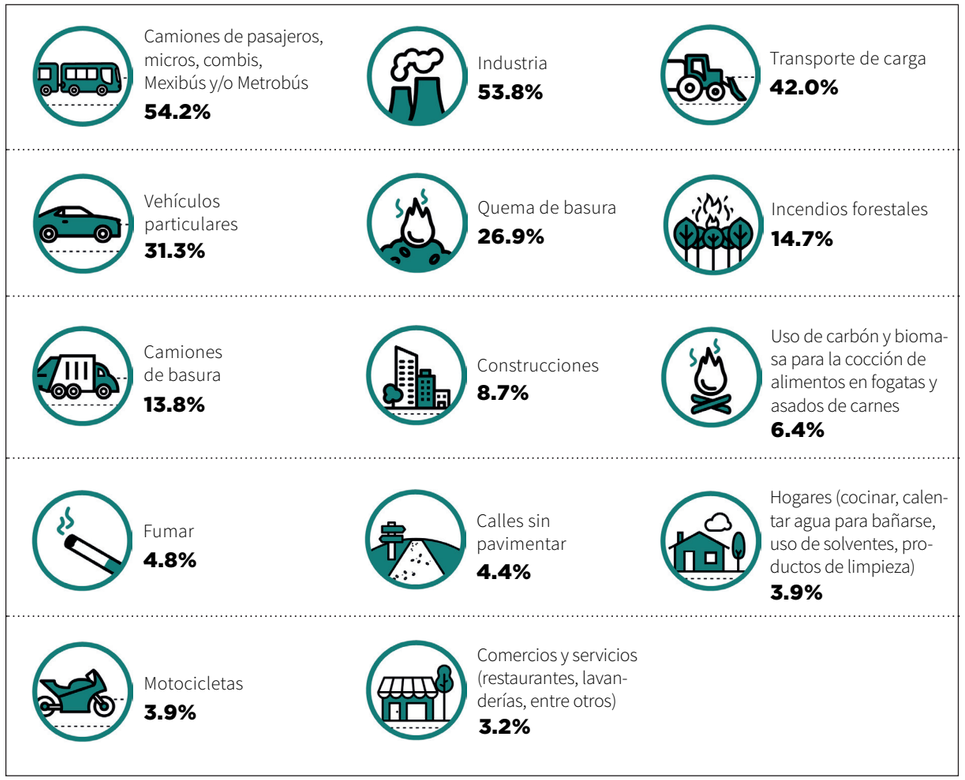
*Los porcentajes representan el número de personas que seleccionaron una respuesta específica, respecto del total de la muestra (2145).

Figura 8.2 Resumen de resultados sobre la percepción general de la ciudadanía sobre los impactos a la salud de la contaminación atmosférica

Fuente: *Elaboración propia.*

Fuentes de emisión

En cuanto a las principales fuentes de contaminación del aire, la mayoría de la muestra coincide en que el transporte público (por ejemplo, microbuses, combis, camiones de pasajeros, Metrobús y Mexibús), la industria y el transporte de carga son las actividades más contaminantes. Se destaca que estos resultados son congruentes con la percepción de la población sobre los lugares donde se corre mayor riesgo de exposición a la contaminación del aire. Los vehículos particulares y la quema de basura también fueron identificadas como fuentes significativas por más de un cuarto de la muestra, mientras que los hogares, comercios y servicios, y las motocicletas no son percibidos como fuentes principales, a pesar de tener contribuciones significativas según los resultados del inventario de emisiones (ver Capítulo 5). La Figura 8.3 muestra los resultados para todas las fuentes de emisión consideradas en la encuesta de percepción.



Nota: Los porcentajes representan la proporción del total de personas encuestadas (2145) que seleccionaron dicha categoría como una de las tres principales fuentes de emisiones contaminantes en la ZMVM. En la encuesta, era posible seleccionar una, dos o hasta tres de las categorías mostradas.

Figura 8.3 Resumen de resultados sobre la percepción general de la ciudadanía sobre las principales fuentes de emisiones contaminantes

Fuente: *Elaboración propia.*

Conclusiones

Los resultados muestran que la población de la ZMVM concuerda en que la calidad del aire en la región es desfavorable, e identifican a la contaminación atmosférica como una problemática ambiental grave. Por ejemplo, 68.2% de las personas encuestadas opinaron que la calidad del aire es mala, muy mala o extremadamente mala. Debido a que solo una pequeña porción de la población que habita en la ZMVM participó en la encuesta (0.02%), existe un área de oportunidad para seguir evaluando la percepción de la población en la región. No obstante, se observa que los habitantes de la metrópoli tienen algunas ideas equivocadas respecto a los niveles de calidad del aire que se registran actualmente, por lo que es importante mejorar los procesos actuales de comunicación:

- La mayoría de las personas encuestadas consideran que la calidad del aire no ha mejorado en los últimos 20 años, aun cuando se mantiene una tendencia histórica decreciente en los principales contaminantes desde la segunda mitad de la década de los 90, con reducciones más sustanciales en los primeros años. Como se expone en el Capítulo 3, pese al crecimiento de la ZMVM, en la última década se han estabilizado las concentraciones de contaminantes prioritarios como partículas $PM_{2.5}$ y ozono (O_3).
- Pocas personas identifican a las actividades domésticas, comerciales y de servicios como fuentes de contaminación relevantes. No obstante, estas contribuyen de forma significativa a la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), un precursor de O_3. En general, la muestra se inclinó por el transporte y la industria como principales actividades contaminantes, cuando los resultados del Inventario de Emisiones 2018 (SEDEMA, 2021) muestran que las fuentes puntuales emiten considerablemente menos contaminantes que las fuentes de área y las fuentes móviles.
- Si bien la mayoría de las personas encuestadas reconocen que la mala calidad del aire puede tener efectos perjudiciales en su salud, es posible que los habitantes de la ZMVM están subestimando el nivel de riesgo al que están expuestos, puesto que más de la mitad de las personas indicaron que se encuentran en un nivel de riesgo moderado a nulo.
- Adicionalmente, se observó un desconocimiento de las causas y efectos de la contaminación del aire interior, lo cual se refleja en que la muestra no ubicó a los hogares como un lugar donde se corre mayor riesgo de respirar aire contaminado, ni identificó a las actividades domésticas como una fuente principal de contaminación.



68.2%
de las personas encuestadas opinan que la calidad del aire es mala, muy mala o extremadamente mala.

Se concluye que es necesario mejorar la comunicación y difusión de información referente a la gestión de la calidad del aire, en especial para atender los siguientes puntos:

A Informar a la población sobre el estado general de la calidad del aire y los posibles riesgos asociados a los niveles de contaminación, para que los habitantes de la ZMVM puedan implementar acciones encaminadas a reducir su exposición, tanto en su día a día como durante eventos extraordinarios de contaminación severa.

B Comunicar los esfuerzos que realizan los distintos gobiernos locales y el gobierno federal para mejorar la calidad del aire en la ZMVM, y los impactos y beneficios de estas acciones.

C Concientizar a la población sobre cuáles son las actividades que más generan contaminantes atmosféricos y las acciones que pueden realizar para contribuir a mejorar la calidad del aire.

Es por lo anterior que resulta fundamental establecer una estrategia de comunicación y participación ciudadana que apoye la gestión local de la calidad del aire. Aumentar la disponibilidad de información veraz, clara y útil, ampliar el alcance y mejorar la efectividad de los canales y mensajes empleados, y promover la sensibilización de la población respecto del tema, son elementos esenciales para no solamente otorgar a la calidad del aire una posición central entre las preocupaciones de la sociedad, sino también para sumar esfuerzos y facilitar la implementación de acciones de política pública que se traduzcan en beneficios tangibles para toda la población.

Por último, en el futuro se recomienda reforzar este tipo de ejercicios para profundizar el conocimiento sobre la percepción de la población respecto al tema a través de nuevas encuestas que consideren lo siguiente:

- Evaluar si la percepción de la población, así como sus acciones individuales para limitar su exposición a la contaminación y proteger su salud, responden a un seguimiento adecuado respecto del tema, con el fin de saber si las respuestas son informadas o si solo reflejan inconformidades con la gestión de la calidad del aire.
- Ampliar el tamaño y representatividad de la muestra para contar con parámetros que permitan evaluar la percepción de audiencias prioritarias a quienes estará dirigida la Estrategia Integral de Comunicación del ProAire.
- Realizar ejercicios específicamente dirigidos a grupos de población vulnerable.
- Utilizar otros medios o canales no electrónicos, para evitar la exclusión de ciertos grupos de población.
- Incorporar preguntas que faciliten el análisis de la percepción de la población en función de características como el género, la ocupación y el nivel socioeconómico, con el fin de establecer si estos factores influyen en la posibilidad de las personas para modificar sus actividades, reducir la exposición y proteger su salud.

8.2 Principales procesos y canales de comunicación

Actualmente, el objetivo principal de la comunicación de la calidad del aire radica en analizar los datos técnicos existentes para transformarlos en información accesible e interesante para el público, promoviendo que la población comprenda sus implicaciones. Se espera que, con una estrategia de comunicación eficaz, la ciudadanía cuente con referencias suficientes para implementar acciones en favor de su salud y coadyuvar en la implementación de políticas públicas de reducción de contaminantes.

En la ZMVM, la comunicación en materia de calidad del aire se da a través de distintas instituciones y estas, a su vez, lo hacen a través de diversos mecanismos como comunicados, infografías, índices, entre otros. La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe), la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), dan a conocer información relevante sobre las condiciones de la calidad del aire en la ZMVM y los programas vinculados (por ejemplo, el Hoy No Circula), así como recomendaciones para que la población actúe y proteja su salud considerando el estado de la calidad aire.

La Tabla 8.1 resume los principales canales de comunicación actuales en materia de calidad del aire dentro de la ZMVM. En el Anexo 8.2 se presenta información adicional sobre estos canales.

Tabla 8.1 Principales canales y procesos de comunicación en materia de calidad de aire dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México

Dependencia	Sitios web	Aplicaciones móviles	Redes sociales	Otros
SEDEMA, Ciudad de México	**Sitio web** de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire: • Reportes en tiempo real del monitoreo atmosférico (Índice Aire y Salud) y datos históricos • Pronóstico de la calidad del aire • Índice de Riesgo para Personas Susceptibles • Publicaciones relevantes • Material de divulgación **Sitio web** de la SEDEMA: • Divulgación de actividades culturales • Materiales ambientales educativos • Información de programas y trámites (HNC, PWO y LAU-CDMX)	Aplicación AIRE para **iOS** y **Android**: • Reportes en tiempo real del monitoreo atmosférico (Índice Aire y Salud) y recomendaciones para proteger la salud • Pronóstico de la calidad del aire	Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire: Twitter: **@Aire_CDMX** SEDEMA: Facebook: **@sedemacdmx** Twitter: **@SEDEMA_CDMX**	Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire: • Servicio AIRET: 55-5278-9931 ext. 1 • Correo electrónico: calidadaire@sedema.cdmx.gob.mx Programas de la Dirección Ejecutiva de Cultura Ambiental Seminarios web “Viernes de Cultura Ambiental Curso “La contaminación y tu salud”

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 8.1 Principales canales y procesos de comunicación en materia de calidad de aire dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México *(continuación)*

Dependencia	Sitios web	Aplicaciones móviles	Redes sociales	Otros
CAMe	**Sitio web** con: • Comunicados de prensa, acciones y programas • Material de divulgación, infografías y recursos multimedia	No aplica	Twitter: **@CAMegalopolis** Facebook: **@CAMegalopolis** Instagram: **@ponbuenambiente**	Coordinación de la declaración de activación y desactivación del Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA).
SMAGEM, Estado de México	**Sitio web** de la SMAGEM con publicaciones, documentos técnicos, conferencias, talleres, exposiciones, y concursos en materia de medio ambiente y calidad del aire.	No aplica	SMAGEM Facebook: **@AmbienteEdomex** Twitter: **@AmbienteEdomex** Dirección de Concertación y Participación Ciudadana: Facebook: **@CPC.SMA** Twitter: **@CPC_SMA**	No aplica
SEMARNAT	**Acciones y programas de Calidad del Aire** **Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA)** **Informes Nacionales de Calidad del Aire**	No aplica	Twitter **@SEMARNAT_mx** Facebook: **@Semarnatmx** Instagram: **@semarnat_mexico**	Diseño y vigilancia de la NOM-172-SEMARNAT-2019, que establece los lineamientos para la obtención del Índice Aire y Salud.
Otros	Aplicaciones móviles que brindan información del tiempo y otros datos meteorológicos, entre ellas la calidad del aire. Es común que las aplicaciones muestren información diferente a la del SIMAT, dado que utilizan algoritmos de cálculo e indicadores diferentes para estimar un índice de calidad del aire, lo que resulta en una comunicación confusa y, en ocasiones, menos precisa en comparación con los sistemas de monitoreo locales. Algunos ejemplos son las aplicaciones del clima preinstaladas en sistemas operativos iOS y Android, y aplicaciones de terceros como AirNow, The Weather Channel, AccuWeather, Yahoo Tiempo y IQAir.			

Fuente: *Elaboración propia.*

8.3 Participación e involucramiento de la ciudadanía en el desarrollo e implementación del ProAire

Las acciones de gestión de la calidad del aire en la ZMVM deben incorporar estrategias para sumar la participación de múltiples partes interesadas en el proceso de toma de decisiones. El desarrollo e implementación de cualquier ProAire no debe limitarse a las autoridades ambientales locales y federales. Bajo un esquema de corresponsabilidad, otros departamentos gubernamentales, el sector salud y el educativo, la academia, el sector privado, los medios de comunicación y la sociedad civil tienen tanto el derecho como la responsabilidad de participar en el diseño e implementación de acciones enfocadas en reducir emisiones y proteger la salud de todas las personas que viven o se desplazan dentro de la región. Asimismo, se reconoce que, sin la experiencia y conocimiento de estos actores, el diseño de estrategias integrales y holísticas para mejorar la calidad del aire no sería posible.

Esta cooperación conjunta debe incluir la definición de problemáticas y temas prioritarios, la proposición y evaluación de soluciones, y el alcance de un consenso sobre el mejor camino a seguir para alcanzar un estado de bienestar en relación con la calidad del aire. Con esto en mente, el desarrollo del ProAire ZMVM 2021-2030 siguió una serie de procesos participativos para recabar el apoyo de personas expertas, tomadores de decisiones y otras partes interesadas en el diseño de las medidas y acciones enmarcadas en el Capítulo 7. El objetivo de esta sección es describir dichos procesos y posteriormente identificar otros mecanismos vigentes de participación ciudadana en la ZMVM, para establecer una base que permita el diseño de estrategias para involucrar a distintos grupos de interés durante la futura implementación del ProAire.

8.3.1 Procesos participativos para la elaboración del ProAire ZMVM 2021-2030

Integración del Comité Núcleo

Para apoyar el desarrollo, ejecución y vigilancia del cumplimiento de las estrategias y medidas del ProAire ZMVM 2021-2030, se conformó el Comité Núcleo. Este es un grupo multidisciplinario que tiene como meta asegurar la participación de diversos sectores y grupos de interés en el cumplimiento de los objetivos establecidos en el presente Programa. Su conformación fue liderada por las autoridades ambientales de los gobiernos locales de la ZMVM: la SEDEMA de la Ciudad de México, la SMAGEM del Estado de México y la SEMARNATH del Estado de Hidalgo. El papel del Comité Núcleo en la implementación y monitoreo de las estrategias y medidas del ProAire se detalla en el Capítulo 10.

Talleres participativos para la identificación de prioridades y medidas

Para involucrar a actores relevantes en el desarrollo del ProAire, en específico para la identificación de prioridades para la gestión de la calidad del aire y propuestas de medidas clave para la reducción de emisiones y protección a la salud, se llevaron a cabo diez talleres participativos. A estos talleres se invitaron actores públicos y privados expertos en la temática específica de cada taller, incluyendo dependencias gubernamentales federales, estatales y municipales, la academia, representantes del sector privado y la sociedad civil organizada. Estos eventos sirvieron como espacio de discusión para proponer acciones para mejorar la calidad del aire. Además de contribuir al desarrollo del ProAire, los talleres también se enfocaron en identificar

acciones para combatir al cambio climático en el marco de elaboración de la Estrategia Local de Acción Climática (ELAC) 2021-2050 y el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México (PACCM) 2021-2030.

La Tabla 8.2 resume las características principales de los diez talleres; en el Anexo 8.3 están disponibles sus reportes y relatorías, detallando información sobre los asistentes, metodología y resultados.

Tabla 8.2 Talleres participativos para la integración del ProAire ZMVM 2021-2030

No.	Nombre	Fecha	Líneas temáticas
1	Energía Sustentable	5 de julio de 2019	Identificar acciones de reducción de emisiones en el sector energético en torno a cuatro temáticas: solar fotovoltaico, solar térmico, eficiencia energética y electromovilidad.
2	Industria y Fuentes de Área	9 de agosto de 2019	Identificar acciones de reducción de emisiones contaminantes en procesos industriales, por el uso de productos con contenido de COV en industrias, comercios y servicios, emisiones fugitivas por el almacenamiento y distribución de combustibles, entre otras.
3	Movilidad	23 de octubre de 2019	Identificar acciones de reducción de emisiones en torno a cuatro temáticas: movilidad activa (peatones y ciclistas), transporte individual motorizado, transporte público colectivo e individual, y transporte de carga.
4	Calidad del Aire e Investigación	26 de junio de 2020	Definir una agenda de investigación científica e identificar temáticas pendientes para mejorar y ampliar el diagnóstico de las causas y efectos de la contaminación atmosférica.
5	Salud y Calidad del Aire	10 de julio de 2020	Definir una agenda de investigación para mejorar el entendimiento de los efectos en la salud de la contaminación atmosférica, e identificar problemas y posibles soluciones que relacionen a la salud pública con la calidad del aire.
6	Residuos Sólidos Urbanos y su impacto en Calidad del Aire y Cambio Climático	27 de julio de 2020	Identificar prácticas para mejorar la gestión de los residuos sólidos urbanos y limitar su contribución a la contaminación atmosférica y al cambio climático.
7	Agua, Cambio Climático y Calidad del Aire	17 de agosto de 2020	Identificar mejores prácticas para la gestión del agua, desde su extracción hasta el tratamiento y uso de aguas residuales, para fomentar la resiliencia hídrica y la reducción de emisiones contaminantes.
8	Cultura Climática y de Calidad del Aire	5 de octubre de 2020	Identificar retos y oportunidades para fortalecer la cultura ambiental, y definir prácticas y estrategias de educación, investigación, comunicación y participación ciudadana para la gestión de la calidad del aire y la acción climática.
9	Género, Cambio Climático y Calidad del Aire	9 de octubre de 2020	Identificar retos, acciones conjuntas, instrumentos y mecanismos para reducir la desigualdad de género y promover la inclusión social, bajo un marco de derechos humanos, para la construcción y aplicación del ProAire, la ELAC y el PACCM.
10	Priorización de medidas	14 al 29 de septiembre de 2020	Ejercicio de priorización de medidas con base en un listado preliminar de posibles intervenciones para mejorar la calidad del aire. Se realizaron talleres informativos para explicar el ejercicio, y posteriormente cada actor invitado seleccionó medidas prioritarias y contestó una serie de preguntas para poder jerarquizar y apoyar el diseño detallado de las propuestas.

Fuente: *Elaboración propia.*

Proceso de priorización de medidas y acciones

Los talleres participativos y el trabajo colaborativo entre las dependencias encargadas del presente ProAire permitió identificar un listado de 150 acciones preliminares para reducir emisiones de contaminantes criterio y precursores, mejorar el monitoreo de la calidad del aire, promover cambios conductuales y proteger la salud de la población. Con este listado se trabajó un ejercicio de priorización con actores relevantes que cuentan con experiencia en el tema, así como facultades para implementar o evaluar las acciones propuestas. En este ejercicio participaron agencias gubernamentales federales, estatales y municipales, la academia, organizaciones civiles y ONG, entre otras. El listado completo de participantes se encuentra en el Anexo 8.4.

El ejercicio se basó en el marco de evaluación RICE (INTERCOM, 2018), el cual permite cuantificar el valor potencial de proyectos, ideas e iniciativas. El nombre del marco deriva de los cuatro componentes básicos de medición: Alcance (R por *Reach*, su nombre en inglés), Impacto (*Impact*), Confianza (*Confidence*) y Esfuerzo (*Effort*). Se solicitó a los actores invitados revisar las 150 acciones y seleccionar aquellas 10 que consideraran prioritarias y que estuvieran vinculadas a su área de experiencia. Asimismo, las y los participantes tenían la opción de seleccionar otras 10 acciones que identificaran como relevantes, independientemente de su sector.

Posteriormente, cada persona tenía que contestar una serie de preguntas de opción múltiple, con un listado de parámetros e indicadores relacionados con uno de los cuatro componentes del marco RICE. Estas respuestas permitieron generar un índice ponderado para identificar y priorizar las acciones con base en los siguientes criterios:

- **Alcance:** estimado de cuánta gente puede verse beneficiada por la iniciativa en un marco de tiempo determinado.
- **Impacto:** contribución y valor público que ofrece la intervención, respecto de la mitigación de emisiones contaminantes, beneficios en la salud pública y otros cobeneficios (climáticos, sociales o financieros).
- **Confianza:** percepción de riesgos y condiciones de incertidumbre respecto de la implementación de la acción, así como la legitimidad y facultades independientes para su ejecución por parte de las instituciones involucradas.
- **Esfuerzo:** magnitud de los recursos necesarios (humanos, financieros, de capital social y normativos) para completar y ejecutar la iniciativa en un periodo de tiempo determinado.

Los resultados del ejercicio fueron utilizados para seleccionar las medidas prioritarias que se presentaron en el Capítulo 7. Además, el ejercicio sirvió para detallar las propuestas y generar indicadores para el futuro seguimiento, monitoreo y evaluación del ProAire ZMVM 2021-2030.

8.3.2 Participación intersectorial para la gestión de la calidad del aire

En la ZMVM existen diferentes espacios donde se fomenta la cooperación interinstitucional y la participación de la ciudadanía y otros actores relevantes en temas relacionados con la toma de decisiones y la gestión de la calidad del aire. A continuación, se enlistan algunos de estos grupos de trabajo y convenios, con el objetivo de identificar esfuerzos cuyo impacto pueda ampliarse a través de la estrategia de comunicación y participación enmarcada en este Capítulo:

- Comité Científico Asesor de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (DOF, 2013).

- Comité Científico Técnico de Vigilancia sobre Contaminación Atmosférica de la Ciudad de México (Agencia de Protección Sanitaria de la Ciudad de México, 2019).
- Comité de Normalización Ambiental de la Ciudad de México (SEDEMA, 2019).
- Consejo para el Desarrollo Metropolitano de la Zona Metropolitana del Valle de México (Subsecretaría de Coordinación Metropolitana y Enlace Gubernamental, 2018).
- Comisión Intersectorial de Promoción de la Salud de la Ciudad de México (SEDESA, 2020).
- Convenios de colaboración con el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM para fortalecer la investigación científica aplicada en ciencias atmosféricas y calidad del aire (SEDEMA, 2018).
- Convenio de cooperación interinstitucional celebrado entre la SEDEMA y la Secretaría de Salud de la Ciudad de México, bajo el marco de la implementación del anterior ProAire 2011-2020 (SEDEMA, 2017).

Para una descripción más detallada de cada comité, comisión o convenio, se puede consultar el Anexo 8.5. Se puntualiza que este no es un listado exhaustivo, dado que pueden existir múltiples iniciativas que, si bien no se desarrollan con el objetivo específico de mejorar la calidad del aire, pueden incidir en la reducción de emisiones contaminantes o el mejoramiento de la calidad de vida en sectores como el transporte y la movilidad, el consumo y eficiencia energética, la provisión de infraestructura y servicios públicos, la gestión de residuos y aguas residuales y, en general, el cuidado del medio ambiente.

Participación de la sociedad civil

Las organizaciones civiles y los ciudadanos en general pueden comprometerse con el mejoramiento de la calidad del aire y participar en procesos de toma de decisiones a través de distintas instancias. Por ejemplo, las cámaras industriales pueden proporcionar información relevante y organizar la intervención de sus agremiados para mejorar el desempeño ambiental de sus procesos productivos. Por otro lado, las ONG y otras instituciones comprometidas con el medio ambiente pueden coparticipar e interactuar con el gobierno para proponer y/o acelerar el desarrollo de políticas, además de involucrarse en temas de capacitación ambiental (SEMARNAT, 2017).

Uno de los mecanismos más relevantes de la sociedad civil es el Observatorio Ciudadano de Calidad del Aire (OCCA), integrado por organizaciones como Bicitekas, el Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA), Fundación Tláloc, Greenpeace, el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP) y el Poder del Consumidor. El OCCA tiene como objetivo evaluar las políticas e intervenciones públicas que inciden en la calidad del aire, promover acciones para mejorar el estado de la contaminación atmosférica y vigilar el cumplimiento de la normatividad aplicable (Instituto Mexicano para la Competitividad, 2016). Por ejemplo, en el pasado, el OCCA ha solicitado la implementación de acciones más ambiciosas para mejorar la calidad el aire, como la transición hacia límites permisibles más bajos en las NOM de salud ambiental, y se ha involucrado en el desarrollo de acciones para prevenir la contaminación atmosférica; evidencia de esto es que algunos de sus miembros participaron en la definición de medidas del presente ProAire (OCCA, 2019).

Este ProAire buscará fortalecer y promover este tipo de mecanismos para informar a la población de la ZMVM, recabar retroalimentación, fomentar el involucramiento de partes interesadas en la toma de decisiones y empoderar a la ciudadanía para que contribuyan a mejorar la calidad del aire.

8.4 Estrategia de Comunicación y Participación Ciudadana

La Estrategia Integral de Comunicación, en adelante la Estrategia, tiene como meta primordial la protección de la salud de los habitantes de la ZMVM. Esta propuesta parte del diagnóstico presentado en las secciones anteriores, donde se resumen los procesos y canales en materia de calidad del aire que ya son implementados por los gobiernos locales y la federación en la ZMVM. Reconociendo que se cuenta con bases sólidas y mecanismos existentes para promover la sensibilización de la ciudadanía y partes interesadas, esta sección establece recomendaciones y lineamientos para guiar el diseño de la Estrategia. Estas bases se dividen en dos ejes temáticos y once líneas de acción que buscan fortalecer los esfuerzos actuales de comunicación y participación ciudadana. Los ejes propuestos son:

A Protección de la salud pública

B Participación ciudadana para disminuir emisiones contaminantes

Cada línea de acción está dirigida a una o más audiencias prioritarias: 1) el público en general, 2) grupos de población vulnerable, 3) actores participantes en la implementación del ProAire y 4) especialistas en la materia y académicos. La Figura 8.4 *(ver siguiente página)* resume el esquema propuesto gráficamente.

8.4.1 Eje A. Protección de la salud pública

La base para lograr el cambio conductual de la población frente a los riesgos de la contaminación atmosférica es contar con mensajes claves y canales de comunicación de calidad. A continuación, se proponen mejoras en la infraestructura para comunicar el estado calidad del aire y los riesgos asociados a las cuatro audiencias prioritarias, con base en mecanismos innovadores y buenas prácticas internacionales. Estas recomendaciones permitirán mejorar la efectividad de los canales actuales y ampliar el alcance de los mensajes difundidos hacia la población a través de mecanismos vanguardistas.

Este eje también resume elementos y recomendaciones para la comunicación del estado de la calidad del aire y los riesgos potenciales asociados a la contaminación atmosférica tanto al público en general como aquellos grupos de población más vulnerables a los efectos de la mala calidad del aire. También se incluyen propuestas dirigidas a actores participantes en la implementación del ProAire, como el personal del sector salud y educativo, quienes tratan directamente con las personas afectadas, para tener un mayor alcance en la comunicación de riesgos y ofrecer opciones para reducir la exposición de los habitantes de la ZMVM.

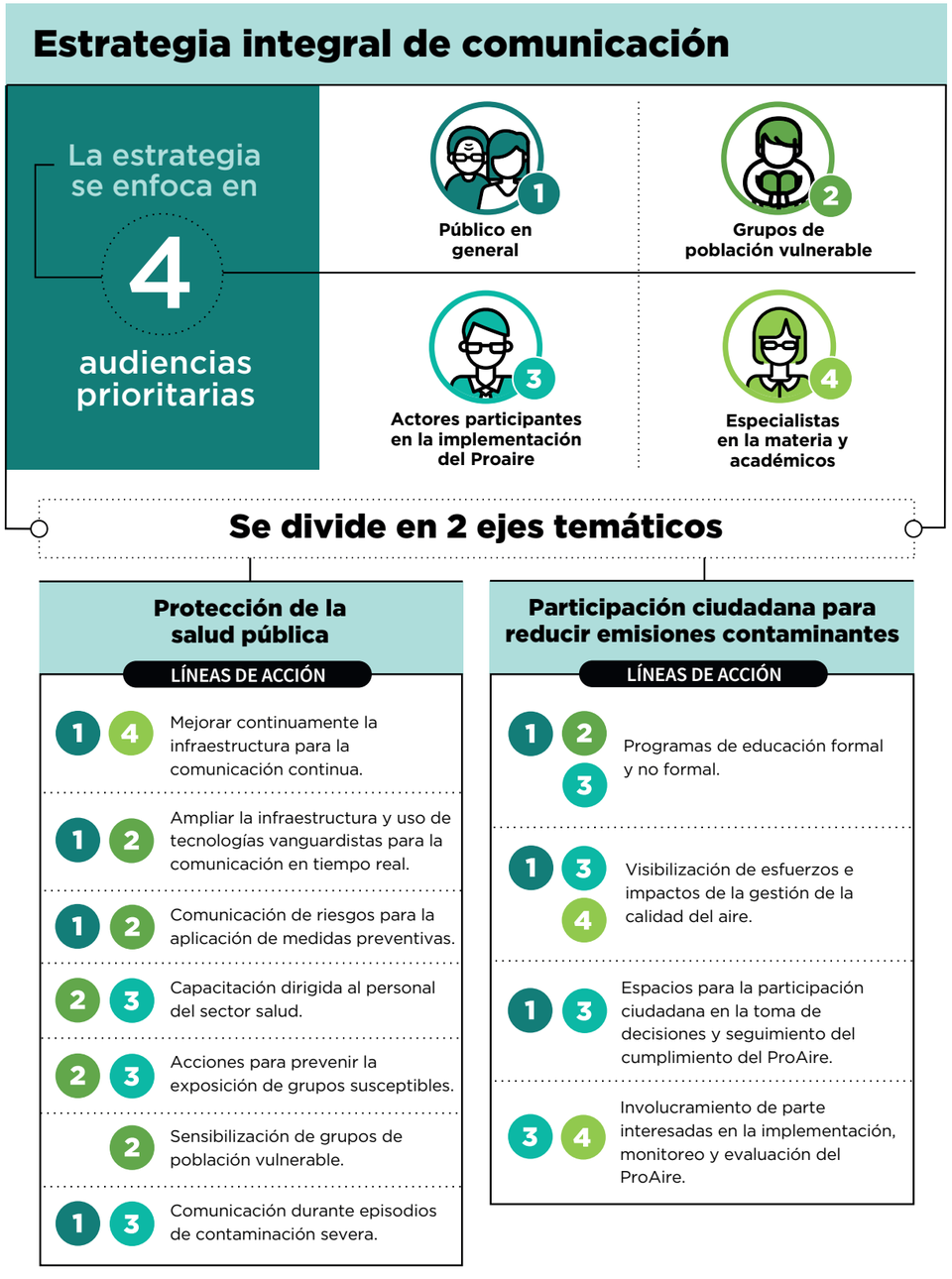


Figura 8.4 Estructura conceptual de la Estrategia Integral de Comunicación
Fuente: *Elaboración propia.*

Línea A.1
Mejorar continuamente la infraestructura actual para la comunicación de información sobre la calidad del aire

Existe un área de oportunidad para mejorar continuamente la infraestructura digital que actualmente funge como el canal principal para comunicar la calidad del aire. El sitio web del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) de la SEDEMA funciona como el canal rector para comunicar el estado de calidad del aire y brindar recursos informativos a la población desde hace varios años. Sin embargo, se deberá evaluar y considerar su actualización, con la finalidad de que se adapte a las tendencias en cuanto al lenguaje y herramientas visuales utilizadas para comunicar información relevante, transformando la experiencia del usuario. En este sentido, el portal actual cuenta con una amplia cantidad de recursos informativos y datos abiertos, ajustándose a las necesidades de comunicación de cada una de las audiencias prioritarias: el público en general, los grupos de población vulnerable, otros actores involucrados en la implementación del ProAire y el público especializado.

Audiencias: Público en general; Especialistas en la materia y académicos

Actividades:

1	Se deberá evaluar y, en su caso, modificar el portal actual, priorizando la difusión de información hacia el público en general, con mensajes claros y sencillos que eviten el uso excesivo de términos técnicos. La comunicación se deberá enfocar en transmitir mensajes clave sobre las causas y efectos de la contaminación atmosférica en la ZMVM, el estado de la calidad del aire actual y las tendencias históricas, el pronóstico de la calidad del aire, la contribución relativa de las distintas fuentes de emisión y los impactos a la salud de la mala calidad del aire. Esto resultará en información que contribuya a construir conocimiento para prevenir la exposición a la contaminación.
2	Previo a la modificación del portal, realizar grupos focales, uno por cada tipo de audiencia, para identificar, desde los usuarios potenciales y la población objetivo, su experiencia al hacer uso de la página y poder tomar en cuenta sus opiniones en la mejora del sitio actual. Estos grupos focales se deberán repetir una vez implementados los cambios, para asegurar que la página cumple con los objetivos propuestos.
3	Desarrollar un diseño amigable y visualmente atractivo para la población general.
4	Dentro del portal actual, incluir una subsección enfocada hacia las audiencias técnicas (profesionales de la salud, academia, tomadores de decisiones, sociedad civil y otras personas interesadas). Esta subsección puede incluir herramientas estadísticas para la visualización detallada de datos de calidad del aire, datos históricos del monitoreo atmosférico y publicaciones científicas de interés (reportes, informes y artículos).
5	Compartir públicamente la información generada para y por el Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Efectos a la Salud relacionados con la Contaminación Atmosférica

(SIVEESCA), así como otros datos e indicadores de salud de utilidad para la evaluación de impactos en salud y otros estudios.

6 Establecer convenios para replicar de manera continua y frecuente la misma información del SIMAT de la Ciudad de México en portales informativos del Estado de México e Hidalgo, así como sitios administrados por el gobierno federal.

Resultados esperados:

Canales de comunicación que prioricen la experiencia del usuario y la difusión de mensajes clave en torno a la calidad del aire y la protección de la salud.

Línea A.2
Ampliar la infraestructura para la comunicación en tiempo real a través de tecnologías vanguardistas

El estado de la calidad del aire en tiempo real y los riesgos a la salud asociados, así como recomendaciones para prevenir la exposición y reducir los riesgos, son mensajes clave que deben comunicarse de la manera más rápida y eficiente a la población en general y a los grupos vulnerables. Para esto, las tecnologías emergentes son grandes herramientas digitales que funcionan como canales de alcance masivo. Asimismo, se debe innovar en campañas y prácticas de comunicación para difundir mensajes apropiados a las audiencias más difíciles de alcanzar.

Audiencias:

Público en general

Grupos de población vulnerable

Actividades:

1 Implementar un sistema de alertas con canales específicos en función de la gravedad de la contaminación, incluyendo redes sociales, páginas de internet y personas inscritas por correo electrónico o mensajes de texto. Este último sistema puede ser unidireccional o bidireccional; el primero consiste en comunicar periódicamente el estado de la calidad del aire y los riesgos asociados, así como recomendaciones de medidas preventivas, a todas las personas usuarias suscritas al sistema, al igual que alertas cuando suceda un episodio de contaminación severa. El sistema bidireccional se basa en una petición del usuario para conocer el estado de calidad del aire en tiempo real a través de un mensaje de texto específico, como es el caso de los bots conversacionales o *chatbots*; tras recibir la petición, el sistema responde con la información solicitada. Los sistemas bidireccionales son recomendables para comunicar el mensaje a aquellas personas usuarias con poco acceso a internet. El sistema de alertas también podrá contemplar notificaciones con datos del pronóstico de calidad del aire para el siguiente día, incluyendo explicaciones de las posibles causas en caso de que sea un pronóstico desfavorable; esto permitirá prevenir a la población al mismo tiempo que se educa sobre las posibles causas de la mala calidad del aire. Por último, también se deberá promover que escuelas, centros de salud y las administraciones de sitios prioritarios, se suscriban al sistema de alertas para recibir información oportuna al llegar a determinados umbrales de contaminación del aire.

2 Utilizar infraestructura existente en puntos estratégicos para la comunicación de calidad del aire. Se recomienda utilizar pantallas digitales para comunicar el estado de la calidad del aire, el nivel de riesgo asociado y recomendaciones para prevenir la exposición en tiempo real. Algunos puntos estratégicos son espacios públicos, clínicas y hospitales, parques, estaciones de transporte público (STC Metro y Metrobús, Mexibús, Tren ligero y Suburbano, entre otros), avenidas principales (pantallas de la Secretaría de Seguridad Ciudadana/SOBSE) y centros deportivos y culturales, plazas comerciales, PILARES[2], y módulos de la Secretaría de Finanzas y el Servicio de Administración Tributaria. Las pantallas deberán destacar el color y categoría del Índice de Aire y Salud, y de forma complementaria mostrar las concentraciones de contaminantes prioritarios.

Resultados esperados:

Canales y estrategias innovadoras que comuniquen el riesgo de la calidad del aire en tiempo real a todas las audiencias de interés.

Línea A.3
Fortalecer la comunicación de riesgos a través de un índice estandarizado que permita a la población aplicar medidas preventivas

Los índices de calidad del aire han sido utilizados como método de comunicación del estado de la calidad del aire, el nivel de riesgo a la salud asociado y las recomendaciones de acciones a adoptar por parte de grupos susceptibles y la población en general para reducir la exposición a concentraciones peligrosas. En la ZMVM, el Índice Aire y Salud (NOM-172-SEMARNAT-2019), que es de aplicación nacional, sustituyó al anterior Índice de Calidad del Aire de la Ciudad de México, conocido como IMECA.

El Índice Aire y Salud comparte la filosofía de la comunidad científica y la OMS, que abogan por el uso de índices basados en impactos a la salud a corto plazo (Cromar *et al*., 2020; OMS, 2020); ejemplo de esto es la implementación de la metodología *NowCast* (promedio ponderado de 12 horas) para informar de manera inmediata cuando los niveles de partículas incrementan. Otro tipo de índices, como el canadiense (Gobierno de Canadá, 2019) o el de Hong Kong, que emplean un enfoque multicontaminante con base en impactos en mortalidad y morbilidad locales, pudieran servir para el Valle de México. En este sentido, la Ciudad de México ha construido un índice multicontaminante conocido como IRPS[3], con base en datos locales de morbilidad respiratoria y calidad del aire, y el cual se utiliza para difundir un valor de riesgo para el día anterior, el día actual y el pronóstico para el siguiente día. Por el momento, el IRPS está dirigido principalmente a la

2 Puntos de Innovación, Libertad, Arte, Educación y Saberes del Gobierno de la Ciudad de México.
3 El Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS) fue diseñado en colaboración con NYU (New York University). Para más información consultar la siguiente liga: http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/

población vulnerable, y se encuentra en fase de evaluación con un grupo de pacientes asmáticos y con EPOC en el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER). Se destaca que el IRPS es un complemento del Índice Aire y Salud, y que su difusión tiene objetivos distintos.

Audiencias:



Público en general



Grupos de población vulnerable

Actividades:

1	Comunicar el estado de la calidad del aire a través de una única herramienta e indicador, el Índice Aire y Salud.
2	Promover la actualización del Índice Aire y Salud conforme se modifiquen las NOM de salud ambiental y la evidencia científica y epidemiológica más reciente.
3	Garantizar que el estado de la calidad del aire y el Índice Aire y Salud, así como el pronóstico de calidad del aire, se comuniquen de forma continua, a través de medios electrónicos (sitio web, aplicación AIRE, pantallas informativas, redes sociales) y otros canales de comunicación tradicionales.
4	Cumplir con los lineamientos para la difusión del índice y los valores de concentración en sus unidades correspondientes (µg/m^3, ppb) para el o los contaminantes que contribuyan más a la contaminación atmosférica, así como datos del sitio en donde se determinó dicha concentración.
5	Promover la vinculación y coordinación con otros proveedores de pronósticos de clima y aplicaciones móviles preinstaladas (por ejemplo, The Weather Channel, AccuWeather, Yahoo Tiempo), para que utilicen los datos oficiales del SIMAT y el Índice Aire y Salud en sus reportes de calidad del aire, para así homogeneizar la información que recibe la población. También se podrán establecer convenios con buscadores web para difundir información de calidad del aire y recomendaciones para la protección de la salud.
6	Evaluar la receptividad del índice multicontaminante basado en impactos a la salud observados para la población de la Ciudad de México, esto es, el IRPS. Se destaca el trabajo previo de la Ciudad de México para difundir el IRPS, con base en un pronóstico que prepara a la ciudadanía a “enfrentar” su día y alertar a grupos vulnerables para invitarlos a permanecer atentos cuando se prevén eventos de alta contaminación. Este índice es acompañado de campañas para “conocer tu número”, es decir, el valor del índice en el cual cada persona comienza a experimentar síntomas o malestar, facilitando la comunicación del nivel de riesgo asociado a la contaminación atmosférica y recomendaciones puntuales hacia grupos susceptibles. Con base en los resultados del análisis de la evaluación del IRPS que se está llevando a cabo en el INER, se podrá fortalecer la utilidad de esta herramienta para alertar a grupos vulnerables.

7	Durante la comunicación de riesgos, enfatizar las características sensoriales asociadas a la contaminación del aire (por ejemplo, síntomas, olores, cambios observables en la atmósfera), dado que las personas tienden a ignorar riesgos ambientales que no pueden percibir directamente. También se recomienda enfocarse en las consecuencias de la contaminación atmosférica a través de historias individuales de personas que se han visto afectadas por la mala calidad del aire; el uso de cifras grandes o el número total de víctimas puede mermar la motivación para cambiar conductas personales (OMS, 2020).
8	Continuar proveyendo recomendaciones a la población en general y grupos susceptibles sobre la realización de actividades al aire libre y ejercicio físico en función del nivel de riesgo asociado al estado actual de la contaminación atmosférica, así como otras recomendaciones para disminuir el riesgo o la exposición.
9	Investigar las consecuencias no deseadas de alertar a la población sobre la contaminación del aire (por ejemplo, desincentivar la actividad física o la movilidad activa) y generar propuestas para evitar estas acciones.
10	Crear un personaje emblemático de la calidad del aire de la ZMVM. Con base en buenas prácticas internacionales, este personaje podrá representar el estado de calidad del aire de una manera sencilla y amigable para las audiencias más jóvenes. Como ejemplo, la ciudad de Shanghái en China creó un “bebé de calidad del aire”. Cada estado de ánimo del bebé representa el nivel de riesgo por la calidad del aire en la zona: si el nivel de riesgo es malo, el bebé se muestra llorando, mientras que, si es bueno, se muestra contento. Es importante mencionar que esta es una estrategia de apoyo, puesto que la comunicación a través del Índice Aire y Salud y el IRPS es prioritaria para la prevención de riesgos de salud. La Figura 8.5 muestra un ejemplo de este tipo de estrategias.

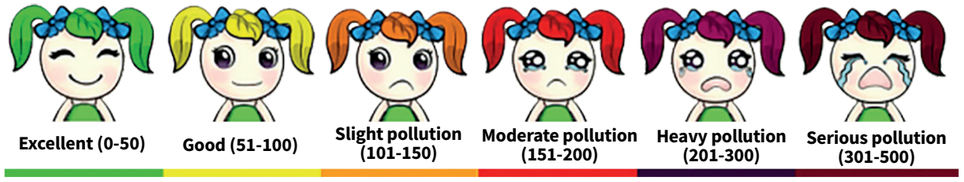


Figura 8.5 Ejemplo de uso de personajes emblemáticos para la comunicación del estado de la calidad del aire
Fuente: *Hsu, 2013.*



Resultados esperados:

La población entiende las diferencias entre los objetivos y usos que puede dar a los diferentes índices disponibles, y ajusta su conducta con base en la información reportada en tiempo real y al pronóstico de la calidad del aire para el siguiente día.

Línea A.4

Capacitar a personal del sector salud en la promoción de medidas preventivas ante la contaminación atmosférica

Los procesos de comunicación de riesgos al público en general y grupos susceptibles deben mejorarse. En este sentido, la comunidad médica y el personal del sector salud cuentan con una posición privilegiada para promover buenas prácticas de prevención, cambios conductuales e incluso tratamiento ante los efectos de la contaminación atmosférica, al tener contacto directo con pacientes y grupos susceptibles. Asimismo, pueden apoyar en la comunicación de los impactos asociados a la calidad del aire, los factores intrínsecos y adquiridos (por ejemplo, condiciones ambientales, sociales o de conducta) que incrementan la vulnerabilidad ante la contaminación atmosférica, y posibles intervenciones personales para reducir el nivel de riesgo. No obstante, se requiere una capacitación del sector para evitar mensajes contradictorios e información errónea sobre la relación entre la calidad del aire y la salud.

Audiencias:

Grupos de población vulnerable

Actores participantes en la implementación del Proaire

Actividades:

1 Generar convenios de colaboración con el sector salud para la integración de programas de capacitación (talleres o cursos) y directrices que informen la práctica clínica del personal de salud en relación con la comunicación diaria con sus pacientes. Por ejemplo, el gobierno de Inglaterra y la ciudad de Londres han integrado materiales de capacitación como infografías, cursos en línea (*e-learning*) y guías diferenciadas para los distintos distritos de Londres (London City Hall, 2015; Public Health England, 2020). Estos materiales y cursos podrán integrarse con el apoyo del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), el INER, el Comité Científico Técnico de Vigilancia sobre Contaminación Atmosférica de la Ciudad de México, entre otras instituciones.

2 Los materiales de capacitación y guías deberán enfocarse en sentar bases técnicas para comprender las causas y efectos de la contaminación atmosférica, contextualizar el estado de la calidad del aire y la emisión de contaminantes a nivel local, identificar los recursos disponibles para comunicar el estado de la calidad del aire y los riesgos asociados, y difundir medidas preventivas y cambios conductuales para reducir la exposición a corto y largo plazo, así como durante episodios de contaminación severa, y tratamiento médico. Asimismo, se deberá poner especial atención a las acciones personales que podrán recomendarse a grupos susceptibles para auto-protegerse y prevenir su exposición a la contaminación atmosférica.

3 Colaborar con las instituciones de educación superior para hacer énfasis en la necesidad de abordar los impactos a la salud por la calidad del aire en la carrera de medicina y afines, así como en programas de residencias y educación continua del personal del sector salud, y complementar la sensibilización del sector salud a través de seminarios organizados por las respectivas dependencias e instituciones de salud en colaboración con el sector de medio ambiente.

Resultados esperados:

Materiales de capacitación y guías para orientar la práctica clínica del personal del sector salud.

Línea A.5

Implementar acciones para prevenir la exposición de grupos vulnerables ante la contaminación atmosférica

Factores intrínsecos y condiciones preexistentes pueden modificar la frecuencia o intensidad de los impactos a la salud por la contaminación atmosférica. Los grupos susceptibles deben recibir especial atención en los procesos de comunicación de riesgos, para que cuenten con herramientas y adopten medidas para reducir su exposición durante sus actividades diarias. Se deben considerar personas con condiciones respiratorias como el asma y la EPOC, condiciones cardiovasculares como la enfermedad isquémica del corazón o hipertensión, y desórdenes endocrinos o metabólicos como la diabetes o la obesidad. Factores asociados a las etapas de vida, como el embarazo, la niñez y la edad mayor, también generan un mayor nivel de riesgo.

Audiencias:

Grupos de población vulnerable

Actores participantes en la implementación del Proaire

Actividades:

1 Comunicar y promover la adopción de consideraciones para la construcción y operación de instalaciones diseñadas para grupos de población susceptibles, como guarderías, escuelas, asilos, hospitales y otros centros de asistencia social y cuidado de la salud. Estas recomendaciones podrán enfocarse en su ubicación, diseño, construcción, ventilación, rutas de acceso, disponibilidad de áreas verdes o espacios para realizar ejercicio físico. El objetivo será contar con espacios seguros, aun durante episodios de contaminación severa. Esta propuesta complementa acciones directas del gobierno en términos de la ubicación de instalaciones, incremento de áreas verdes, propuestas de planes de reducción de emisiones, etc.

2 Apoyar la elaboración de planes de acción de aire limpio por parte de las escuelas. Estos planes podrán incluir acciones para sensibilizar a los alumnos sobre la calidad del aire, integrar el tema en el currículo, prevenir la exposición a la contaminación, reducir o limitar el tráfico vehicular alrededor de las escuelas, limitar emisiones por el uso de productos dentro de las instalaciones, mejorar la calidad del aire interior, involucrar a la comunidad en otras acciones de reducción de emisiones, etc. Un ejemplo de buenas prácticas internacionales es la iniciativa *Transform Our World*[4] del Reino Unido, que permite a las escuelas

4 Para más información se puede consultar la siguiente liga: https://www.transform-our-world.org/programmes/clean-air-for-schools

registrarse a través de una plataforma en línea y propone acciones específicas que cada institución puede implementar. En este sentido, una acción concreta a promover en cada escuela sería la implementación de un programa de banderines, en donde cada día se ice una bandera que represente qué tan limpio o contaminado está el aire. El color de la bandera deberá coincidir con el índice utilizado en la ZMVM para la comunicación del estado de la calidad del aire. El programa permitirá que autoridades escolares ajusten espacios y horarios de recreo o educación física para reducir la exposición, considerando siempre el fomento de la actividad física de las y los estudiantes. Adicionalmente, esta acción puede servir de apoyo a la difusión de información durante la activación de contingencias ambientales y las respectivas acciones durante este tipo de eventos.

3 Realizar campañas de educación ambiental adicionales a los esfuerzos de comunicación de riesgos con el Índice Aire y Salud y el índice de radiación solar, para comunicar medidas de prevención a grupos susceptibles como niñas y niños, personas adultas mayores y personas con enfermedades crónicas o padecimientos preexistentes. Deberá contemplarse la elaboración de materiales de capacitación con mensajes específicos para la audiencia a tratar.

Resultados esperados:

Programas específicos para la integración de espacios seguros y la promoción de intervenciones personales para reducir la exposición de grupos susceptibles a la contaminación atmosférica.

Línea A.6
Sensibilizar a grupos vulnerables para la implementación de acciones preventivas ante la contaminación atmosférica

Además de los factores intrínsecos y biológicos que modifican la asociación entre la calidad del aire y la salud, también existen factores conductuales, ambientales y sociales que pueden poner a ciertos grupos de población en mayor riesgo de sufrir impactos negativos por la contaminación del aire. Estos factores incluyen la actividad física, el modo predominante de transporte utilizado, el estatus socioeconómico, roles de género y ciertas ocupaciones en exteriores. Dependiendo de sus actividades diarias, la población en general debería modificar su comportamiento o implementar acciones personales para reducir su exposición. Al mismo tiempo, las autoridades competentes deben comunicar mensajes claros sobre el nivel de riesgo y recomendaciones específicas para ciertas actividades o grupos de población, así como crear las condiciones para que la población pueda adoptar dichas propuestas, reconociendo que factores socioeconómicos y conductuales podrían limitar la posibilidad de que ciertos grupos de población implementen las acciones necesarias para auto-protegerse.

Audiencias:

Grupos de población vulnerable

Actividades:

1 Generar herramientas para la estratificación cuantitativa de riesgos en función de los factores que influyen en el nivel de exposición, para priorizar la implementación de acciones personales. En ese sentido, se deben considerar los riesgos no deseados de las intervenciones propuestas, como desincentivar la actividad física en exteriores o la movilidad activa.

2 De forma general, promover la actividad física aun cuando las condiciones de calidad del aire no sean óptimas, excepto durante episodios de contaminación severa. El mejor momento del día y la ubicación para realizar este tipo de actividades debe comunicarse considerando los perfiles horarios de los niveles de contaminación y la variación estacional (temporada seca-caliente para ozono y seca-fría para partículas). Los grupos de población vulnerable (por ejemplo, por su estado de salud u ocupación) también deberán recibir recomendaciones específicas para reducir esfuerzos físicos moderados a vigorosos, así como otras actividades en exteriores, durante episodios de contaminación severa.

3 Promover buenas prácticas para reducir la exposición e inhalación de contaminantes durante la movilidad de la población. Por ejemplo, para vehículos automotores se deberá comunicar cuándo sí o cuándo no recircular el aire, cerrar o abrir ventanas y cómo tener una ventilación adecuada, en tanto que para los ciclistas y peatones se podrán promover rutas alternas que eviten el paso por vialidades altamente congestionadas y vigilancia de su correcto uso. También se podrán diseñar campañas informativas dirigidas a conductores del transporte público. No obstante, los mensajes deberán prevenir consecuencias negativas, como el tránsito por vialidades inseguras y el desincentivo de la movilidad activa o en modos de transporte de bajas emisiones.

4 Comunicar el estado de la calidad del aire y los riesgos asociados durante eventos masivos. Una buena práctica es informar el pronóstico de la calidad del aire previo a eventos masivos para que la población pueda implementar acciones para minimizar los impactos a la salud. También es importante incorporar a la calidad del aire como un criterio para la planeación del día y horario de eventos masivos al aire libre (por ejemplo, conciertos, festivales, partidos y otros eventos deportivos, carreras y maratones, ciclotones, entre otros). Considerando que estas son acciones que el gobierno lleva a cabo actualmente, estos criterios también podrán contemplar la reprogramación o cancelación en caso de que las condiciones del aire ambiente representen un riesgo severo. La propuesta se podrá basar en reportes o pronósticos sobre los posibles niveles de contaminación por parte de las autoridades competentes. Asimismo, los gobiernos locales deberán tomar un papel proactivo en la difusión de recomendaciones hacia grupos de población vulnerables durante este tipo de eventos.

5 Promover el uso de respiradores N95 para prevenir la inhalación de partículas. La comunicación de recomendaciones deberá enfocarse en su correcto uso, el reemplazo del respirador o filtro cuando este se sature, y confirmar que se está utilizando un respirador aprobado para remover ≥ 95% de partículas. Asimismo, se deberá advertir a la población con enfermedades respiratorias sobre posibles efectos negativos del uso de respiradores.

Resultados esperados:

Generación de condiciones apropiadas para que la población de la ZMVM implemente recomendaciones específicas que se traduzcan en cambios conductuales y acciones personales para la protección de la salud, particularmente en grupos de personas que son más susceptibles a los efectos de la mala calidad del aire o que son más vulnerables al verse expuestos a la contaminación atmosférica por factores externos, socioeconómicos o conductuales.

Línea A.7
Ampliar la comunicación para la prevención de riesgos durante episodios de contaminación severa y contingencias ambientales atmosféricas

En la ZMVM, los programas de contingencias ambientales atmosféricas han sido instrumentados para evitar que los niveles de contaminación continúen empeorando durante situaciones eventuales y transitorias con concentraciones elevadas de ozono y/o partículas. Esto se logra limitando fuentes de emisión específicas, a la vez que se alerta a la población para disminuir el riesgo asociado con la exposición a dichos niveles de contaminación. Esta línea se enfoca en comunicar de forma clara las acciones que distintos sectores, giros y actividades deberán acatar para limitar emisiones contaminantes, así como la implementación de estrategias de gobierno para reducir la exposición a la contaminación atmosférica, incluyendo la difusión de las recomendaciones específicas que la población en general y grupos susceptibles pueden implementar.

Audiencias:

Público en general

Actores participantes en la implementación del Proaire

Actividades:

1 Alertar a la población sobre los niveles de contaminación antes, durante y después de un episodio de contaminación severa, e intensificar el uso de tecnologías de la información para difundir mensajes, incluyendo alertas personalizadas, la aplicación AIRE, pantallas informativas y redes sociales. En casos extremos, se pueden mandar mensajes de texto a todos los celulares que estén conectados en un área o incluso hacer una serie de llamadas automáticas. También se puede aprovechar el sistema de alerta sísmica de la ZMVM para la comunicación masiva durante contingencias ambientales atmosféricas, y plantear estrategias específicas con los medios de comunicación (radio, televisión, buscadores web) para informar a la población durante estos eventos.

2 Actualizar el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) bajo principios de equidad social y de género. Frecuentemente, la habilidad de las personas para reducir su exposición se vincula con su nivel de ingresos, ubicación y características de sus viviendas, elección de combustibles para calentar agua y cocinar, adquisición de aparatos para la ventilación, acondicionamiento del aire y filtración, actividades del cuidado del hogar y la familia, así como la flexibilidad para modificar su medio de transporte, rutas y horarios de viaje. Por lo tanto, un nuevo PPRECAA deberá diseñarse de tal forma que se consideren distintas alternativas para que la población pueda reducir su exposición. Un ejemplo de esto es incentivar a las empresas a implementar políticas de trabajo en casa cuando existan pronósticos de altos niveles de contaminación para el siguiente día, o durante contingencias.

3 Se deberán evaluar de forma integral la reducción de la exposición y los beneficios en salud asociados a las medidas consideradas durante episodios de contaminación severa, como el cierre de escuelas o la cancelación de eventos deportivos.

Resultados esperados:

Protocolos socialmente equitativos para la disminución de la exposición de la población durante episodios de contaminación atmosférica severa.

8.4.2 Eje B. Participación ciudadana para disminuir emisiones contaminantes

La gestión de la calidad del aire requiere del trabajo conjunto de múltiples actores para la definición de problemáticas prioritarias, la generación y evaluación de posibles soluciones, el alcance de acuerdos y la implementación de las medidas consensuadas. Este esquema cooperativo requiere, además del involucramiento de actores participantes en la implementación del ProAire, la participación activa de la sociedad civil y especialistas en la materia. A continuación, se detallan propuestas para fortalecer los procesos de participación ciudadana en la gestión de la calidad del aire dentro de la ZMVM.

Línea B.1
Implementar programas de educación formal y no formal para promover la adopción de cambios conductuales que apoyen la reducción de emisiones

El primer paso en el involucramiento de la sociedad en la toma de decisiones es la generación de un entendimiento común sobre las causas y efectos de la contaminación atmosférica en la ZMVM. Asimismo, la población debe ser capaz de identificar las soluciones potenciales al problema, incluyendo distintas políticas públicas e intervenciones personales para la reducción de emisiones. También resulta pertinente enfatizar las consecuencias esperadas de implementar o no dichas acciones. La generación de una base sólida de conocimiento facilita el posterior involucramiento de la sociedad civil en la toma de decisiones. En este sentido, los procesos de educación formal y no formal son dos mecanismos para mejorar la comprensión de la población sobre el origen de la contaminación atmosférica y sus impactos, así como las posibles estrategias para la mejora de la calidad del aire. No obstante, estos programas educativos deben ir de la mano de acciones del gobierno que generen las condiciones apropiadas para que la sociedad pueda contribuir en la reducción de emisiones.

Audiencias:

- **Público en general**
- **Grupos de población vulnerable**
- **Actores participantes en la implementación del Proaire**

Actividades:

1 Promover convenios de colaboración con el sector educativo para la incorporación del tema de calidad del aire en los programas de educación básica y media superior de escuelas públicas y privadas en la ZMVM, a través del componente de Autonomía Curricular en el Nuevo Modelo Educativo[5]. Asimismo, esta acción se vincula con el desarrollo de planes de acción de aire limpio previstos en la línea A.5.

2 Integrar programas de educación no formal (cursos, talleres, webinarios, etc.) para la sensibilización de la población en general, y con especial atención a grupos vulnerables. Estos programas deberán contemplar mensajes, medios y canales de comunicación adecuados a las necesidades de distintas audiencias. Una prioridad será difundir información sobre actividades específicas que generan una cantidad significativa de emisiones, y cuya reducción implica cambios conductuales y la implementación de mejores prácticas por parte de toda la población. Un ejemplo de esto son campañas para reducir fugas de gas L.P. en el hogar, disminuir el consumo de combustibles fósiles, adquirir productos de uso doméstico con menor contenido de COV, entre otros; en este sentido, el gobierno debe proveer información detallada para facilitar que las personas identifiquen los productos a adquirir, detecten fugas de gas, etc.

3 Ejecutar un programa de difusión de información de calidad del aire en áreas rurales, enfocado a la reducción del uso de biomasa y carbón en viviendas. El programa deberá elaborarse con perspectiva de género, al ser las mujeres quienes comúnmente están más expuestas a la exposición de la contaminación del aire interior por el uso de combustibles sólidos para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua. Esta propuesta podrá realizarse a través de brigadas en comunidades rurales, y deberá contemplar acciones del gobierno para facilitar alternativas viables que la población pueda implementar, de forma que el componente de comunicación se apoye de acciones concretas que permitan abordar la problemática de forma integral.

4 Instrumentar un programa para reducir la exposición personal por la elaboración de ladrillos, a través de la difusión de las mejores prácticas y casos de éxito, de la mano de proyectos que permitan la implementación de alternativas. El programa deberá contemplar la sensibilización sobre los impactos a la salud, medidas preventivas, equipo de seguridad personal para reducir la exposición y acciones viables para la modernización del proceso de elaboración artesanal de ladrillos para reducir la contaminación.

Resultados esperados:

Programas de educación formal y no formal referentes a la gestión de la calidad del aire en la ZMVM.

5 La autonomía curricular es la *"facultad de las escuelas para adaptar los contenidos educativos a las necesidades y contextos específicos de sus estudiantes y su medio"*. Para más información se puede consultar la siguiente liga: https://www.gob.mx/sep/documentos/la-autonomia-curricular-en-el-nuevo-modelo-educativo

Línea B.2
Visibilizar esfuerzos e impactos de la gestión de la calidad del aire en la ZMVM

Con base en la encuesta de percepción de calidad del aire, actualmente el 62.7% de la población considera que la calidad del aire no ha mejorado en los últimos 20 años, aun cuando las tendencias históricas muestran lo contrario. Visibilizar las acciones de gestión de calidad del aire en la ZMVM, comunicar los avances más importantes y reportar los resultados de estas acciones, incluyendo los beneficios tangibles, es fundamental para recabar el apoyo de los sectores interesados y la población de la ZMVM en los esfuerzos de reducción de emisiones.

Audiencias:

- **Público en general**
- **Actores participantes en la implementación del Proaire**
- **Especialistas en la materia y académicos**

Actividades:

1 Crear cápsulas informativas periódicas sobre el progreso en la implementación de las acciones del presente ProAire, así como acciones principales de programas anteriores que han derivado en mejoras sustanciales en la calidad del aire de acuerdo con información histórica del monitoreo atmosférico (por ejemplo, los últimos 30 años). El objetivo de las cápsulas informativas es crear conciencia sobre cuáles son las entidades responsables de la gestión de calidad del aire en la ZMVM y las diferentes medidas para el mejoramiento de esta. Los estudios de comunicación revelan que los videos tienen un mayor impacto sobre recursos impresos o visuales en temas de salud (Shen *et al*., 2015). La duración de las cápsulas informativas deberá ser corta (no mayor a 3 minutos), y estas se podrán diseminar a través del sitio web y/o las redes sociales correspondientes.

2 Destinar una sección especial para calidad del aire en el apartado de medio ambiente de los Informes de Gobierno del poder ejecutivo de los gobiernos locales de la ZMVM.

3 Establecer un sistema de seguimiento del ProAire vinculado al Sistema de Administración Documental (SAD) de la Ciudad de México, a la Comisión Interinstitucional de Cambio Climático (CICC) y/o al reporte de seguimiento del PACCM, considerando que varias medidas del ProAire son coincidentes y que en su implementación deberán participar distintas dependencias encargadas de la coordinación metropolitana.

4 Crear un espacio exclusivo, dentro del sitio web de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire, para el ProAire. En este espacio se recomienda desplegar las distintas medidas e incluir datos actualizados del progreso en su implementación y sus beneficios, sirviendo como un mecanismo de rendición de cuentas.

Resultados esperados:

Motivación de la población en general y actores relevantes para continuar apoyando la implementación de medidas de reducción de emisiones, al percatarse de los esfuerzos que se han hecho y su impacto positivo.

Línea B.3
Generar espacios que permitan la participación continua de la población en la gestión de la calidad del aire, la toma de decisiones y el seguimiento de los resultados del ProAire

Las siguientes propuestas se enfocan en la generación de espacios donde la población pueda establecer un diálogo con las autoridades responsables de la gestión de la calidad del aire de forma continua, y recibir una respuesta o retroalimentación oportuna, en favor de la implementación, seguimiento y evaluación de las estrategias del presente ProAire.

La cooperación en la identificación de problemáticas prioritarias para la gestión de la calidad del aire y la generación de propuestas para su solución requiere de un diálogo abierto y transparencia en la generación y difusión de información con todas las partes interesadas.

Audiencias:



Público en general



Actores participantes en la implementación del Proaire

Actividades:

1 Aprovechar espacios existentes en los portales ciudadanos de los gobiernos locales para actividades de transparencia y atención de dudas, y fortalecer el conocimiento entre la población sobre mecanismos existentes para el reporte de quejas y denuncias ciudadanas; un ejemplo es el portal para recabar denuncias de fuentes de emisión ostensiblemente contaminantes.

2 Integrar un espacio para recabar propuestas para la implementación de las medidas del ProAire dentro del sitio web de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. Por ejemplo, se podrá contar con un formulario en línea que sirva como mecanismo para convocar a las y los ciudadanos que deseen ser parte de las actividades que se ejecuten en el marco de implementación del ProAire ZMVM 2021-2030[6].

3 Organizar un foro anual para reunirse con actores de la sociedad civil organizada para apoyar el proceso de implementación y seguimiento al cumplimiento de las metas y objetivos del ProAire. Se recomienda gestionar la integración de este espacio en colaboración con el OCCA.



Resultados esperados:
Espacios concretos para la participación ciudadana en el marco de gobernanza del ProAire ZMVM 2021-2030.

6 Por ejemplo, la ciudad de Medellín hace uso de un formulario en línea para promover la participación ciudadana: https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Gobernanza-PIGECA/participacion-corresponsabilidad-ciudadana.aspx

Línea B.4
Involucrar a partes interesadas durante la implementación, monitoreo y evaluación del ProAire

La implementación del ProAire debe ser un esfuerzo multisectorial que integre el actuar de diferentes dependencias gubernamentales, el sector privado, la academia y la sociedad civil, en favor de la salud pública de la población de la ZMVM y el desarrollo sostenible, bajo la coordinación de las Secretarías de Medio Ambiente locales (SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH). Las siguientes recomendaciones tienen como objetivo establecer canales para el trabajo colaborativo entre los distintos servidores públicos, tomadores de decisiones y partes interesadas en la implementación de las medidas de política pública del ProAire ZMVM 2021-2030. Estas propuestas se enfocan en empoderar a todos los actores involucrados y promover la participación activa y constructiva, donde todas las instituciones tengan las mismas oportunidades para expresar sus opiniones y sugerencias para mejorar la implementación, monitoreo y evaluación del Programa.

Audiencias:



Actores participantes en la implementación del Proaire



Especialistas en la materia y académicos

Actividades:

1 Definir mecanismos de comunicación con los distintos actores que intervienen en la implementación de las medidas del ProAire ZMVM 2021-2030, con el objetivo de recabar información sobre el progreso, indicadores de seguimiento, barreras de implementación, etc.

2 Establecer convenios de colaboración con distintos actores, para facilitar la implementación de las medidas del ProAire ZMVM 2021-2030. Se recomiendan los siguientes:

- Con la academia, para promover proyectos de investigación que atiendan temáticas prioritarias para ampliar el entendimiento de los procesos de química atmosférica locales, mejorar el monitoreo y el sistema de pronóstico, incrementar la precisión y exhaustividad del inventario de emisiones, recabar información sobre los impactos a la salud de la contaminación atmosférica a nivel local, entre otros. Para un listado exhaustivo, consultar la Agenda de Investigación en el Capítulo 7.
- Con el sector salud, para generar información epidemiológica relevante para la gestión de la calidad del aire y fortalecer el SIVEESCA, además de difundir información sobre los impactos a la salud de la contaminación atmosférica y prácticas para la prevención de la exposición de la población a concentraciones elevadas, así como para coordinar la capacitación del personal de salud en temas de calidad del aire y salud. En este sentido, se deberá continuar la coordinación con las autoridades de salud, a través de la actualización de convenios pasados.
- Con el sector educativo, para promover programas de educación ambiental y sensibilización a la población en edad escolar, sobre las causas y efectos de la contaminación atmosférica, y cambios de conducta personales para la reducción de emisiones y la protección a la salud. Esta colaboración también deberá enfocarse en la implementación de planes de acción de aire limpio en las escuelas, los cuales buscarán reducir la exposición de las personas en los planteles y limitar las emisiones de las actividades propias de las escuelas y relacionadas a ellas (por ejemplo, el medio de transporte de las niñas y niños).

— Con los medios de comunicación, para homogeneizar mensajes y aumentar la efectividad de los canales a través de los cuales se difunde información de la calidad del aire en tiempo real. Estos convenios podrán contemplar la capacitación del personal de los medios de comunicación, para evitar la desinformación y mejorar los procesos de comunicación.

3 Diseñar protocolos para el seguimiento de la implementación del ProAire, en donde participen los miembros del Comité Núcleo, la sociedad civil organizada y otros actores relevantes. En este sentido, se podrá establecer un consejo ciudadano que tenga facultades para emitir recomendaciones y evaluar el progreso en la implementación.

4 Emitir reportes bienales sobre el progreso en la implementación del ProAire ZMVM 2021-2030, los cuales deberán ser de libre acceso y basarse en la descripción incluida en los Capítulos 10 y 11 del presente Programa. En medida de lo posible, se deberá automatizar la generación de estos reportes con base en los indicadores de cada medida.

5 Organizar dos talleres para la evaluación de la implementación del ProAire. El primero de estos deberá ejecutarse al final de la administración actual, en 2024, y tendrá como objetivo identificar lecciones aprendidas y el progreso detallado en términos de las reducciones de emisiones logradas, para después proponer ajustes a las metas, medidas e indicadores del ProAire. El segundo taller se realizará antes de que concluya el periodo de vigencia del presente programa en 2030, con el objetivo de cuantificar el progreso total e identificar lecciones aprendidas y propuestas iniciales para el siguiente ProAire.

Resultados esperados:
Participación de todos los actores relevantes en la implementación, monitoreo y evaluación del ProAire ZMVM 2021-2030.

8.4.3 Observaciones para el desarrollo e implementación de la Estrategia Integral de Comunicación

Es importante resaltar la necesidad de incorporar a expertos en comunicación en el desarrollo de la Estrategia y el detalle de las distintas líneas de acción. Además, será importante capacitar al personal responsable de los procesos de comunicación y gestión de calidad del aire dentro de las dependencias encargadas, a través de cursos de comunicación en temas ambientales[7].

Asimismo, será necesario considerar un proceso de evaluación y mejora continua antes, durante y después de la implementación de la Estrategia para adaptarla al contexto de la ZMVM. En este sentido, se vuelve relevante la implementación de nuevas encuestas de percepción ciudadana para identificar cambios en la opinión pública respecto de la calidad del aire local, los impactos a la salud y las acciones de reducción de emisiones. También es importante organizar grupos focales para probar las distintas herramientas (por ejemplo, aplicaciones, sitios web) y asegurar que se cumplen los objetivos de comunicación con cada una de las cuatro audiencias prioritarias referidas en este Capítulo.

7 Un ejemplo está disponible en: https://www.theieca.org/training/environmental-communication-research-practice

09

Financiamiento para mejorar la calidad del aire

La elaboración del ProAire ZMVM 2021-2030 se debe acompañar con una estrategia paralela de financiamiento que permita instrumentar la correcta implementación de las medidas involucradas.

09



A más de 30 años de la publicación del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA)[1], primer esfuerzo metropolitano de gestión de la calidad del aire, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se ha vuelto una referencia nacional y mundial en la materia. En este tiempo de éxitos y lecciones aprendidas ha quedado clara la relevancia de acompañar el ejercicio de planeación de la política de gestión ambiental con el desarrollo de los diversos Programas de Calidad del Aire y ahora, la elaboración del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire) 2021-2030 con una estrategia paralela de financiamiento que permita instrumentar la correcta implementación de las medidas involucradas.

Comúnmente, el financiamiento de estos instrumentos de gestión presenta retos importantes. Los recursos económicos que se requieren son significa-

1 Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PICCA). (1990). Recuperado el 28 de enero de 2021, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/ programa_ integral_contra_la_contaminacion_atmosferica.pdf

tivos y algunas de las acciones, por ejemplo, las de infraestructura, requieren de grandes inversiones que demandan costos operativos a largo plazo. El financiamiento requerido se presenta con obstáculos legales e institucionales que dificultan la asignación de recursos constantes e impiden la consignación de los instrumentos recaudatorios en materia ambiental a la continuación de las políticas y estrategias de las que provienen. Otro reto es que los procesos administrativos para obtener aportaciones adicionales son tardados y que su acceso demanda de capacidades de preparación de proyectos, experiencia en la gestión de recursos y disponibilidad de tiempo de la que carecen las áreas operativas que implementan las políticas públicas. Además, las opciones de financiamiento para el gasto corriente o de operación son limitadas, pues los fondos suelen priorizar el gasto de inversión.

Ante estos retos, se han realizado diferentes acciones para asegurar la exitosa implementación del ProAire y se incluye como acción fundamental el desarrollar la Estrategia Integral de Financiamiento (EIF). Por ello, se llevó a cabo un proceso de definición de acciones y priorización, en el que participaron diversos invitados del sector gobierno y sociedad civil, para proponer y priorizar acciones de acuerdo con su costo-efectividad según su potencial de catalizar cambios profundos dentro de la sociedad y de promover la participación de otros actores a través de esquemas de corresponsabilidad. A su vez, el ejercicio involucró la coordinación de distintas dependencias para aumentar su compromiso y, de esta forma, lograr perfilar un costo de implementación sinérgico con los recursos locales o autogenerados. De manera complementaria, se identificaron mecanismos y fuentes de financiamiento nacionales e internacionales que coadyuven a la creación de ingresos que permitan asegurar la disposición de fondos estables y suficientes a corto, mediano y largo plazo.

En este Capítulo se presentan los principios y bases para el diseño de la arquitectura financiera que sustentará la instrumentación de las medidas planteadas en el Capítulo 7, lo cual se resume esquemáticamente en la Figura 9.1. La primera sección corresponde a la descripción de los principios que se evaluarán para desarrollar la EIF, para posteriormente continuar con la descripción de las principales fuentes y mecanismos de financiamiento identificados. En la segunda sección se describen las opciones basadas en recursos públicos a nivel local, estatal y federal; abarcando las bolsas presupuestales, recursos autogenerados, y los fondos y programas locales y nacionales. A continuación, la tercera sección se enfoca en la participación del sector privado, el sector académico y la sociedad civil como respuesta a la acción pública, además de describir otras alternativas mediante las que se puede movilizar capital privado a la implementación de las medidas. Finalmente, la cuarta sección describe algunas fuentes de financiamiento internacional multilateral y bilateral aprovechables para la obtención de recursos adicionales. El Capítulo se complementa con fichas que resaltan la información más relevante de las alternativas descritas, las cuales están disponibles en el Anexo 9.



* Se refiere a la implementación de instrumentos económicos, fiscales y de fomento dirigidos a corregir externalidades negativas, desincentivar comportamientos no deseados y hacer más atractivas determinadas prácticas, productos o tecnologías. Para más información, consultar las secciones 9.2.2 Generación de recursos y 9.3.1 Inversión de particulares a través de la acción pública.

Figura 9.1 Estructura conceptual de la Estrategia Integral de Financiamiento
Fuente: E*laboración propia.*

9.1 Principios de la Estrategia Integral de Financiamiento

Una estrategia de financiamiento tiene que ir más allá de un ejercicio de presupuestación o costeo, por lo que se plantean los siguientes cuatro principios como guía de la EIF: Sostenibilidad Financiera, Practicidad Económica, Corresponsabilidad e Involucramiento del Sector Privado, Académico y Social, y Colaboración Internacional.

Es necesario que la EIF logre permear al diseño mismo de los instrumentos y políticas; es por ello que el primer lineamiento considerado es el de Sostenibilidad Financiera. Esto implica fomentar programas que desde la evaluación de la economía ambiental presentan costo marginal negativo o de beneficio marginal neto. Por ello, en el ProAire se priorizaron políticas que a pesar de que requieren inversión, derivan en ingresos monetarios o sociales que compensan los costes y que potencialmente puedan ser autofinanciables, como son aquellas acciones que fomentan economías de escala, mejoran la productividad y se asocian a importantes cobeneficios.

Algunas de las políticas de gestión de la calidad del aire interactúan con instrumentos fiscales, derechos y mecanismos de sanción. Bajo el primer principio, se propone seguir estrategias de naturaleza recaudatoria neutra que aseguren la modificación de los incentivos para avanzar hacia la internalización del impacto ambiental, de forma que exista un mayor peso sobre los actores que contaminan más. Este proceso de reingeniería de los incentivos busca dotar de legitimidad los instrumentos financieros relacionados a la gestión de la calidad del aire, aunado a que fomenta cambios de comportamiento en beneficio de la mitigación de contaminantes. Se propone que una vez que estos incentivos sean legitimados en su operación, se evalúe la posibilidad de incrementar la base recaudatoria, para así escalar acciones que contribuyan a la mitigación de emisiones, al fortalecimiento de los sistemas de prevención, y la atención a las enfermedades relacionadas con una mala calidad del aire.

En suma, este principio busca que los instrumentos y programas, en la medida de lo posible, sean autofinanciables o de costo adicional mínimo a los presupuestos públicos. Por ello, se proponen instrumentos que no incrementen los costos públicos más allá de lo necesario e instrumentos que favorezcan la participación privada en los gastos y la creación de fondos autogenerados.

Como segundo principio, se propone fomentar la Practicidad Económica de los instrumentos, políticas y proyectos en el Programa. Este es utilizado por agencias ambientales internacionales como la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras (NHTSA) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) para asegurarse que las políticas que promueven alcanzan el mayor nivel de mitigación posible a la vez que son económicamente viables. En otros términos, con este principio se procura establecer los estándares de exigencia para maximizar los beneficios ambientales y sociales netos. Un ejemplo de su aplicación se puede encontrar en la evaluación de impacto regulatorio de la norma de eficiencia energética en vehículos ligeros[2], con la cual se analizan aspectos económicos y ambientales para asegurar que la reforma permita lograr mayores ahorros de combustible, mejorando al mismo tiempo la seguridad y previniendo consecuencias económicas adversas. La practicidad económica es aplicada en términos de la capacidad financiera de los actores regulados, de manera que se asegura que los objetivos ambientales sean consistentes con las metas de desarrollo económico. Por lo tanto, este principio, es central para hacer compatibles los objetivos ambientales y de salud pública con los de desarrollo económico y combate a la pobreza.

Para aplicar este principio en el desarrollo del ProAire, en el proceso de integración y evaluación de las acciones del Programa se incluyeron análisis de costos y beneficios ambientales, así como análisis de sensibilidad y riesgos en aquellas medidas en que la información disponible lo permitió. De esta forma, se busca que las medidas cuenten con requerimientos y estándares que posibiliten una implementación al menor costo y con la mayor ganancia posible en términos de beneficios ambientales.

El tercer principio de la EIF parte del entendimiento que la inversión, el empleo y el medio ambiente no representan fines mutuamente excluyentes. El Programa busca dirigir la mayor cantidad de recursos humanos e inversión a acciones que disminuyan el impacto a la salud y a mejorar la calidad del aire del Valle de México. Es bajo esta lógica que se reconoce la importancia de fomentar una estrecha colaboración e involucramiento del sector privado, académico y social. Estos sectores y las decisiones cotidianas tanto de consumo como de inversión son decisivas en el éxito o fracaso del Programa. Es por ello que el tercer principio está definido por el reconocimiento y fomento de la Corresponsabilidad e Involucramiento del Sector Privado, Académico y Social.

Bajo este precepto se identifica la necesidad de establecer procesos de mejora regulatoria de forma continua en los medios de interacción entre ciudadanía y sector público. Esto con la finalidad de facilitar el correcto cumplimiento y vigilancia en las acciones de mitigación de contaminantes atmosféricos generados por particulares. Instrumentos tales como licencias, garantías, dictámenes de impacto, medidas de integración urbana y medios de sanción, son centrales en la interacción entre gobierno y ciudadanía dado que proveen señales y ajustes al mercado para guiar las decisiones de inversión y las actividades privadas.

Por consiguiente, con la inclusión de este principio se busca fomentar acciones coordinadas de participación público-privada y con la sociedad civil tanto por los programas obligatorios integrados en el ProAire como a través de instrumentos de autorregulación. Además, se fomenta que a través del actuar público surjan acciones de cooperación y coordinación entre personas morales y ciudadanos para facilitar el cumplimiento de las medidas ambientales y alcanzar economías de escala y mejoras logísticas. Con este fin, también se incluye el uso de Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) en la estrategia de monitoreo del Programa y en el planteamiento de la Estrategia Integral de Comunicación. Además, se contempla la creación de plataformas de seguimiento regulatorio y vigilancia ambiental para optimizar los esfuerzos de vigilancia por parte de la autoridad.

Finalmente, el cuarto principio es fomentar y apoyar la Colaboración Internacional en la búsqueda de una mejor calidad del aire para todos los habitantes. Este principio implica la creación de redes de colaboración, diplomacia y cooperación para el desarrollo sustentable con otras ciudades, agencias, organismos e instituciones extranjeras, así como comprometerse frente a los objetivos globales en la materia. La gestión del aire no es independiente a compromisos internacionales, toda vez que los contaminantes climáticos de vida corta[3] tienen efectos importantes en la calidad del aire y en el cumplimiento de las metas internacionales de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero. A manera ilustrativa se puede mencionar la adhesión de nuestro país a los compromisos de la Coalición por el Clima y Aire Limpio (CCAC)[4], los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas[5] y la declaratoria de los Acuerdos de París.

La inclusión de estos principios en el Programa es consistente con la meta de desacoplar el nivel de degradación ambiental del crecimiento económico. Los principios de Sostenibilidad Financiera y

2 Light Trucks, Average Fuel Economy; Model Years 2008–2011; Proposed Rules (Vol. 70, Ser. 167, pp. 51414-51466, Rep. No. 49 CFR Parts 523, 533, and 537 49 CFR Part 533). (n.d.). Federal Register.

3 Importance of Short-Lived Climate Pollutants. (n.d.). International Cryosphere Climate Initiative. Recuperado el 1º de febrero de 2021, de http://iccinet.org/importance-of-short-lived-climate-pollutants/

4 Climate & Clean Air Coalition. (1970). Climate Clean Air Coalition Partners | México. Recuperado el 1º de febrero de 2021, de https://www.ccacoalition.org/en/partners/mexico

5 Objetivos de Desarrollo Sostenible: El PNUD en México. (n.d.). Recuperado el 1º de febrero de 2021, de https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/sustainable-development-goals.html

Practicidad Económica de las medidas elegidas son consistentes con los compromisos gubernamentales toda vez que la transición a una economía verde altamente eficiente en el consumo de los recursos naturales es una de las piedras angulares en los esfuerzos de la agenda internacional y del desarrollo sostenible. Es así como la acción en el ámbito internacional de los gobiernos locales se reconoce como una herramienta para potenciar sus capacidades, misma que apoyará a las entidades que conforman el Valle de México para escalar los esfuerzos de mitigación y prevención de la contaminación atmosférica.

Se reconoce la necesidad de aumentar las capacidades locales para la implementación de los principios descritos, por lo que el desarrollo de la EIF debe buscar priorizar la comunicación y coordinación dentro de las instituciones, así como entre ellas, para potencializar los esfuerzos en cuanto a la consecución y gestión de recursos financieros de una manera adecuada y transparente, la búsqueda de alternativas de financiamiento y la preparación de proyectos. Además, se propone adoptar estrategias para el fortalecimiento de capacidades relacionadas con estas actividades.

9.2 Financiamiento municipal, estatal y federal

La gestión de la contaminación ambiental es una cuestión de corresponsabilidad entre los actores gubernamentales y los ciudadanos; de modo que la exitosa implementación del ProAire está determinada por la colaboración que se tenga entre los diferentes órdenes de gobierno, el sector privado, la academia y la sociedad civil. El inventario de emisiones de la ZMVM 2018, analizado en el Capítulo 5, muestra que la contaminación del aire de la ZMVM está determinada por fuentes emisoras tanto de jurisdicción local como federal; siendo fundamental la participación de las autoridades en estos dos niveles. Por consiguiente, en línea con los principios de Sostenibilidad Financiera, Practicidad Económica y Corresponsabilidad e Involucramiento del Sector Privado, Académico y Social, en esta sección se describen las fuentes de financiamiento que deben representar la mayor contribución para la implementación del Programa, siendo estas: los presupuestos públicos, los recursos autogenerados y los fondos locales y nacionales.

9.2.1 Presupuestos públicos

El Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF) es el documento de política pública en el que se describen la cantidad, la distribución y el destino de los recursos públicos de la Federación para un año determinado. En este se presenta información sobre las participaciones a entidades federativas y municipios, así como el gasto que soporta la operación de las instituciones del Gobierno Federal (SIL, s. f.). De manera correspondiente, el Presupuesto de Egresos y Gasto Público Estatal y los Presupuestos de Egresos de Alcaldías y Municipios comprenden las erogaciones por concepto de gasto público en estos niveles. Por ello, estos instrumentos son de gran relevancia en el ejercicio de presupuestación del ProAire. Como se expone en los siguientes párrafos, uno de los principales retos del ProAire será sostener y, en lo posible, incrementar la cantidad de recursos presupuestales federales, estatales y municipales que se destinen a implementar las medidas en materia de calidad del aire.

A nivel federal, el gasto programado para Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ramo 16) busca incorporar criterios e instrumentos que aseguren la óptima protección, conservación y aprovechamiento de los recursos naturales para alcanzar el desarrollo sostenible. De acuerdo con el Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal 2021, el monto asignado para cumplir con estos objetivos representa el 0.50% del gasto neto total previsto. Si se analiza la tendencia en los últimos años, se encuentra que del 2015 al 2020 hubo una progresiva disminución de recursos públicos destinados al cuidado del ambiente. Si bien el presupuesto del Ramo 16 para el año 2021 aumentó en 4.95% respecto al 2020; la cantidad de recursos asignados para el 2021 equivale al 46.12% de lo presupuestado en el 2015[6] (SHCP, s. f.).

Igualmente, a nivel estatal, los recursos presupuestados a las correspondientes Secretarías del Medio Ambiente de los estados que comprenden el Valle de México son limitados. La proporción que estos montos representaron con relación al gasto total previsto para los ejercicios fiscales 2020 fue de 0.48% en el Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2019), 0.52% en la Ciudad de México (Gobierno de la Ciudad de México, 2019) y 0.28% en el estado de Hidalgo (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2019).

Cabe destacar que el PEF cuenta con otros Ramos Administrativos a través de los cuales se asigna presupuesto a diferentes sectores que influyen en la calidad del aire, de modo que pueden ser usados para favorecer la ejecución de las medidas del ProAire. Por lo tanto, la colaboración y coordinación entre los diferentes niveles de gobierno y sectores son esenciales para la exitosa implementación del Programa.

9.2.2 Generación de recursos

Los impuestos, derechos y mecanismos de sanción son instrumentos fiscales con alto potencial para corregir externalidades negativas, desincentivar comportamientos no deseados y hacer más atractivos determinados productos o tecnologías. Mediante un adecuado diseño, estos mecanismos pueden usarse para aplicar cargas tributarias a los responsables de las fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos de acuerdo con su contribución, a la vez de fomentar el desarrollo e incorporación de tecnologías y productos más amigables con el ambiente. Además, su naturaleza recaudatoria hace posible obtener ingresos para llevar a cabo acciones para mejorar la calidad del aire y beneficiar a la población más vulnerable.

Actualmente, en la ZMVM se aplican estos instrumentos a determinados sectores, como son la tenencia vehicular y las sanciones a los vehículos sin verificación. Por ello, se evaluaron los mecanismos ya existentes y se analizó la creación de nuevos instrumentos con el fin de propiciar cambios favorables a la calidad del aire en los patrones de movilidad, producción y de consumo, y aumentar la disponibilidad de recursos económicos para la aplicación del Programa. Un ejemplo de este esfuerzo es la inclusión de acciones, para detectar y sancionar a unidades altamente contaminantes y vigilar cumplimientos normativos que se sancionarían por las autoridades correspondientes.

Además, se recomienda analizar los impuestos federales, estatales y municipales existentes a fin de encontrar supuestos que se deben modificar o condicionar para evitar que propicien la contaminación o para que estos promuevan la protección ambiental; así como los derechos relacionados con la gestión pública ambiental para asegurar que estos reflejen la externalidad ambiental asociada. Idealmente, estos recursos recaudados deberían “etiquetarse” a las labores de protección ambiental para asegurar que contribuyan a alcanzar las metas establecidas en el Programa y a la implementación de acciones a favor de la población más vulnerable.

6 Valores en términos nominales.

9.2.3 Fuentes de financiamiento locales

A nivel local, existen fuentes de financiamiento importantes para llevar a cabo acciones que busquen mejorar la calidad del aire en la ZMVM, entre las que destacan el Fideicomiso 1490 y el Fondo Ambiental Público (FAP). Estos fideicomisos cuentan con Reglas de Operación claras, lo cual facilita el empleo de recursos públicos para fines ambientales y el manejo transparente de los mismos.

Fideicomiso 1490

El Fideicomiso 1490 "Para apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis" fue creado por el Gobierno Federal en el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS) con el fin de canalizar la planeación y ejecución de acciones, proyectos y programas en materia de protección al ambiente, y de preservación y restauración del equilibrio ecológico en la Megalópolis. Este cuenta con aportaciones del Gobierno Federal y contribuciones de las entidades federativas que integran la Megalópolis y del Gobierno de la Ciudad de México, los cuales anualmente otorgan $5.00 por cada operación de verificación vehicular realizada en su territorio. El fideicomiso también puede recibir donativos de personas físicas o morales y apoyos de organismos internacionales y multilaterales.

De acuerdo con sus Reglas de Operación, estos recursos económicos se dan como apoyos a unidades administrativas, órganos desconcentrados u organismos públicos descentralizados de la Administración Pública, empresas del sector privado, organizaciones de la sociedad civil y la academia, para el desarrollo de proyectos, programas y acciones ambientales de la Megalópolis. De forma específica, se establece que pueden ser financiadas con estos recursos las acciones dirigidas al estudio, diagnóstico, planeación, coordinación, homologación de políticas públicas, evaluación y ejecución de actividades en materia de protección al ambiente, de preservación y restauración del equilibrio ecológico en la región; así como las actividades que permitan un adecuado funcionamiento de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) y el fortalecimiento, administración, comunicación y seguimiento de proyectos de esta índole (Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2020). Bajo estos criterios, siendo las medidas del ProAire afín a los objetivos del fideicomiso, en particular a la mejora de la calidad del aire de la zona, es posible solicitar fondos al Comité Técnico del Fideicomiso a través de la Coordinación Ejecutiva de la Comisión, para la implementación tanto de acciones que reducen emisiones de forma directa como aquellas complementarias.

Fondo Ambiental Público (FAP)

El FAP fue creado en al año 2002 de acuerdo con lo establecido en la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal para financiar el desarrollo y la ejecución de proyectos en el Distrito Federal, ahora Ciudad de México, para la prevención y control de la contaminación ambiental, así como para la mitigación y adaptación al cambio climático. Para este último tema se tiene la subcuenta FACC (Fondo Ambiental de Cambio Climático). Entre los proyectos a sufragar se consideran aquellos correspondientes a las atribuciones otorgadas por ley al Gobierno de la Ciudad de México en materia ambiental y proyectos de medio ambiente, recursos naturales e inspección y vigilancia de acuerdo con las facultades de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA). El Consejo Técnico del fondo es el responsable de aprobar la cartera de proyectos y la Secretaría del Medio Ambiente es la responsable de los procesos de contratación que se requieren para el cumplimiento de los fines establecidos.

En materia de calidad del aire, las Reglas de Operación establecen específicamente que son susceptibles a obtener financiamiento los proyectos que tengan como objetivo la prevención y control de la contaminación atmosférica, el desarrollo de programas de educación e investigación en materia ambiental, el fomento y difusión de prácticas para la protección del ambiente, el otorgar incentivos para la aplicación de tecnología ambiental, el desarrollo de programas vinculados con la inspección y vigilancia, y el coadyuvar a la implementación de programas de gestión ambiental (Secretaría del Medio Ambiente, 2015). Por lo tanto, los recursos de este fondo pueden ser contemplados para las acciones aplicables a los sectores altamente contaminantes, así como para las acciones de comunicación, investigación, monitoreo ambiental, entre otras.

9.2.4 Fuentes de financiamiento nacionales

Con el fin de atender los objetivos estratégicos definidos en los Planes de Desarrollo de los periodos en curso, cada año el Gobierno de la República instrumenta programas a través de las secretarías y dependencias federales. Estos permiten la participación de los gobiernos estatales y municipales para la atención de necesidades y problemáticas locales (INAFED & SEGOB, 2018). Esta sección describe algunos de los apoyos que responden a las necesidades identificadas en el ProAire, mismos que deberán actualizarse anualmente para ubicar programas aprovechables adicionales.

Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN)

El FONADIN es un vehículo de coordinación de la Administración Pública Federal para el financiamiento y desarrollo de proyectos de infraestructura con impacto social y rentabilidad económica, principalmente dirigido a las áreas de comunicaciones, transportes, hidráulica, medio ambiente y turística. De acuerdo con los programas que ofrece y los recursos presupuestados, el apoyo puede aplicarse en la planeación, fomento, construcción, conservación y operación de los proyectos. A su vez, este fondo se caracteriza por promover la participación del sector público, privado y social en el desarrollo de la infraestructura, al facilitar la movilización de capital privado a estos proyectos. Algunas de las acciones que realiza con este fin son otorgar créditos subordinados y/o convertibles, apoyos financieros no recuperables, garantías y aportaciones de capital, y fortalecer las capacidades internas para la evaluación y ejecución de proyectos (Gobierno de México, s. f.).

Particularmente, tres de sus programas resultan atractivos para fomentar la participación del sector privado en esfuerzos de control de emisiones. El Programa de Apoyo Federal al Transporte Masivo (PROTRAM) puede utilizarse para aquellas acciones dirigidas a ampliar la cobertura del transporte público en la ZMVM por su enfoque en la implementación de proyectos de inversión en transporte urbano masivo y el fortalecimiento institucional de planeación, regulación y administración de estos sistemas. Mediante el Programa de Modernización de Organismos Operadores de Agua (PROMAGUA) se puede invertir en el mejoramiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, de forma que tengan como cobeneficio, la reducción de contaminantes atmosféricos locales. De manera similar, el Programa de Residuos Sólidos Municipales (PRORESOL) puede usarse para mejorar la gestión integral de residuos sólidos urbanos (RSU) y, con ello, disminuir las emisiones contaminantes de este sector.

Programa de Mejoramiento Urbano (PMU)

El PMU, coordinado por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), tiene como objetivo mejorar las condiciones de vida de las personas que habitan en comunidades de escasos recursos reduciendo el déficit de infraestructura de los barrios en los que interviene, y brindando certeza jurídica en propiedades. Específicamente, la población objetivo es aquella asentada en municipios y demarcaciones territoriales de las ciudades de quince mil o más habitantes parte del Sistema Urbano Nacional (SUN).

La vertiente del programa que resulta de especial relevancia para el financiamiento de las medidas del ProAire es la Vertiente Mejoramiento Integral de Barrios. A través de esta se otorgan recursos federales en obras y proyectos de equipamiento urbano y espacio público, infraestructura urbana, movilidad y conectividad, proyectos integrales y obras comunitarias; así como en servicios relacionados con su desarrollo (SEGOB, 2020). De manera específica, el programa es una fuente de financiamiento potencial para las acciones que involucran la construcción de infraestructura ciclista, construcción y renovación de elementos para el transporte público, planos de localización de obras de conectividad, así como para la elaboración de proyectos ejecutivos, estudios, dictámenes, planes de obra y servicios de gerencias y supervisión de obras necesarios para la ejecución de los proyectos.

Programa Banobras-FAIS

El Programa Banobras-FAIS consiste en un esquema financiero de crédito multianual con el cual es posible dar en adelanto a un gobierno municipal hasta del 25% de los recursos provenientes del Fondo de Aportaciones para la Infraestructura Social (FAIS) que les corresponden durante su administración. El programa tiene como objetivo beneficiar a sectores de la población en pobreza extrema y localidades con alto o muy alto nivel de rezago social, a través del apoyo para el desarrollo de obras, acciones sociales básicas y otras inversiones. El rubro de los proyectos que se deseen sufragar con este fondo debe estar señalado en el Catálogo FAIS (Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C., 2020); entre los proyectos relacionados con las medidas del ProAire se incluyen proyectos de pavimentación y ciclopistas, plantas de tratamiento de aguas residuales, uso de calentadores solares y estufas ecológicas, sanitarios con biodigestores e infraestructura agrícola (SEGOB, 2019).

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)

La CONUEE es un órgano administrativo que tiene como objetivo promover la eficiencia energética y fungir como órgano técnico para las actividades que incluyen el aprovechamiento sustentable de la energía. Algunas de sus funciones son promover la investigación científica y tecnológica en materia de aprovechamiento sustentable de la energía, participar en la difusión de información, expedir las Normas Oficiales Mexicanas en materia de eficiencia energética, promover la instrumentación voluntaria de sistemas de gestión energética, entre otras (CONUEE, s. f.). Además, ha colaborado con otras instituciones para ofrecer programas para incrementar la eficiencia energética en inmuebles, flotas vehiculares e instalaciones industriales de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal; así como para impulsar el aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua en los sectores residencial, comercial, industrial y de agronegocios. Como resultado, el apoyo técnico de la CONUEE resulta útil para los procesos de normalización y otras actividades que fomenten la reducción en el consumo de combustibles fósiles que se contemplan dentro del Programa.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)

El CONACyT es una institución que promueve, coordina y articula las actividades científicas y tecnológicas del país. Esta cuenta con distintos tipos de fondos para coordinar esfuerzos para la generación de conocimiento, innovación, desarrollo tecnológico, formación de recursos humanos y fortalecimiento de la capacidad científica y tecnológica. A través de ellos, el CONACyT otorga apoyos y financiamientos a universidades e instituciones de educación superior, centros, laboratorios, empresas públicas y privadas y a las personas que forman parte del Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas; para que estos actores realicen diferentes actividades directamente vinculadas al desarrollo de la investigación científica y tecnológica. Se realizan diferentes convocatorias, algunas de ellas específicamente asociadas con los procesos contaminantes y sus impactos socioambientales (CONACyT, 2019), de forma que representa una alternativa importante para cubrir los costos asociados a la Agenda de Investigación del ProAire.

9.3 Participación del sector privado, académico y social

Como se explicó en la sección anterior, la generación de recursos financieros a través de impuestos, derechos y mecanismos de sanción es una alternativa para involucrar al sector privado, la academia y la sociedad civil en la atención de la calidad del aire. Sin embargo, existen otros instrumentos que generan obligaciones e incentivos que ayudan a fortalecer el principio de Corresponsabilidad e Involucramiento del Sector Privado, Académico y Social. En esta sección se aborda cómo la acción pública puede movilizar la inversión de particulares a las medidas establecidas en el Programa, así como otras fuentes de financiamiento aprovechables que involucran a estos tres sectores.

9.3.1 Inversión de particulares a través de la acción pública

En armonía con el tercer Eje Estratégico de la Estrategia Nacional de Calidad del Aire 2017-2030[7], el presente apartado propone instrumentar un sistema que combine la observancia obligatoria de la normatividad, incentivos de autorregulación y acciones coordinadas de participación público-privada, con el fin de fomentar el involucramiento de particulares para controlar, mitigar y prevenir la contaminación atmosférica, así como para desarrollar nuevos mercados de bienes y servicios con menor impacto ambiental.

Se ha visto que, para dinamizar la participación y el compromiso del sector privado, académico y social al mejoramiento de la calidad del aire, es posible implementar instrumentos económicos, fiscales y de fomento, para que los particulares adopten voluntariamente programas de innovación tecnológica en sus actividades. Del mismo modo, se han emitido normas oficiales mexicanas asociadas a características específicas de emisores, como umbrales máximos permisibles de emisión de contaminantes o requisitos ambientales para los bienes que producen, para regular a los agentes contaminantes y promover el uso de tecnologías y productos con menor impacto ambiental. Además, se ha buscado fortalecer los convenios permitidos por ley para promover la colaboración entre las autoridades y particulares para reducir la emisión de contaminantes (SEMARNAT, 2017). Otros ejemplos de instrumentos que han ayudado a dirigir la participación de estos agentes son licencias, garantías,

7 SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de Calidad del Aire Visión 2017-2030. Recuperado el 10 de febrero de 2021, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf

dictámenes de impacto, medidas de mitigación urbana[8], medios de sanción, e incentivos como la depreciación acelerada.

De manera similar, en el ProAire se propone fortalecer los instrumentos existentes y crear nuevos con el objetivo de dirigir la oferta de bienes y productos hacia aquellos que causen un menor impacto en la calidad del aire y la salud de la población. Para esto se incluyen acciones de actualización normativa y regulatoria que abarcan al sector de transporte, comercial e industrial; así como incentivos como la restricción zonal y horaria a la circulación de unidades de transporte altamente contaminantes, la extensión de concesiones a unidades eléctricas y unidades con filtros de partículas, entre otros. También, el Programa busca aprovechar el desarrollo de tecnologías de información y comunicaciones para mejorar la vigilancia, transparencia y la realización de trámites correspondientes. Mediante estas acciones, en conjunto con la Estrategia Integral de Comunicación, se inducirán cambios en los hábitos de la ciudadanía.

Adicionalmente, se propone analizar el establecimiento de alianzas público-privadas (APP) para la provisión de servicios públicos e infraestructura, o como aportaciones del sector privado derivadas de su responsabilidad social y ambiental. En el primer contexto, el sector privado proporciona el capital necesario para la implementación de las acciones con altos niveles de inversión, por lo que a su vez reciben retornos financieros provenientes de cargos a usuarios o de pagos directos del sector público. En el segundo contexto, la APP se establece como una relación de trabajo colaborativo en la cual la toma de decisiones se hace de forma compartida. Este tipo de alianzas pueden maximizar el costo-efectividad de los proyectos, no obstante, se debe prestar atención en su diseño para cuidar que en todo momento se privilegien los objetivos de cada proyecto (Centro Mario Molina, 2014).

Los esquemas APP se han adoptado en un amplio rango de sectores; siendo algunos de ellos importantes emisores de contaminantes atmosféricos. Es común que se implementen en proyectos de infraestructura de transporte, saneamiento y gestión de RSU. Un ejemplo del uso de este mecanismo se tiene en el proyecto "Saneamiento integral de las aguas residuales y biosólidos del municipio de Saltillo", el cual consistió en la construcción, operación, mantenimiento y conservación de dos plantas tratadoras de aguas residuales por un desarrollador privado, a cambio de un pago por los servicios prestados (CEFP, 2016). De manera similar, en el sector de RSU se han establecido estas asociaciones por los servicios de recolección puerta a puerta; transporte de residuos a instalaciones de disposición integrales; y diseño, construcción, operación y mantenimiento de instalaciones de procesamiento y tratamiento, y de rellenos sanitarios (Almeyda, s. f.). Un ejemplo reciente se tiene en el proyecto de inversión pública productiva denominado "Manejo y aprovechamiento de residuos orgánicos, mediante valorización energética en el municipio de Naucalpan de Juárez". En este se contempla implementar una planta de tratamiento mecánico-biológico y un sistema de valorización energética con recursos públicos y aportaciones de inversionistas que se recuperarán dada una concesión para la construcción y explotación del proyecto (Jiménez, 2020).

9.3.2 Financiamiento privado, académico y social

Existen además otras estrategias que pueden aprovecharse para aumentar el flujo de recursos humanos y monetarios a las acciones de reducción de emisiones y atención a la salud. Así como los sectores privado, académico y social ofrecen recursos financieros a través de programas y fundaciones, existen fuentes de financiamiento dirigidas a estos sectores que pueden ser aprovechados para estos fines. Asimismo, en los últimos años se han desarrollado instrumentos de mercado que involucran el factor social y financiero y que responden a problemas ambientales. Es por ello que en esta sección del ProAire se identifican algunos mecanismos que tienen el potencial de apoyar la implementación de las medidas a favor de la calidad del aire y la salud de las personas.

8 Definidas como "Las condiciones que deben cumplir las personas físicas o morales que construyan, amplíen, reparen o modifiquen una obra con el fin de integrarla al entorno urbano, a la vialidad, a la estructura socioeconómica, a la infraestructura y a la imagen urbana" en la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal No 883, pp. 5, 15 de Julio 20110, Ciudad de México.

Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE)

El FIDE es un organismo privado de participación mixta que brinda apoyo a los municipios y a los sectores domiciliario, industrial, agrícola, comercial y de servicios en el desarrollo e implementación de acciones que propician el uso eficiente de la energía y el aprovechamiento de la energía de fuentes renovables. Este organismo cuenta con programas, proyectos, productos y servicios a través de los cuales ofrece asistencia técnica, diagnósticos energéticos, apoyo en la realización de proyectos de eficiencia energética y financiamiento con condiciones preferenciales para la adquisición o generación de productos que permitan el ahorro de energía eléctrica y la reducción del consumo de gas L.P.

Los programas que resultan aprovechables para la ejecución del ProAire incluyen el de Eficiencia Energética, Eco-Crédito Empresarial y Mejoramiento Integral Sustentable en Vivienda. Estos apoyan a comercios, empresas, industrias y viviendas a realizar acciones de reducción de emisiones contaminantes, por ejemplo, al apoyar la sustitución de equipos de diésel y gas natural por equipos de alta eficiencia, así como la adquisición de calentadores solares, aislantes térmicos y calentadores de gas de alta eficiencia energética. Adicionalmente, el organismo promueve la creación de conciencia en la sociedad con relación al aprovechamiento y uso eficiente de la energía mediante actividades (FIDE, 2021). Por lo tanto, el financiamiento y la asistencia técnica que ofrece el organismo puede contemplarse, además, para difundir y capacitar a la población respecto a buenas prácticas para reducir el consumo de combustibles fósiles.

Bonos Verdes

Los Bonos Verdes son instrumentos de deuda que buscan fortalecer el desarrollo de mercados ambientales y acelerar la transición hacia una economía baja en carbono. Estos pueden ser emitidos en la Bolsa Mexicana de Valores (BMV) por cualquier entidad gubernamental o privada que busque financiar o refinanciar proyectos de los siguientes sectores, los cuales a su vez se relacionan con calidad del aire: energía renovable, construcción sustentable, eficiencia energética, transporte limpio, agua / adaptación, manejo de residuos / captura de metano, o agricultura / bioenergía / forestación / cadena de abastecimiento de alimentos. Se debe considerar que, para que el instrumento sea considerado como Bono Verde, este debe contar con una certificación de Climate Bonds Initiative u obtener una opinión positiva por firmas de consultoría o de auditoría según los Principios de Bonos Verdes presentados por la ICMA (International Capital Markets Association) (Grupo BMV, s. f.).

Un ejemplo de cómo se puede aprovechar el instrumento para reducir contaminantes globales y locales es el Bono Verde emitido por el Gobierno de la Ciudad de México en 2016. Este fue utilizado para financiar y refinanciar proyectos de inversión de obra pública, entre los cuales se encontraban la adquisición de trenes ligeros y el mejoramiento del Sistema de Transporte Colectivo Metro, en conjunto con otras obras de eficiencia energética y de administración de agua y manejo de aguas residuales (Carbon Trust México S.A. de C.V., 2018).

Bonos de Carbono

El Mercado Voluntario de Carbono es una iniciativa de la Plataforma Mexicana de Carbono, MÉXICO$_2$, la cual hace posible que proyectos de mitigación ofrezcan bonos de carbono a empresas e individuos para que estos compensen sus emisiones de CO_2 equivalente generadas en un determinado período. Estos proyectos pueden ser de los sectores de energías renovables, eficiencia energética, manejo de residuos o forestales; aunado a que deben contar con un certificado que garantice la reducción de emisiones (México2, 2016). Por lo tanto, este instrumento puede ayudar al financiamiento o mantenimiento de proyectos de esta índole, a la vez de que los vuelve más atractivos. Con relación a los objetivos de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos locales y globales estos pueden usarse para proyectos especializados en la captura, extracción y aprovechamiento de gas metano en rellenos sanitarios o en proyectos forestales para respaldar acciones de reducción de emisiones por fuentes naturales y para fortalecer las capacidades de combate a incendios.

Fundaciones

Existen diferentes fundaciones donde se canalizan fondos a acciones con beneficios sociales y ambientales. Dos ejemplos de fundaciones que destinan recursos en el área de salud y, por lo tanto, pueden complementar el financiamiento de las acciones de protección a la salud pública son la Fundación Gonzalo Río Arronte y la Fundación Carlos Slim. La primera otorga donativos para el desarrollo de proyectos orientados a resolver problemas de salud, para lo cual anualmente publica convocatorias que definen las áreas de especialidad médica que se atenderán en el periodo (Fundación Gonzalo Río Arronte, 2019). La segunda impulsa proyectos de innovación, investigación y comunicación educativa; en los que destaca el desarrollo de aplicaciones móviles y manuales (Fundación Carlos Slim, s. f.). Asimismo, existen fuentes internacionales, como la Fundación William and Flora Hewlett que ha otorgado donaciones en años pasados a iniciativas relacionados con la calidad del aire a través de la Fundación México- Estados Unidos para la Ciencia A.C. (FUMEC), específicamente para el fortalecimiento de la red de monitoreo de la calidad del aire (William and Flora Hewlett Foundation, 2003).

9.4 Colaboración internacional

La cooperación internacional para el desarrollo ha surgido como un esfuerzo conjunto de gobiernos, organismos internacionales, sociedad civil, academia y sector privado para promover acciones que contribuyan a mejorar la calidad de vida de las personas a nivel global y a alcanzar el desarrollo sostenible. Con este fin se ha buscado el intercambio de conocimientos, experiencias y recursos entre países, dando como resultado diferentes esquemas de cooperación bilateral y multilateral (Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo, 2018). Es el principio de Colaboración Internacional el que busca fomentar y apoyar la cooperación entre países para mejorar la calidad del aire.

En esta sección se describen algunas fuentes de financiamiento que pueden ser aprovechadas para financiar acciones en materia de calidad del aire[9]. A pesar de que la mayoría de las alternativas existentes no buscan atender específicamente este problema, estas ofrecen apoyo multisectorial que puede asistir en la implementación de las medidas. También, debido a las sinergias que existen entre las acciones climáticas y la contaminación atmosférica, los fondos y mecanismos financieros dirigidos al cambio climático pueden usarse para invertir en acciones que cumplan con los dos objetivos: reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes locales, como lo que respecta al sector de movilidad, tratamiento de aguas residuales y manejo de RSU.

Es importante mencionar que la lista no es limitativa, de forma que la EIF debe incluir esfuerzos para la identificación de fuentes de financiamiento internacionales y de actualización debido a los cambios que presentan con el tiempo. Es común que dentro de ellas se establezcan programas que respondan a las prioridades de un determinado momento, de forma que el ejercicio de identificación de fuentes se debe llevar a cabo de manera regular. Además, debido a que el éxito de acceder a los fondos está relacionado con la capacidad de preparación de proyectos, es recomendable reforzar estas habilidades dentro de las dependencias involucradas.

Finalmente, se debe tener en cuenta que el Artículo 117 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) y la Ley Federal de Deuda Pública establecen que los gobiernos subnacionales no pueden contraer obligaciones financieras con entidades extranjeras por lo que se requiere que el acceso a estos fondos se haga a través del Gobierno Federal, siendo fundamental la coordinación entre las dos partes (GIZ, 2017).

9.4.1 Financiamiento multilateral

Uno de los esquemas en los cuales se encuentra el apoyo internacional es a través de acciones de cooperación desarrolladas entre países y organismos internacionales y/o regionales. México, como un actor con responsabilidad global, ha promovido establecer una agenda internacional responsable comprometida con el desarrollo sostenible al participar activamente en estos esfuerzos (Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo, 2018). Evidencia de esto se ve en su participación en la Coalición Clima y Aire Limpio para Reducir los Contaminantes Climáticos de Corta Vida (CCAC, por sus siglas en inglés). Asimismo, se ha trabajado en conjunto con organismos de la banca multilateral de desarrollo como el Banco Mundial (BM), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) en el desarrollo de proyectos en el país de los sectores hidráulicos y de saneamiento, educación, salud, energía, transporte, entre otros (Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C., 2021). A continuación se describen las fuentes mencionadas y cómo estas pueden apoyar a reducir la contaminación atmosférica.

Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC)

La CCAC es una asociación voluntaria de gobiernos, organizaciones intergubernamentales, empresas, instituciones científicas y organizaciones de la sociedad civil comprometidas con mejorar la calidad del aire y proteger el ambiente mediante la reducción de contaminantes climáticos de vida corta en los diferentes sectores (CCAC, s. f.-a). Su acción está centrada en la reducción de metano, carbono negro e hidrofluorocarburos (HFCs) como complemento a la acción global para reducir el CO_2 (UNEP, 2017). Esta actúa conforme a once iniciativas, entre las que se encuentran la reducción de emisiones del transporte de carga y las actividades domésticas, la mitigación de contaminantes del sector de residuos sólidos, el incremento de la acción en las prácticas de agricultura, y en fomentar la colaboración entre actores económicos, ambientales y de salud (CCAC, s. f.-c).

9 En el ejercicio de identificación de fuentes de financiamiento se evaluaron otras fuentes que, si bien apoyan iniciativas que tienen como objetivo mejorar la calidad del aire y la salud de las personas, no trabajan en la región como el Fondo de Aire Limpio. Además, se analizaron otras fuentes de cooperación internacional que tienen una importante presencia en México pero que enfocan los esfuerzos que realizan en el país en otros temas prioritarios, por ejemplo, el Instituto de Crédito para la Reconstrucción (KfW) y la Fundación Fondo de Inversión Infantil (CIFF, por sus siglas en inglés). Por consiguiente, se recomienda evaluar las alternativas de financiamiento periódicamente para identificar las prioridades del momento.

Para apoyar sus actividades, la asociación cuenta con un fondo fiduciario administrado por la Secretaría de la CCAC. En el periodo 2012-2021 se recaudaron 94.2 millones de dólares americanos, los cuales se han destinado a proyectos de desarrollo de capacidad y asistencia técnica en países en desarrollo, y a proyectos que catalicen la acción en sectores clave emisores de contaminantes (CCAC, s. f.-b).

Como miembro fundador de la CCAC, México ha participado de forma cercana en diversas iniciativas. Destaca la participación de la Ciudad de México en 2018 en la campaña BreatheLife, mediante la cual implementó esfuerzos de energía limpia y mejoramiento del transporte público (CCAC, s. f.-d). El país puede seguir participando activamente en la Coalición a través de las acciones identificadas en el ProAire para los sectores contaminantes, como son el transporte de carga, residuos sólidos, labranza y cosecha, sector doméstico y salud y comunicación para celebrar convenios de colaboración con actores relevantes.

Banco Mundial (BM)

El Grupo Banco Mundial es una asociación mundial comprometida con reducir la pobreza, generar prosperidad compartida en los países en desarrollo y promover el desarrollo sostenible. La asociación se encuentra conformada por 189 países miembro, siendo México parte de ellos, y su acción se enfoca en otorgar financiamiento y asistencia técnica a los gobiernos de los países en desarrollo y a empresas privadas. El financiamiento del BM se aporta mediante préstamos tradicionales, créditos sin interés, donaciones y garantías; además de que facilita el financiamiento mediante fideicomisos o canalizando donaciones bilaterales y multilaterales, en ocasiones, gestionando las iniciativas de otras instituciones (Banco Mundial, 2021).

Una de las áreas de atención del BM es la gestión de la contaminación y salud ambiental. La institución trabaja con los países en desarrollo para mejorar la calidad del aire, promover la prevención de la contaminación, y fortalecer la gobernanza y regulación ambiental, así como la implementación de las políticas (Banco Mundial, 2018b). Esta brinda atención a los diferentes sectores emisores, como son el transporte, el manejo de RSU y aguas residuales, la industria y la agricultura; además de que cuenta con proyectos de salud e información y comunicación (World Bank, s. f.) Algunos de los proyectos que el BM ha apoyado en México en los últimos años son el Proyecto de Transformación del Transporte Urbano para mejorar la calidad de los sistemas de transporte público y de transporte no motorizado, así como el flujo y la seguridad del tránsito (Banco Mundial, 2018c); y el Proyecto de Manejo de Desechos y Captura de Carbono, el cual apoya el desarrollo de tres instalaciones de gas en rellenos sanitarios para la captura de metano y generación de energía (Banco Mundial, 2018a). Por ello, se puede solicitar apoyo al BM para la ejecución de acciones similares que atiendan el deterioro de la calidad del aire.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

El BID es una institución financiera regional dedicada a impulsar el desarrollo de América Latina y el Caribe. La institución da apoyo financiero y técnico con el objetivo de alcanzar el desarrollo de una manera sostenible. Este ofrece soluciones financieras flexibles a entidades públicas y privadas de la región, las cuales incluyen préstamos, donaciones, garantías e inversiones; estas últimas se encuentran disponibles para el sector privado a través de BID Invest y para emprendedores innovadores mediante BID Lab. Estos apoyos pueden usarse para financiar bienes, obras públicas y servicios. Además, el BID patrocina programas nacionales y regionales de cooperación técnica que promuevan el fortalecimiento institucional o la transferencia de conocimientos (BID, 2020).

México en uno de los veinte países que se asociaron para la creación del BID y continúa siendo un país miembro. Actualmente, la Estrategia del BID con México para el período 2019-2024 se enfoca en contribuir al crecimiento económico inclusivo y sostenible, y al dinamismo de la productividad a través de las áreas de mercados financieros, inversiones sociales, medio ambiente y desastres naturales, agricultura y desarrollo rural, agua y saneamiento, ciencia y tecnología, educación, y energía (IDB, 2020). Con relación a las áreas de atención identificadas en el ProAire, dentro de la Estrategia se menciona que el BID apoyará iniciativas para mejorar los servicios de agua y saneamiento, y la regularización de los sitios de disposición final de RSU; además de fomentar el desarrollo de asociaciones público-privadas en estos dos sectores. También, habla de que contribuirá a fomentar el uso del suelo de forma organizada, promover prácticas agrícolas con menor impacto ambiental, proveer asistencia técnica para el diseño de infraestructura de transporte urbano y apoyar programas de eficiencia energética (IDB, 2019).

Banco de Desarrollo de América Latina (CAF)

El CAF es una institución que busca mejorar la calidad de vida de los latinoamericanos, al promover el desarrollo sostenible y la integración de la región. Este provee créditos, recursos no reembolsables y apoyo en la estructuración técnica y financiera de proyectos del sector público y privado que promuevan el acceso a los servicios básicos, el desarrollo de infraestructura de calidad y aumento de productividad, la modernización de la administración pública, y la integración comercial, física y financiera de la región.

Entre sus áreas de atención incluye agua, ambiente y cambio climático, ciudades, investigación, transformación digital y transporte. Se considera una fuente de financiamiento adecuada para la ejecución del ProAire gracias al apoyo que ha dado a proyectos relacionados con contaminación atmosférica como proyectos de saneamiento de agua, infraestructura ciclista, espacios verdes, vivienda sustentable, construcción de corredores de transporte urbano, pavimentación, entre otros (CAF, 2021).

9.4.2 Financiamiento bilateral

Además de participar en esfuerzos para el desarrollo que involucran a muchos países, México ha buscado la posibilidad de establecer convenios de cooperación con otros gobiernos y organizaciones internacionales basándose en la situación particular de cada país. Dentro del marco de cooperación financiera y técnica, se han establecido áreas prioritarias y programas para atenderlas. A continuación, se describen algunas vías de apoyo que están relacionadas con la calidad del aire y la atención a la salud de las personas, derivadas del trabajo conjunto de México con Reino Unido, Alemania, Francia, Estados Unidos y Japón.

Fondo de Prosperidad México- Reino Unido

El Fondo de Prosperidad es un programa que tiene como objetivo reducir la pobreza, promover la equidad de género y apoyar el desarrollo económico inclusivo al incrementar la productividad a través de tecnología e innovación, desarrollo de habilidades y fortalecimiento de regulaciones. Entre las estrategias en la que se enfoca se encuentran el desarrollo de ciudades más seguras, resilientes y con servicios de movilidad sustentable (Gobierno de Reino Unido, 2020).

El fondo es relevante para el ProAire debido a que en la Ciudad de México los recursos han sido aprovechados para atender necesidades de transporte público. El acuerdo de colaboración firmado en 2020 para mejorar las condiciones de movilidad en la capital del país es un ejemplo del compromiso de ambos gobiernos en la materia. El apoyo consiste en acompañamiento técnico para la realización de proyectos orientados al fortalecimiento institucional, la consolidación del sistema integrado de transporte público y la elaboración de un modelo financiero para mejorar la calidad de servicio y garantizar la sustentabilidad del sistema a largo plazo (Ciudades del Futuro, 2020). Por ende, este acompañamiento resulta benéfico para atender la emisión de contaminantes que se asocian a este sector.

México- UK PACT

El UK PACT cuenta con programas para trabajar en conjunto con países que buscan alcanzar un crecimiento limpio proporcionando subvenciones a proyectos de desarrollo de capacidades. Gracias a su alianza con México, este apoya proyectos que permiten, incentivan y empoderan a agentes relevantes a reducir emisiones contaminantes. El financiamiento se enfoca en cinco áreas prioritarias en función de su potencial de reducción de emisiones: finanzas verdes, movilidad sostenible, energía, política climática y bosques y suelos (UK PACT, 2020). Por dichos aspectos, mediante el programa es posible conseguir asistencia técnica en la creación de políticas y el desarrollo de capacidades y habilidades para potencializar el impacto de las medidas de mitigación del sector transporte, labranza y cosecha, entre otros.

Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ)

La GIZ es una empresa federal que asiste al Gobierno alemán a alcanzar sus objetivos de cooperación internacional para el desarrollo sostenible. Por lo tanto, la GIZ asesora al Gobierno mexicano sobre proyectos con beneficios ambientales y sociales (GIZ, s. f.-b). Entre sus servicios asociados al control de la contaminación del aire destaca el programa “Infraestructura sustentable: agua, energía y transporte”, el cual se enfoca en ofrecer capacitación y asesoría para políticas y proyectos de manejo sustentable de agua, manejo de residuos y reciclaje, energía renovable y eficiencia energética, y movilidad sustentable (GIZ, s. f.-c). Otro ejemplo de cómo se puede aprovechar el apoyo de la GIZ en México para mejorar la calidad del aire es el programa implementado de 2014 a 2019 con nombre Gestión Ambiental Urbana e Industrial II. El trabajo del programa consistió en el desarrollo de soluciones en ciudades piloto para mejorar su gestión ambiental, lo cual incluyó la introducción de zonas de bajas emisiones, proyectos de manejo adecuado de los RSU y la elaboración de manuales para fortalecer la educación ambiental (GIZ, s. f.-a).

Agencia Francesa para el Desarrollo (AFD)

La AFD es una institución pública financiera comprometida con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Para contribuir a la construcción de un mundo más justo y sostenible, la AFD apoya proyectos de diferentes sectores, incluidos clima, energía, educación y capacitación, salud y protección social, agua y saneamiento, movilidad y transportes, gobernanza, ciudades sostenibles, agricultura y desarrollo rural, infraestructuras, tecnología digital e innovación, entre otros. La Agencia cuenta con una amplia oferta de instrumentos financieros tanto para gobiernos como para organizaciones no gubernamentales; entre los que se tienen subvenciones, préstamos, garantías, entre otros.

La acción de la vertiente de Ciudades Sostenibles busca garantizar que todos los habitantes tengan acceso a servicios de agua potable y saneamiento, recolección y gestión de RSU, áreas públicas, entre otros, con un enfoque sostenible; por lo que la vertiente fomenta soluciones que resulten en menores emisiones contaminantes y protejan la salud de las personas. Además, atiende la degradación de la calidad del aire al brindar asesoría en la planeación de sistemas de movilidad urbana, apoyar la construcción de transportes públicos de calidad y promover el uso de los transportes eléctricos, autos compartidos, métodos de movilidad activa y la modernización de las flotillas. Adicionalmente, favorece la adopción de sistemas de medición y de gestión de datos que se pueden usar para el monitoreo de la concentración de contaminantes, y promueve la lucha de la contaminación urbana atmosférica como un principio del ecourbanismo (AFD, s. f.-b).

Otra vertiente de la AFD que resulta relevante para la ejecución del ProAire es la de investigación. Esta área se rige por la Estrategia de Investigación, Innovación y Conocimiento, la cual busca favorecer procedimientos colaborativos para crear herramientas de modelización y publicar estudios, análisis y trabajos (AFD, s. f.-a). Estos esfuerzos pueden ir dirigidos a mejorar la calidad del aire al apoyar las acciones prioritarias de la Agenda de Investigación del ProAire.

Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID)

La USAID es una agencia federal independiente que se encarga de planificar y administrar asistencia económica y humanitaria en otros países. Entre los sectores para los cuales ofrece apoyo se incluyen agricultura y seguridad alimentaria, medio ambiente y cambio climático, salud, y agua y saneamiento. A su vez, el apoyo consiste en subvenciones, préstamos concesionales y capacitaciones a entidades gubernamentales y no gubernamentales (USAID, 2021).

En México, con relación a calidad del aire, las iniciativas que apoya incluyen programas para reducir la degradación de bosques (evitando la emisión de partículas por erosión y los incendios forestales), el fortalecimiento del monitoreo, reporte y verificación de emisiones, la reducción de emisiones provenientes de aguas residuales y residuos sólidos, entre otras (USAID, s. f.). Entre las acciones que USAID ha apoyado en el país incluyen el Proyecto Piloto Retrofit, con el cual se demostró la reducción de emisiones en autobuses a diésel en condiciones de operación y manejo de la Ciudad de México usando diésel de ultra bajo contenido de azufre y dispositivos de control de contaminantes (Gobierno del Distrito Federal, 2006), proyectos pilotos en comunidades locales para asegurar el manejo sustentable de la tierra (TNC México, 2018), y el diseño conceptual de sistemas en línea para el monitoreo/evaluación de planes estratégicos (USAID, 2012).

Becas Fulbright- García Robles

Los programas de becas Fulbright-García Robles, administradas por la Comisión México-Estados Unidos para el Intercambio Educativo y Cultural (COMEXUS), se dirigen a estudiantes, investigadores y maestros mexicanos y estadunidenses para que realicen estudios de posgrado, estancias de investigación, docencia y programas de profesionalización en estos dos países (Comexus Fulbright-García Robles, 2013). El ProAire reconoce la necesidad de generar más conocimiento con respecto a los cambios en la química atmosférica, los procesos de formación de contaminantes secundarios, los impactos de la calidad del aire diferenciados por género; así como de desarro-

llar proyectos de investigación para mejorar la gestión y pronóstico de la calidad del aire y diagnósticos de emisiones de diferentes actividades. Por esto, las becas que ofrecen los programas pueden ser de utilidad para llevar a cabo la Agenda de Investigación del Programa. Tal es el caso de un estudio de estimación de la exposición de partículas en la Ciudad de México para el cual Fulbright-García Robles otorgó una donación (O'Neill et al., 2002).

Instituto de Efectos de la Salud (HEI)

El HEI es una corporación sin fines de lucro creada en 1980 como una organización de investigación independiente para proporcionar conocimiento científico de alta calidad, imparcial y relevante sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud. En general, sus fondos provienen de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) y de la industria automotriz global, además de que existen organizaciones públicas y privadas que apoyan periódicamente proyectos o programas de investigación específicos. La organización ofrece financiamiento a investigaciones relacionadas con la calidad del aire y la salud, para lo cual desarrolla planes estratégicos que guían las solicitudes de aplicación durante los siguientes 5 años. Los investigadores con estudios avanzados afiliados a organizaciones de investigación pueden responder a estas solicitudes o bien participar en las solicitudes abiertas para proponer investigaciones innovadoras (Health Effects Institute, 2016).

El Plan Estratégico 2020-2025 considera como área prioritaria estudiar la relación de la acción para mejorar la calidad del aire y la salud, así como resolver algunas preguntas complejas de la combinación de los contaminantes atmosféricos (Health Effects Institute, 2020). La Agenda de Investigación del ProAire, considera el desarrollo de estudios relacionados. En años anteriores investigadores mexicanos ya han colaborado exitosamente con la HEI (Health Effects Institute, s. f.), por lo que se propone buscar este tipo de participación nuevamente.

Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA)

La JICA es un organismo ejecutor de la Cooperación Técnica del Gobierno de Japón, la cual contribuye al desarrollo socioeconómico de los países en desarrollo (Embajada del Japon en Mexico, s. f.). El apoyo que brinda a México tiene como objetivo desarrollar y fortalecer las capacidades institucionales del país, e incluye el envío de expertos para la cooperación técnica, aceptación de personal para ser capacitado y donación de equipos y materiales.

Un ejemplo de un proyecto apoyado por este organismo en materia de contaminación al aire ambiental es el "Fortalecimiento del programa de monitoreo atmosférico en los Estados Unidos Mexicanos" (JICA, s. f.). Además, el organismo cuenta con programas de cooperación para la realización de investigaciones conjuntas y ofrece subvenciones y préstamos concesionales a entidades gubernamentales y no gubernamentales para lograr las metas de desarrollo de países como México. Como resultado, la JICA es una potencial fuente de apoyo para realizar la Agenda de Investigación, así como acciones de monitoreo ambiental y capacitación de personal para el fortalecimiento de la implementación de las medidas.

10

Seguimiento, monitoreo y evaluación

El ProAire contempla una metodología de seguimiento y evaluación para realizar una valoración del programa con base en sus indicadores estratégicos.

10



Dentro de los programas de política pública y gestión ambiental, el correcto seguimiento y monitoreo funciona como un elemento clave para alcanzar el objetivo general del programa. El ProAire contempla una metodología de seguimiento y evaluación que reúne elementos metodológicos que permiten realizar una valoración crítica del desempeño del programa con base en sus indicadores estratégicos. Mediante evaluaciones periódicas, permite identificar las acciones o actividades con bajo desempeño y diseñar medidas correctivas para asegurar el cumplimiento del objetivo fundamental del programa: la protección de la salud de la población de la Zona Metropolitana del Valle de México. Por otro lado, la evaluación final permite evaluar la efectividad de la política pública implementada, identificando fortalezas y áreas de oportunidad, y sirve como piedra angular para el diseño de programas subsecuentes en materia de calidad del aire u otros programas de gestión ambiental en las zonas urbanas del país.

El diseño del seguimiento y reporte consecutivo del Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del

Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM) 2021-2030 contempla tres componentes innovadores: la mejora continua, la participación ciudadana y la digitalización del proceso. La mejora continua se logra a través del establecimiento de evaluaciones peródicas que permiten identificar áreas de oportunidad y aplicar medidas correctivas para lograr el objetivo general del programa. El componente de participación ciudadana se integra mediante un ejercicio constante de reporte de resultados y rendición de cuentas, el cual está apoyado en la Estrategia Integral de Comunicación descrita en el Capítulo 8. Esto permite promover la transparencia en la gestión del programa y fortalece el tejido social mediante el involucramiento directo de la ciudadanía en el monitoreo del ProAire. Por otro lado, se incluye el uso de tecnologías de la información de vanguardia en aras de promover la transición hacia la era de los gobiernos digitales.

El presente capítulo se compone de tres secciones. En la primera, se describen los fundamentos teóricos y las lecciones aprendidas de los programas pasados que sirven como base para el diseño del proceso. Posteriormente, la segunda sección describe la Estrategia de Seguimiento y Evaluación del ProAire ZMVM 2021-2030. La estrategia incluye un mapeo de los actores involucrados en el proceso, una designación de responsabilidades, un listado de las herramientas analíticas que apoyan las actividades a desarrollar, una descripción detallada de los pasos del proceso de seguimiento y evaluación, y los esfuerzos puntuales de digitalización. Finalmente, la tercera sección concluye con los retos y limitaciones identificados en el proceso de seguimiento y evaluación, y propone un mecanismo de cumplimiento que busca asegurar la participación interinstitucional de las entidades federativas del ProAire.

10.1 Principios de la Estrategia de Seguimiento y Evaluación

10.1.1 Metodología de Marco Lógico

La Metodología de Marco Lógico (MML) de la Comisión Económica de América Latina y el Caribe (CEPAL) es una herramienta utilizada para la conceptualización, diseño, ejecución y evaluación de programas de política pública. La MML es particularmente útil durante la fase de seguimiento y evaluación de un proyecto dado que reduce la diferencia entre la planificación y los resultados producidos a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Esta establece que se deben desarrollar actividades de seguimiento, monitoreo y evaluación de tal manera que se logre analizar las contribuciones de los distintos factores a lo largo del desarrollo del proyecto, de forma que se puedan mejorar las estrategias, programas y actividades (Ortegón, E., Pacheco, J. & Prieto, A., 2015).

La metodología establece que el seguimiento se lleva a cabo de manera paralela a la etapa de implementación de un proyecto. Se define como un procedimiento sistemático para comprobar la eficiencia y efectividad del proceso de ejecución de un proyecto para identificar los logros y debilidades, y recomendar medidas correctivas para optimizar los resultados deseados (Ortegón, E., Pacheco, J. & Prieto, A., 2015). El proceso de seguimiento contempla determinar el progreso en la implementación del proyecto, dar retroalimentación a los actores involucrados y recomendar acciones correctivas para aumentar la probabilidad de lograr el objetivo general.

Por otro lado, el componente de evaluación consiste en una valoración y reflexión sistemática sobre el diseño, ejecución, eficiencia, efectividad, resultados y procesos de un proyecto terminado o en ejecución. Para esto, existen dos tipos de evaluaciones: la formativa y la sumativa. La evaluación formativa busca establecer mecanismos que permitan el aprendizaje y realizar modificaciones durante la ejecución, estableciendo un proceso de mejoramiento continuo del proyecto. Por otro lado, la evaluación sumativa se realiza al final del proyecto para obtener conclusiones sobre su desempeño, guiar futuros esfuerzos y emitir juicios sobre aspectos críticos del proyecto en todas sus etapas.

10.1.2 Principios de la Estrategia de Seguimiento y Evaluación

En adición a los lineamientos generales de seguimiento y evaluación, la MML establece una serie de principios que deben contemplarse durante el diseño del proceso. La Estrategia de Seguimiento y Evaluación parte de los siguientes principios rectores que están integrados de manera transversal en los diferentes componentes de la estrategia.

1	**Sistemática:** La estrategia considera las distintas fases del ciclo de vida del ProAire. Se contemplan las acciones, metas e hitos establecidos durante la fase de diseño del programa y el proceso de ejecución de estas.
2	**Participativa:** Incluye un componente de participación pública para involucrar a la ciudadanía en el proceso a través de la rendición de cuentas. Este componente promueve acuerdos en la definición de los parámetros de resultados y desempeño, fomenta la corresponsabilidad y crea compromiso entre los actores involucrados.
3	**Centrada en el desempeño:** La estrategia se enfoca en examinar los resultados periódicos del programa y compararlo con las metas establecidas. Esta característica brinda la posibilidad de cambiar las actividades a ejecutar para aumentar la probabilidad de que cumpla el objetivo general del programa.
4	**Dirigida al aprendizaje:** Uno de los objetivos particulares del proceso es convertir la experiencia de la ejecución de las acciones en lecciones aprendidas para la mejora continua del ProAire.
5	**Guía para la toma de decisiones:** La estrategia se diseña para promover la toma de decisiones basadas en evidencia a través de los resultados periódicos de las distintas actividades del ProAire.

Asimismo, la estrategia se construye con base en experiencias previas y lecciones aprendidas de programas pasados. Se ha demostrado la necesidad de llevar un seguimiento periódico y sistematizado del programa. En ediciones pasadas, a pesar de realizar talleres para que los responsables de la ejecución de las acciones llevaran un orden y seguimiento sistemático de los resultados, esta acción no fue del todo exitosa. Aunado a esto, la ausencia de un proceso sistematizado de informes o bitácoras dificultó la detección del incumplimiento o lentitud de algunas medidas y la implementación de medidas correctivas en el ProAire 2002-2010 (UAM, 2010).

La falta de coordinación interinstitucional también se resalta como un área de oportunidad de programas pasados. Esta dio pie a diferencias en la aplicación del proceso de evaluación y se vio reflejado en el tipo, cantidad y calidad de información presentada por las entidades federativas y el gobierno federal del ProAire ZMVM 2002-2010 (UAM, 2010). Por ello, se requiere solventar los obstáculos de coordinación interinstitucional para gestionar de

manera adecuada el trabajo colaborativo de seguimiento y recopilación periódica de información.

Finalmente, los programas pasados no han establecido lineamientos de concordancia entre el tipo de información y documentación de las diferentes instancias gubernamentales. En las gestiones pasadas del ProAire no se han utilizado metodologías homogéneas para el seguimiento, no han existido similitudes en los pocos portales electrónicos usados y, en varios casos, se ha presentado una ausencia de información pública sobre la implementación de las acciones (UAM, 2010). El ProAire 2011-2020 destaca como el primer esfuerzo de comunicar información de interés del programa a través de un sitio web que incluyó el avance de acciones del programa y la reducción de emisiones correspondientes.

10.2 Estrategia de Seguimiento y Evaluación del ProAire

La Estrategia de Seguimiento y Evaluación del ProAire busca establecer metas, tiempos e indicadores que permitan dar un seguimiento sistemático a la ejecución de las medidas y los resultados que se producen. Este seguimiento permite detectar a tiempo las desviaciones de las actividades establecidas en las rutas críticas de cada medida para establecer acciones de corrección o aceleramiento durante la ejecución del programa.

Debido a que el ProAire contempla esfuerzos de tres entidades federativas y del gobierno federal, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) se convierten en las instituciones mejor posicionadas para coordinar el seguimiento y mejora continua del ProAire. Se sugiere que la CAMe pueda apoyar en la gestión de la recopilación constante de información y el involucramiento de los actores correspondientes en las actividades de seguimiento, mientras que la SEMARNAT estaría directamente involucrada en la evaluación del seguimiento de las acciones y la presentación pública de los resultados obtenidos a lo largo de la duración del programa.

Asimismo, para lograr una correcta implementación del ProAire y cumplir con las metas establecidas, la estrategia incluye hitos y periodos clave. De manera bienal se realizarán ejercicios de actualización y reporte de avance de resultados a los habitantes de la ZMVM. Finalmente, de forma bienal, se realizará una evaluación detallada para identificar retos e implementar acciones correctivas por parte de la SEMARNAT y las entidades involucradas.

A continuación, se presentan los actores, herramientas e instrumentos necesarios para el seguimiento y monitoreo del programa, así como los procesos sistemáticos a seguir para la recolección de información y la evaluación periódica de resultados.



Figura 10.1 Actores involucrados en la Estrategia de Seguimiento y Evaluación
Fuente: *Elaboración propia.*

10.2.1 Actores clave

El proceso de seguimiento y evaluación es un esfuerzo que involucra a diversos actores durante sus distintas fases. Los actores involucrados se pueden clasificar en 3 categorías: aquellos que ejecutan las actividades del programa, los responsables de monitorear su avance y aquellos que evalúan el desempeño. A pesar de que cada actor cuenta con funciones y responsabilidades delineadas, el proceso de seguimiento y evaluación es un esfuerzo interinstitucional que debe ejecutarse de manera coordinada para lograr los objetivos de la estrategia. A continuación, se describen las categorías, actores involucrados y responsabilidades dentro del proceso de seguimiento y evaluación del ProAire.

Ejecución del programa



Instituciones responsables: Las instituciones responsables son aquellas comprometidas a ejecutar las acciones del ProAire. Su responsabilidad principal es llevar el correcto registro de las actividades realizadas de cada acción para posteriormente reportar los avances de los indicadores. Las instituciones son fundamentales en el proceso de seguimiento y evaluación dado que proveen los insumos necesarios para actualizar los indicadores de las acciones del programa. El listado completo de las instituciones responsables de ejecutar las acciones del ProAire puede consultarse en las fichas de las acciones que forman parte del anexo 7 de este documento.



Actores terciarios: Los actores terciarios son aquellos entes que están involucrados de manera indirecta en la ejecución de las acciones. Estos pueden ser actores del sector privado (industrias, cámaras y asociaciones industriales), sociedad civil, organizaciones no gubernamentales, academia e institutos de investigación, entre otros. Al igual que las instituciones responsables de la ejecución de las acciones, estos actores proveen algunos insumos necesarios para actualizar los indicadores de las acciones durante el proceso de seguimiento y evaluación. El listado completo de los actores terciarios puede consultarse en las fichas de las acciones que forman parte del anexo 7 de este documento.

Seguimiento y monitoreo del programa



Equipos de monitoreo (entidades federativas): Con el objetivo de lograr una correcta gestión de la estrategia, la Ciudad de México, el Estado de México y el Estado de Hidalgo deberán contar con un equipo local dedicado a vigilar las acciones del ProAire correspondientes a su entidad. Cada equipo operará como parte de las respectivas dependencias ambientales: SEDEMA[1], SMAGEM[2] y SEMARNATH[3]. La función principal de estos actores será la recolección de los insumos necesarios para actualizar los indicadores del ProAire en los periodos de evaluación que se describen en la siguiente sección de la estrategia y ser el punto de referencia para las instituciones y actores ejecutores de las acciones.



Equipo de Seguimiento y Evaluación Federal (SEMARNAT): La SEMARNAT funge como el órgano rector y actor responsable del seguimiento y monitoreo a nivel federal. La SEMARNAT es responsable de vigilar la correcta implementación de las distintas acciones y aplicar medidas correctivas y los instrumentos legales necesarios para alcanzar los objetivos del ProAire. De manera particular, la CAMe podría fungir como el actor responsable de asegurar la coordinación interinstitucional entre las entidades federativas.

Con base en las lecciones aprendidas de las gestiones anteriores del ProAire, se designará un Equipo de Seguimiento y Evaluación Federal que estará dedicado a vigilar y gestionar el proceso de seguimiento, monitoreo y evaluación del ProAire. Este equipo estará compuesto por personal de las tres entidades federativas y por servidores públicos adscritos a la SEMARNAT y operará bajo una metodología de trabajo participativa, funcionando como el punto focal para todas las instituciones responsables en la ejecución de las acciones del ProAire.

Evaluación del programa



Comité Núcleo: El Comité Núcleo funge como el cuerpo asesor de las dependencias ambientales de la ZMVM en materia de calidad del aire. El Comité está integrado por autoridades del gobierno federal, estatal y municipal, así como representantes de la academia e instituciones de investigación, el sector privado y la sociedad civil. El Comité estará directamente involucrado en todas las actividades de evaluación del programa para vigilar el cumplimiento de las acciones y dar recomendaciones estratégicas.



Comité Científico Asesor de la CAMe: El Comité Científico Asesor está integrado por miembros de la comunidad académica, científica y tecnológica, y tiene como función la formulación de opiniones y propuestas respecto de las políticas, programas y acciones ambientales de la CAMe. El apoyo del Comité Científico Asesor permitirá evaluar críticamente el impacto de las acciones en la calidad del aire de la ZMVM a lo largo del programa, así como ajustar las acciones y supuestos con base en la investigación y el estado del arte más relevante.



Agencias externas: En búsqueda de promover la transparencia y la rendición de cuentas, se deberá involucrar a una agencia experta e independiente para la evaluación final del ProAire. Las responsabilidades y actividades a ejecutar por la agencia externa se describen en las siguientes secciones del capítulo.

1 Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
2 Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México.
3 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo.

10.2.2 Herramientas para el seguimiento y evaluación

Durante el proceso de seguimiento, es importante contar con herramientas de calidad que permitan la recolección y el procesamiento homogéneo de información. De esta manera, la Estrategia de Seguimiento y Evaluación se apoya en herramientas, instrumentos y recursos que deben ser utilizados por los actores involucrados para garantizar la correcta recolección y seguimiento de resultados. A continuación, se describe cada herramienta, su manera de aplicación durante el programa y los actores encargados de operarlas.

Fichas de seguimiento por acción

Las fichas de seguimiento por acción son una herramienta que contiene información detallada sobre cada acción a ejecutar durante el ProAire. Al inicio de la ejecución del ProAire, el Equipo de Seguimiento y Evaluación Federal debe proporcionar las fichas correspondientes a los equipos de monitoreo, instituciones y ejecutores. La siguiente tabla resume el contenido incluido en las fichas de seguimiento por acción para orientar su correcta implementación.

Tabla 10.1 Contenido de las fichas de seguimiento por acción

Sección de la ficha	Descripción
Descripción de la acción	Se incluye una breve descripción del objetivo de la acción, los contaminantes objetivo a reducir y los alcances dentro del sector donde se implementa.
Diagnóstico	Cada ficha contiene un diagnóstico que justifica la implementación de la acción. Esta justificación incluye un breve análisis cualitativo del contexto (social, ambiental y económico) y datos cuantitativos de las emisiones actuales de los contaminantes objetivo a reducir.
Actividades de la acción	Se incluye un listado de las actividades necesarias a realizar para cumplir con la ejecución de la acción. Cada actividad incluye un indicador, metas específicas por entidad y su costo asociado.
Responsables e involucrados	Se incluye un listado de los actores involucrados en la implementación de la acción. Los actores se clasifican con base en aquellos incluidos en la Estrategia de Seguimiento y Evaluación: entidades federativas, instituciones responsables y actores terciarios.
Marco normativo	Para cada acción se incluye una descripción de los instrumentos legales que sustentan la implementación de la acción a nivel federal, estatal y local. También se identifican las deficiencias en las reformas legislativas, regulatorias o normativas deberán ser subsanadas para la correcta aplicación del ProAire.
Factores económicos	Se incluye el costo total de implementación de la acción y un listado de fuentes de financiamiento potenciales para apoyar su ejecución.
Barreras de implementación	Con el objetivo de anticipar posibles retos durante la implementación, se identifican e incluyen las potenciales barreras de implementación de cada acción.
Beneficios ambientales esperados	Se describen los beneficios directos de la acción en términos de reducción de emisiones, el costo-efectividad de estas y se identifican los cobeneficios potenciales de la implementación de la acción.
Seguimiento y evaluación	Cada ficha contiene los indicadores de seguimiento por actividad, así como su método de cálculo, frecuencia de medición y el método oficial de verificación.
Cronograma de ejecución	Se incluye un cronograma de avance que indica los años de ejecución y cumplimiento de cada actividad con base en las metas planteadas.

Fuente: *Elaboración propia.*

Matriz de ingreso de resultados

La matriz de ingreso de resultados es una herramienta en forma de hoja de cálculo que reúne los avances de todos los indicadores de las acciones del ProAire. Esta herramienta es utilizada por el equipo de monitoreo (SEMARNAT, SMAGEM, SEMARNATH) de cada entidad federativa para reunir los avances de sus acciones correspondientes del ProAire. La matriz cuenta con el listado completo de acciones e indicadores bajo la responsabilidad de cada entidad, así como las metas establecidas. Las funciones analíticas de la herramienta permiten a las entidades monitorear el grado de avance de cada acción para identificar aquellas con alto y bajo desempeño a lo largo de la ejecución del programa.

Para alimentar la herramienta, el equipo de monitoreo de cada entidad debe reunir los resultados de las acciones directamente de las instituciones y actores responsables. Una vez obtenidos los insumos necesarios, estos se vacían en la matriz para obtener el grado de avance en las acciones.

Instrumento de Seguimiento y Mejora Continua (ISMC)

El Instrumento de Seguimiento y Mejora Continua (ISMC) es una herramienta analítica en forma de hoja de cálculo que reúne y aloja el avance completo de todas las acciones y medidas del ProAire. Esta herramienta es utilizada por el Equipo de Seguimiento Federal para reunir los avances de las entidades en la implementación de sus acciones correspondientes del ProAire. A diferencia de la matriz de ingreso de resultados, el instrumento cuenta con el listado completo de los indicadores de acciones y medidas del programa, así como las entidades e instituciones responsables de su ejecución.

Para alimentar el instrumento, el Equipo de Seguimiento y Evaluación Federal debe solicitar la matriz de ingreso de resultados de cada entidad para actualizar los indicadores. Dado que el instrumento reúne las acciones completas del ProAire, este será la herramienta central para el seguimiento, monitoreo y evaluación del programa.

Trámites y permisos ambientales

Los trámites, permisos y autorizaciones ambientales existentes son herramientas adicionales que contienen información útil para el seguimiento a los distintos indicadores del programa. Dado que los trámites incluyen datos técnicos, estos sirven como insumos potenciales para evaluar y reportar el cumplimiento de la normatividad. Entre los trámites y permisos de interés se encuentran la Cédulas de Operación Anual (COA), la Licencia Ambiental Única (LAU), la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) y el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC).

10.2.3 Proceso de seguimiento y mejora continua

El proceso de seguimiento y evaluación se basa en 4 pasos generales que deben ejecutarse a lo largo de la duración del ProAire: la recolección de información, el análisis de los datos, la evaluación de resultados y el reporte de estos. Cada uno de estos pasos cuenta con periodos definidos de ejecución por parte de los distintos actores clave. A continuación, se describen a detalle las actividades a realizar, la periodicidad de su ejecución y los actores involucrados en cada paso.

1. Generación de información

El primer paso en el seguimiento y evaluación del ProAire es la generación de información. En esta fase, las instituciones responsables y actores involucrados ejecutan las acciones para obtener resultados medibles que se convierten en los insumos cuantitativos o cualitativos para dar seguimiento al avance del programa.

Dado que la periodicidad de la ejecución de las acciones es variada, las instituciones responsables deben llevar un correcto registro de su implementación a través de bitácoras, reportes u otros recursos internos para posteriormente proporcionarlo como evidencia de la implementación de las actividades. Asimismo, los equipos de monitoreo de las entidades deberán funcionar como punto de referencia para aclarar dudas e inquietudes por parte de las instituciones responsables y actores ejecutores.

2. Registro y actualización de avances

El segundo paso consiste en el registro y actualización de avances. En esta etapa se reúnen bienalmente los insumos generados por las instituciones responsables con el objetivo de tener información actualizada del progreso de todas las acciones y medidas del ProAire.

El equipo del monitoreo de cada entidad (SEDEMA, SMAGEM y SEMARNATH) es responsable de recolectar la información de las instituciones ejecutoras a través de una logística de recolección definida a conveniencia de cada entidad para obtener los insumos en tiempo y forma, idealmente de manera semestral. Una vez recolectados los insumos, estos se vacían y procesan en la matriz de ingreso de resultados de cada entidad con el objetivo de actualizar y analizar el progreso general de las acciones y medidas bajo su responsabilidad. Durante este proceso, es importante resaltar que las instituciones responsables deben comunicar los factores, circunstancias o eventos atípicos que influyeron en el desempeño de ejecución de las acciones.

Posteriormente, los equipos de monitoreo de las entidades transfieren la información al Equipo de Seguimiento y Evaluación Federal. Es responsabilidad del Equipo de Seguimiento procesar los datos recibidos de las entidades e ingresarlos al Instrumento de Seguimiento y Mejora Continua (ISMC) para llevar un conteo corriente y actualizado de todos los indicadores del programa. Las funcionalidades analíticas del instrumento permitirán conocer el avance total del ProAire, el desempeño de cada entidad y el avance específico de cada acción, medida y actividad del programa.

3. Reporte de resultados

Una vez obtenido el avance de todas las medidas, acciones y actividades del ProAire, se comunicará el progreso y los esfuerzos realizados del programa a la ciudadanía. Esta estrategia se basa en la buena práctica de participación ciudadana y busca fortalecer la transparencia, rendición de cuentas y el involucramiento de la sociedad civil a lo largo de la implementación del ProAire.

Los equipos responsables de las tres entidades y el Gobierno Federal deberán generar, en conjunto, reportes bienales de resultados y avances del ProAire, integrando y conjuntando los resultados. Asimismo, esta actividad se apoya en la estrategia de comunicación del ProAire, enmarcada en el Capítulo 8, para una correcta difusión y un mejor involucramiento por parte de la sociedad civil. Dichos reportes deberán ser cargados a los sitios web de la CAMe y de las dependencias ambientales de las entidades para su futura consulta pública. Asimismo, se recomienda destinar una sección dentro del sitio web de las distintas dependencias para reflejar el grado de avance en las medidas y acciones establecidad en el ProAire a través de una tabla o gráfica sencilla y concisa.

En línea con la generación de contenido audiovisual de la estrategia de comunicación, se sugiere generar cápsulas informativas orientadas a comunicar los esfuerzos de los gobiernos locales y los beneficios de las acciones para la salud de la población de la ZMVM. Finalmente, las entidades deberán destinar un espacio dentro de sus respectivos Informes de Gobierno para comunicar los avances en las acciones correspondientes del ProAire.

4. Evaluación

Como paso final en el proceso de seguimiento del ProAire, se realizarán dos tipos de evaluaciones durante la ejecución del programa: las evaluaciones periódicas y la final.

Las evaluaciones periódicas se integran como el mecanismo para identificar áreas de oportunidad en la ejecución de las acciones del ProAire y para aplicar medidas correctivas. Esta evaluación sucederá al año cinco y se basará en la recomendación de la MML.

Las evaluaciones periódicas contemplan la participación del Comité Núcleo, el Comité Científico Asesor y el Equipo de Seguimiento y Evaluación Federal. El rol del Comité Núcleo debe estar centrado en opinar sobre el progreso general del ProAire y dar recomendaciones para lograr los objetivos generales del programa. Por otro lado, el Comité Científico Asesor deberá realizar una evaluación crítica del progreso general del programa, identificar áreas de oportunidad para el mejoramiento de los indicadores operativos y de impacto, analizar los fenómenos y eventos atípicos en la calidad del aire e informar acerca del estado del arte en la gestión y monitoreo de la calidad del aire. Es responsabilidad de las entidades federativas y el Equipo de Seguimiento Federal gestionar, en conjunto, la logística de las evaluaciones periódicas, reunir los insumos necesarios para la evaluación y generar reportes y registros documentales de las mismas. Posteriormente, al término del periodo de ejecución del ProAire, se debe realizar una evaluación final del programa. A diferencia de las evaluaciones periódicas, la evaluación final busca identificar el cumplimiento de los objetivos y metas establecidas en el ProAire, identificar factores de éxito y buenas prácticas, y generar lecciones aprendidas en búsqueda de mejorar el diseño del siguiente programa. Esta evaluación se basa en la recomendación de la MML de realizar una evaluación sumativa al finalizar el programa.

En búsqueda de promover la transparencia y lograr una evaluación objetiva y crítica, la evaluación final debe ser realizada por un ente especializado en el tema que sea externo a las dependencias públicas encargadas de su ejecución. El ente evaluador recibirá insumos por parte de cada entidad federativa, de la SEMARNAT, de la CAMe, del Comité Científico Asesor y del Comité Núcleo, para posteriormente presentar los resultados ante ellos y producir un reporte final. Es importante recalcar que esta actividad debe ejecutarse antes de comenzar el diseño del siguiente ProAire, de forma que se puedan tomar las lecciones aprendidas y los resultados obtenidos como base para el siguiente programa.

Es responsabilidad del Equipo de Seguimiento y Evaluación Federal entregar la documentación necesaria al ente evaluador y quedar disponible para consultas durante el proceso. El ente evaluador analizará la información y presentará los resultados ante el Comité Núcleo, el Comité Científico Asesor y los responsables de ejecución de cada

entidad. Durante la presentación final de resultados, se debe llevar un registro de la minuta de la reunión. Con base en la información discutida en la presentación de resultados, el ente evaluador producirá un reporte de evaluación final que debe cubrir los siguientes puntos:

- Evaluar el cumplimiento de los objetivos y metas establecidas en el ProAire.
- Evaluar la efectividad en la reducción de emisiones atmosféricas de las medidas y acciones implementadas en el marco del ProAire.
- Evaluar la contribución en el mejoramiento de la calidad del aire de la ZMVM por la implementación de las medidas del ProAire.
- Identificar y jerarquizar las medidas que deben ser consideradas por su contribución en la reducción de emisiones para el nuevo ProAire.
- Identificar las medidas que deben ser replanteadas en el nuevo ProAire para mejorar su beneficio ambiental e incluir los puntos a fortalecer en cada medida.
- Identificar las fortalezas y áreas de oportunidad del ProAire.

10.2.4 Metodología de evaluación periódica

El propósito de las evaluaciones periódicas del ProAire se basa en identificar áreas de oportunidad para la implementación de medidas correctivas para mejorar la probabilidad de alcanzar el objetivo general del programa. Los actores involucrados en la evaluación deberán realizar un análisis detallado de la evolución de los indicadores, supuestos y riesgos identificados durante la ejecución de las acciones. Para garantizar una evaluación crítica y homogénea a lo largo del programa, los actores se apegarán al siguiente proceso basado en la MML para las evaluaciones periódicas del ProAire (Ortegón, E., Pacheco, J. & Prieto, A., 2015):

1. **Analizar indicadores:** Se revisará el grado de avance de los indicadores individuales de cada actividad incluida en el ProAire con respecto a su avance programado. Los indicadores que estén por debajo del avance programado serán sometidos a un análisis más detallado para identificar los posibles factores que impidieron el incumplimiento de las metas trazadas.
2. **Monitorear supuestos:** Es importante verificar si los supuestos del programa han cambiado durante el periodo de ejecución. Para esto, se observará si las condiciones externas al programa han cambiado y si es necesario considerar nuevos supuestos para garantizar el éxito del ProAire.
3. **Identificar probabilidad de logro de las acciones:** Con base en la evaluación de avance de los indicadores y el análisis de supuestos, se deberá identificar la probabilidad de lograr las acciones del ProAire. Este ejercicio se apoyará en la escala cualitativa presentada en el MML a través de cuatro categorías cualitativas (muy probable, probable, dudoso e imposible).
4. **Identificar problemas y riesgos externos:** Con base en las actividades anteriores, se deberán identificar los problemas que han impacto la ejecución de las acciones. Esta actividad incluye el análisis de factores técnicos, sociales, operativos y presupuestales para identificar los obstáculos actuales y prevenir retos futuros. Además, se deberá revisar la prospectiva presupuestal para ajustar el plan de trabajo con base en las realidades presupuestales de las entidades ejecutoras.
5. **Implementar acciones correctivas:** Una vez concluidos los pasos de diagnóstico, se plantearán a los actores relevantes los cambios necesarios para alcanzar el objetivo del ProAire. Es importante mencionar que en ningún momento es posible modificar o alterar el objetivo general del ProAire.

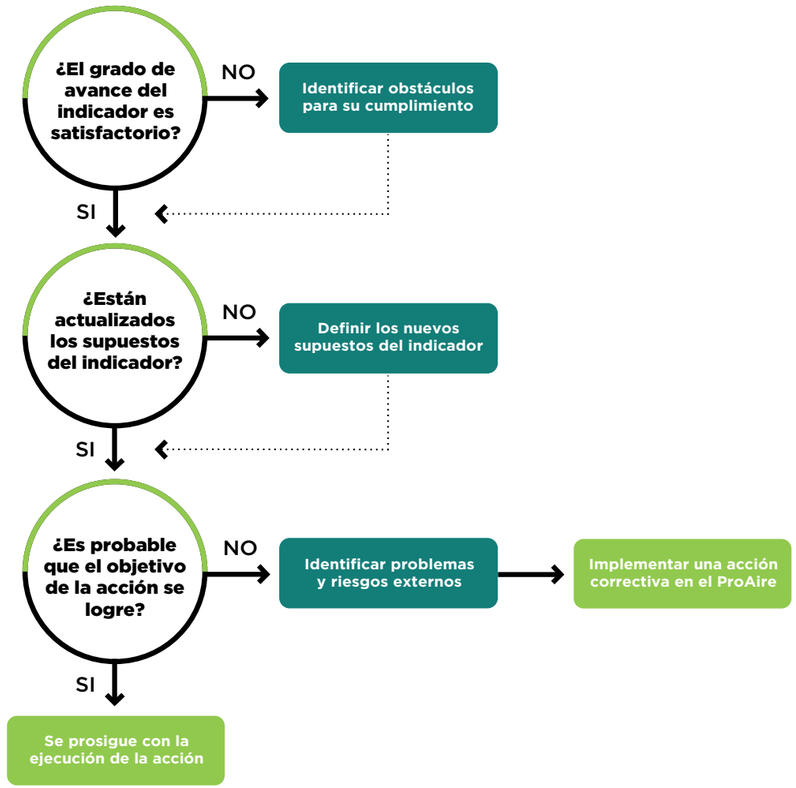


Figura 10.2 Diagrama de flujo de la metodología de evaluación periódica
Fuente: *Elaboración propia.*

10.2.5 Digitalización para el seguimiento y evaluación del ProAire

La administración pública y sus programas se ven beneficiados por la innovación tecnológica. Cada vez es mayor la necesidad de que los gobiernos participen en la transformación digital. Esto ha logrado que la transformación digital se incluya en las agendas públicas alrededor del mundo, traduciéndose en estrategias de digitalización de los gobiernos para aprovechar las innovaciones tecnológicas y moverse hacia una administración pública digital (EY, 2020).

Se ha demostrado que, en materia de administración pública, los gobiernos típicamente enfocan sus esfuerzos de digitalización en cuatro capacidades específicas: servicios, procesos, decisiones y datos (Cordyon, B, Ganesan, V. & Lundqvist, M., 2016). En relación con los servicios y procesos, los gobiernos están usando herramientas digitales para mejorar sus interacciones con los ciudadanos y el sector público y digitalizar primero los servicios de alto volumen al igual que aquellos que requieren muchos recursos humanos. En materia de decisiones, el sector público se beneficia del uso de análisis de datos dado que los sistemas obtienen datos de diferentes fuentes para analizar operaciones en tiempo real. Además, diversos gobiernos han demostrado que la transparencia de datos fortalece la confianza en el gobierno y la participación pública.

Los factores necesarios para acelerar la digitalización en la administración pública son cuatro: estrategia, gobernanza, liderazgo y tecnología (Cordyon, B, Ganesan, V. & Lundqvist, M., 2016). En este caso, las recomendaciones giran en torno a contar con una estrategia con metas claras para todos los esfuerzos de digitalización, promover la creación de un departamento específico encargado de ejecutar y vigilar las iniciativas de digitalización con responsabilidades definidas, crear las capacidades técnicas necesarias y contemplar que la digitalización no implica realizar cambios dramáticos en la estructura de tecnologías de las dependencias gubernamentales.

Actualmente existen esfuerzos paralelos de digitalización por parte de algunas entidades federativas del ProAire. Como parte del Plan de Gobierno de la Ciudad de México 2019-2024, se ha creado la Agencia Digital de Innovación Pública para conducir, diseñar y vigilar la implementación de políticas de gestión de datos, gobierno abierto, gobierno digital, gobernanza tecnológica y de gobernanza de la infraestructura tecnológica en la Ciudad de México. Asimismo, existe el Plan de Ciudadanía Digital que describe una ruta para la transformación digital y la innovación, cuyo objetivo general es fortalecer la relación entre los ciudadanos y el Gobierno de la Ciudad (ADIP, 2020).

Este fenómeno abre una oportunidad para transformar la gestión del ProAire, y particularmente el proceso de seguimiento y evaluación, hacia una gestión digital. A continuación, se presenta una lista de iniciativas contempladas como parte del primer esfuerzo de digitalización del ProAire.

1 **Digitalización de trámites gubernamentales:** Como base para todos los esfuerzos de transformación, se deberá comenzar con la digitalización de trámites gubernamentales. Actualmente los trámites de mayor relevancia para el ProAire son a base de papel impreso, dificultando la recolección, almacenamiento y el procesamiento de información específica contenida dentro de los distintos reportes.

2 **Establecer un sistema de seguimiento interinstitucional digital:** En búsqueda de migrar hacia una operación digital del ProAire, se deberá desarrollar un sistema de seguimiento interinstitucional digital. Entre las funciones principales de la plataforma deberá estar la visualización de las acciones del ProAire y el avance acumulado en indicadores de impacto, el filtrado de dependencias e instituciones responsables de la ejecución de las acciones y el filtrado de avance por año operativo. La creación de la plataforma buscará aprovechar y generar esfuerzos coordinados con otras iniciativas y sistemas existentes. Se sugiere vincular con otros sistemas como el Sistema de Administración Documental (SAD) de la Ciudad de México para aprovechar el reporte de resultados y gestión de documentos actual dentro de la SEDEMA. Asimismo, dado que varias medidas y acciones del ProAire ZMVM 2021 - 2030 son coincidentes con aquellas del Programa de Acción Climática de la Ciudad de México (PACCM) 2021-2030, existe un área de oportunidad para generar un esfuerzo coordinado de reporte de resultados de las dependencias para alimentar la plataforma, por lo que esta podrá ser desarrollada en coordinación con otras dependencias que participan en los esfuerzos de acción climática.

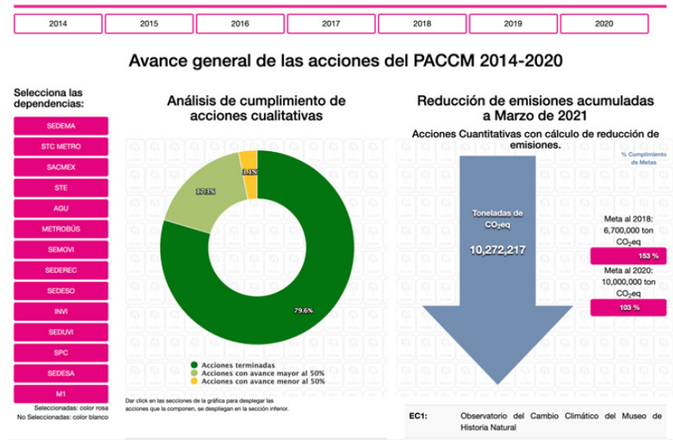


Figura 10.3 Sistema de seguimiento del Plan de Acción Climática 2014- 2020
Fuente: *189.240.89.10/PACCM/pub/*

3 **Desarrollar sistemas de reporte de desempeño ambiental:** Con la finalidad de recolectar datos a nivel local y federal en apoyo a las actividades de seguimiento y vigilancia, así como la agilización de permisos y autorizaciones, se debe contemplar la creación de un sistema de reporte de desempeño ambiental para dependencias federales y locales. Este sistema buscará reportar el cumplimiento de la normatividad a través de un repositorio de información en tiempo real de las mediciones realizadas por los sistemas de monitoreo continuo que se establecen en la normatividad existente. Por otro lado, funcionará como repositorio de información de las solicitudes de permisos y autorizaciones que se otorgan en materia ambiental (LAU-CDMX, COA, COI y formatos de permisos y autorizaciones).

4 **Generar sistemas de datos abiertos:** En búsqueda de fortalecer la gestión e institucionalización de datos, se pueden generar sistemas de datos abiertos para que las autoridades responsables tengan acceso a la diversa información relevante y necesaria para crear políticas públicas basadas en evidencia, así como para mantener informada a la población en general. Se puede realizar la vinculación con el cerebro operativo de datos o con las plataformas que desarrolle la Agencia Digital de Innovación Pública (ADIP).

10.3 Retos para el seguimiento y evaluación del ProAire

10.3.1 Limitaciones y retos para un efectivo seguimiento y monitoreo

A lo largo de la ejecución del ProAire existen limitaciones y obstáculos que podrían dificultar el correcto seguimiento y monitoreo del programa. Es importante tomar estos factores en consideración y diseñar medidas para mitigar las posibles implicaciones en el proceso de seguimiento. Los principales retos para el monitoreo y seguimiento del programa son la participación de los actores involucrados y la disponibilidad de información.

Institucionales

1 **Participación de los actores involucrados:** Para facilitar la colaboración de los actores involucrados, se les proporcionará información clara y detallada sobre las acciones y metas del programa, los recursos de apoyo disponibles y el proceso de recolección de datos. Con cada entidad federativa se deberán resaltar los beneficios económicos, ambientales y sociales obtenidos a partir del programa en curso. Asimismo, este reto se puede solucionar a través del mecanismo de cumplimiento descrito en la siguiente sección.

Operativos

2 **Correcto registro de resultados:** Existe un reto en el correcto registro de resultados por parte de las instituciones ejecutoras y actores terciarios involucrados. Al inicio del programa, el equipo de monitoreo de cada entidad deberá dar recomendaciones de buenas prácticas para el registro de resultados.

3 **Logística de recolección de información:** En búsqueda de facilitar la recolección de información por parte del equipo de monitoreo de las entidades, estos deberán definir fechas y canales para la colecta de los resultados. Todas las instituciones ejecutoras deberán estar informadas acerca de la logística de recolección de información.

4 **Recursos humanos limitados:** El seguimiento y evaluación del ProAire solo podrá ejecutarse si existen los equipos dedicados a su gestión y vigilancia a lo largo del programa. Las entidades federativas del ProAire, al igual que la CAMe y SEMARNAT, deberán revisar sus operaciones internas para asignar personal existente a los equipos de seguimiento.

10.3.2 Mecanismo de cumplimiento

La Ciudad de México, el Estado de México y el Estado de Hidalgo son responsables de asegurar la correcta ejecución del ProAire con la finalidad de proteger la salud de la población. Con base en las buenas prácticas internacionales, y en específico aquellas del *Clean Air Act* de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), se propone el establecimiento de un mecanismo de cumplimiento del ProAire que garantice la ejecución de las acciones del programa por parte de las entidades responsables.

Se sugiere que la SEMARNAT comience la ejecución del mecanismo de cumplimento después de la primera evaluación bienal del ProAire. Con base en el desempeño de cada entidad sobre el grado de implementación de las acciones del programa, la SEMARNAT comunicará de manera oficial el grado de involucramiento y el desempeño de la entidad en la ejecución del ProAire.

Durante el transcurso del programa, las entidades cuentan con la libertad de solicitar peticiones de reconsideración. Una petición de reconsideración es el proceso oficial para solicitar evaluar el avance en la implementación de las medidas en los años donde no exista una evaluación oficial del ProAire. Esta petición debe realizarse cuando la entidad busca actualizar su designación de entidad en incumplimiento a entidad en cumplimiento como resultado de una mejora sustancial en el avance de las metas. Esta petición puede realizarse solamente una vez al año por parte de las entidades.

Una vez solicitada la petición de reconsideración, se evaluará el cambio de designación de entidad en incumplimiento a entidad en cumplimiento con base en los siguientes lineamientos:

1 Determinar que la entidad tiene un avance igual o superior al 70% de las metas establecidas para el año de la petición de reconsideración.

2 Evaluar y comprobar la correcta implementación de las acciones actualizadas. Este proceso puede involucrar el contacto directo con las dependencias e instituciones ejecutoras de la entidad bajo reconsideración.

3 Durante una petición de reconsideración, no se moverá el estatus de la entidad en incumplimiento a una designación de entidad no clasificable.

Finalmente, si una entidad es designada como entidad en incumplimiento en dos periodos de evaluación consecutivos, la SEMARNAT intervendrá en la ejecución de las acciones y utilizará recursos del Fideicomiso 1490 (Fideicomiso para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis) para buscar que se instrumenten las acciones rezagadas.

11

Implementación

Para la exitosa ejecución del ProAire se requiere un esquema de implementación que permita identificar claramente los roles y responsabilidades de las instituciones participantes, las fechas clave y las posibles barreras de implementación.

11



Los programas de política pública que contemplan medidas de acción concretas requieren de un esquema de implementación robusto que asegure el cumplimiento de todos los compromisos adquiridos. Los programas que contemplan medidas y acciones relacionadas a calidad del aire requieren al menos cuatro características generales para tener una implementación exitosa. La primera es un programa definido con fechas de implementación claras, la segunda son roles y responsabilidades definidas, la tercera es un esquema de monitoreo y evaluación y la última es un esquema regulatorio que permita la correcta implementación de las políticas públicas (EPA, 2021).

El ProAire contempla 19 medidas compuestas de un total de 40 acciones que, a su vez, se conforman por 126 actividades que buscan mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Para que las acciones tengan resultados satisfactorios, se requiere un esquema de implementación que permita identificar clara-

mente los roles y responsabilidades de las instituciones participantes, y las fechas clave para la implementación de las acciones propuestas. Además, se requiere conocer las barreras a las que se puede enfrentar el ProAire para así poder superarlas y ejecutar las acciones de manera eficaz.

Al implementar el ProAire, se debe considerar un esquema de coordinación eficiente entre los gobiernos federal, estatales y municipales para lograr una correcta ejecución de las acciones definidas. Este esquema debe incluir comunicación constante, responsabilidades delimitadas, equipos de trabajo especializados e interacción con otros programas de calidad de aire existentes.

En capítulos anteriores, se han tratado dos de las características que permiten que un programa de calidad de aire sea exitoso. En el Capítulo 2 se describe el marco normativo del Programa y en el Capítulo 7 y los anexos se describe el sustento jurídico de cada una de las acciones a implementar. El Capítulo 10 incluye un esquema de seguimiento, monitoreo y evaluación que permitirá realizar una valoración crítica del desempeño del Programa con base en sus indicadores estratégicos.

El presente capítulo brinda un panorama general de los componentes considerados en el esquema de implementación del ProAire. La primera sección describe el cronograma de implementación de las medidas. La segunda sección se compone de un panorama general de los entes involucrados y sus roles y responsabilidades en la ejecución del Programa. La tercera sección incluye las barreras de implementación que podrían presentarse a lo largo de la ejecución del proyecto. Las tablas y descripciones desarrolladas en este capítulo funcionan como un agregado de todas las medidas; las características específicas de estas se pueden consultar en el Capítulo 7 y en las fichas descriptivas que se encuentran en el Anexo 7.

11.1 Cronograma general de implementación

Debido al contexto complejo y cambiante de los procesos de políticas públicas, las fechas y periodos de implementación suelen ser dinámicos; sin embargo, es importante tener una línea de acción clara que señale la distribución de actividades y sus tiempos específicos. Para el ProAire, las fechas de implementación se manejan con un porcentaje de cumplimiento anual, dependiendo de la acción a desarrollar. Esto permite cierta flexibilidad en el cumplimiento, pero al mismo tiempo delimita el tiempo en el que cada actividad tiene que llevarse a cabo.

La siguiente tabla (Tabla 11.1) muestra que el ProAire tiene un total de 40 acciones, las cuales tienen periodos de implementación durante los 10 años que considera el Programa. Si bien algunas de las medidas no presentan un porcentaje de avance en los primeros años, se buscará que la ejecución de todas las acciones inicie cuanto antes según se considere prioritario. Se puede observar que la mayoría de las acciones se encuentran proyectadas a finalizar en el año 2030, no obstante, existen acciones con fechas de término tan pronto como 2023.

Tabla 11.1 Cronograma general de implementación de las acciones del ProAire

Acción	Nombre	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1.1	Actualización de la normatividad aplicable a las unidades de carga		⟷	⟷	⟷	⟷					
1.2	Impulso a la renovación tecnológica y electromovilidad del transporte de carga	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
1.3	Limitaciones y vigilancia de la circulación de transporte de carga contaminante		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
2.1	Actualización de la normatividad de emisiones vehiculares y de eficiencia energética, aplicable a unidades ligeras		⟷	⟷	⟷	⟷					
2.2	Fomento de la renovación tecnológica del transporte particular y la electromovilidad		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
2.3	Administración de la demanda del transporte individual motorizado	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
2.4	Estructura urbana sustentable			⟷	⟷	⟷					
3.1	Renovación tecnológica y electromovilidad del transporte público masivo y de alta capacidad	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
3.2	Eficiencia energética y electromovilidad en el transporte público de baja y mediana capacidad		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
3.3	Mejoramiento y ampliación de la infraestructura ciclista	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
4.1	Creación del marco regulatorio para la reducción de COV en productos de uso doméstico	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
4.2	Disminución de las emisiones por el uso de gas L.P. en las viviendas		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
5.1	Disminución de las emisiones de COV durante el almacenamiento y distribución de gas L.P.	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷					
5.2	Reducción de emisiones por consumo de gas L.P. en los sectores industrial, comercial y de servicios		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
6.1	Limpieza de vialidades	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
7.1	Control de emisiones agrícolas	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
8.1	Marco regulatorio para la reducción de COV, partículas, tóxicos y gases de combustión	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷

⟷ Periodo de implementación de la acción

Tabla 11.1 Cronograma general de implementación de las acciones del ProAire *(continuación)*

Acción	Nombre	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
8.2	Reducción de la emisión de partículas en los sectores industriales de mayor contribución		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷			
9.1	Reducción de las emisiones de contaminantes asociadas a la generación de electricidad		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷				
10.1	Reducción de emisiones por quema a cielo abierto y residuos no gestionados	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
11.1	Tratamiento y aprovechamiento de residuos sólidos urbanos	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
12.1	Tratamiento y reúso de agua residual	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
13.1	Mejora de la capacidad de manejo del fuego	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
13.2	Control de partículas fugitivas	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
14.1	Reducción de las emisiones fugitivas de COV por la actividad de repintado automotriz			⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
14.2	Limitación del contenido de COV en productos de limpieza y recubrimientos de superficies industriales		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
14.3	Regulación de emisiones provenientes de la maquinaria fuera de ruta		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷				
14.4	Monitoreo en estaciones de servicio		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
15.1	Regulación de calidad del aire para protección a la salud		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷			
15.2	Actualización del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas		⟷	⟷							
15.3	Desarrollo e implementación de una Estrategia Integral de Comunicación de Calidad del Aire		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
15.4	Integración de un sistema de información en salud y calidad del aire de la ZMVM		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
16.1	Evaluación, seguimiento y difusión periódica de los resultados de implementación del ProAire ZMVM 2021-2030	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
16.2	Establecimiento de plataformas de seguimiento institucional para sectores altamente contaminantes		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷

⟷ Periodo de implementación de la acción

Tabla 11.1 Cronograma general de implementación de las acciones del ProAire *(continuación)*

Acción	Nombre	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
16.3	Estrategia Integral de Financiamiento		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
17.1	Operación de las redes de monitoreo ambiental	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
18.1	Control de contaminación en el corredor industrial de Tula-Vito-Apasco		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷
AI.1	Investigación en calidad del aire y química atmosférica	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷		
AI.2	Investigación para mejorar el inventario de emisiones		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷		
AI.3	Investigación en salud		⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷	⟷

⟷ Periodo de implementación de la acción

Fuente: *Elaboración propia.*

Es importante destacar que, aunque se establece como fecha de término del Programa el año 2030, se busca que las acciones cumplan diferentes hitos a lo largo de los años de implementación. Estos hitos están delimitados por las necesidades de cada actividad a desarrollar, los cuales se pueden consultar en las fichas descriptivas. A modo de ejemplo, la Tabla 11.2 muestra un esquema simplificado de los porcentajes de avance esperados para la Acción 14.4 (Monitoreo en estaciones de servicio). Los porcentajes por indicador son acumulativos y están establecidos con base en el nivel de esfuerzo requerido para completar la actividad que conforman. La ejecución total de la actividad corresponde al 100%, el cual se obtiene al sumar la aportación final de cada indicador.

Tabla 11.2 Ejemplo simplificado de las actividades a desarrollar para la Acción 14.4 (Monitoreo de estaciones de servicio)

Actividad	Indicador	Año									
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Actualizar la NOM-004-ASEA-2017	Elaborar el anteproyecto de norma		**20%**	**30%**							
	Elaborar el proyecto y publicar la norma			**10%**	**40%**	**70%**					
Instalar sistemas de monitoreo remoto	Integrar un sistema centralizado de detección					**25%**					
	Instalar sistemas de monitoreo remoto en cada estación de servicio						**15%**	**30%**	**45%**	**60%**	**75%**

Fuente: *Elaboración propia.*

A pesar de que cada acción cuenta con su cronograma para asegurar su completa ejecución para el año 2030; es deseable comenzar cuanto antes las acciones pertenecientes a la Agenda de Investigación (AI) y las que corresponden a la actualización de la normatividad. Por un lado, la AI permitirá fortalecer la implementación de las medidas y potenciar su impacto, al mejorar los procesos metodológicos y tecnológicos para el monitoreo de calidad de aire y al generar más conocimiento sobre los impactos en la salud asociados con la exposición a contaminantes atmosféricos. Por otro lado, las acciones normativas permitirán que las modificaciones entren en vigor en una etapa temprana y que, al mismo tiempo, los sectores regulados tengan tiempo suficiente para adecuarse a las nuevas regulaciones.

Además, desde los primeros años, se debe de priorizar la Acción 16.3 (Estrategia Integral de Financiamiento) con el fin de garantizar la disponibilidad de fondos estables y suficientes para lograr la correcta instrumentación de las medidas en los tiempos estipulados. Esta permitirá realizar una adecuada planeación y preparación para la solicitud de presupuestos y licitaciones.

11.2 Roles y responsabilidades

Independientemente de la naturaleza de los problemas de calidad de aire, es necesario establecer relaciones entre diferentes niveles de gobierno y entes públicos que permitan la implementación de las actividades propuestas. Para que estas relaciones trabajen efectivamente, se tienen que delimitar los roles y responsabilidades de cada uno de los entes involucrados. En el caso del ProAire de la ZMVM, es necesaria la participación de los tres niveles de gobierno, entes gubernamentales y privados que ayuden a implementar de manera exitosa las medidas propuestas.

Los organismos más relevantes para la implementación del ProAire son las secretarías de medio ambiente locales: la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM) y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo (SEMARNATH). Estas secretarías son las encargadas de coordinar los esfuerzos en cada uno de los estados involucrados; esto incluye la coordinación con organismos y entes estatales y municipales. De igual manera, la CAMe, con la ayuda de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales federal (SEMARNAT), es la encargada de coordinar con los entes involucrados a nivel federal como la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la Secretaría de Energía (SENER), la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA) y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), entre otros.

A pesar de que las entidades de gobierno tienen una mayor responsabilidad para la correcta aplicación del ProAire, también es necesaria la integración de entes privados que tengan injerencia en temas de calidad del aire en la ZMVM. De manera particular, se espera que las diferentes asociaciones y cámaras industriales existentes en México participen en la implementación de actividades del ProAire, con especial énfasis en las actividades relacionadas a la reducción de emisiones.

La siguiente figura (Figura 11.1) muestra un acercamiento simplificado a la interacción entre las diferentes instituciones involucradas en el ProAire y las responsabilidades de cada una de ellas. Es responsabilidad de todas las instituciones involucradas proponer mejoras, dar retroalimentación y estar informadas de las novedades de todas las medidas y acciones del ProAire.

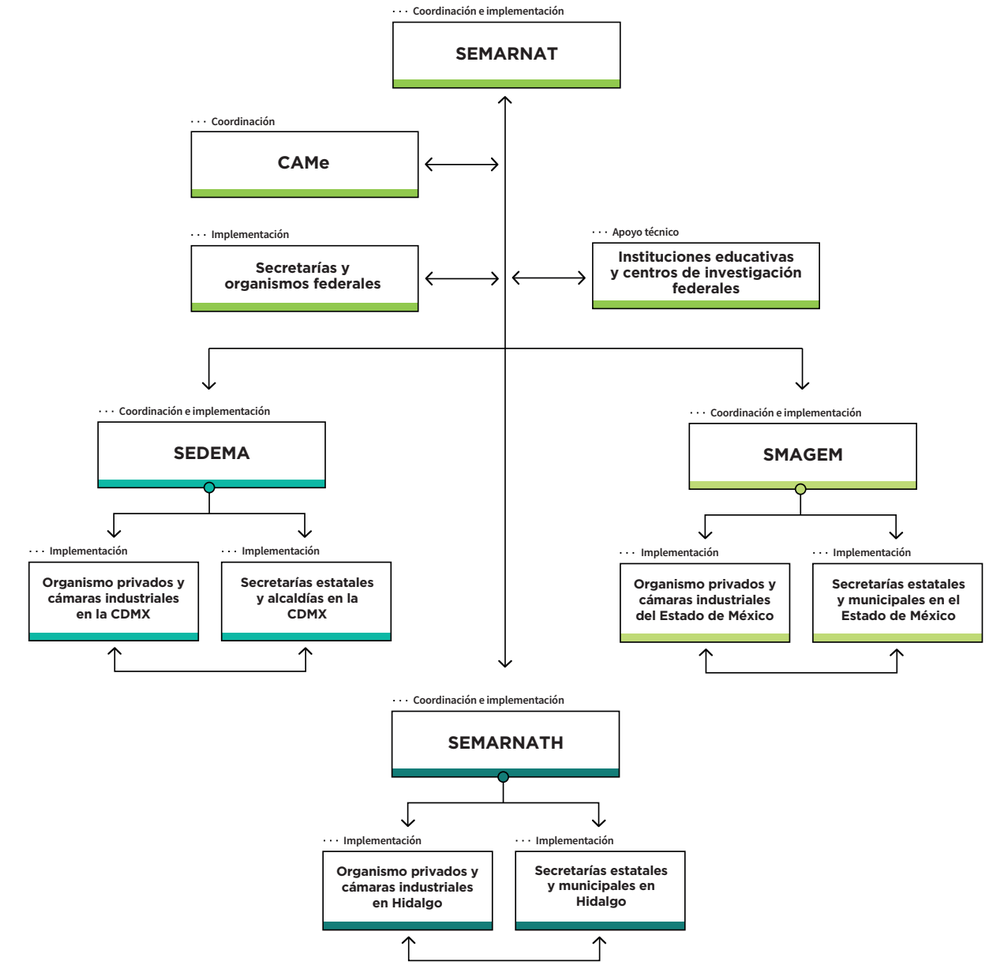


Figura 11.1 Estructura general de roles y responsabilidades del ProAire
Fuente: *Elaboración propia.*

En el caso de la Agenda de Investigación propuesta, la participación de instituciones educativas tanto públicas como privadas es esencial para el éxito de la Agenda. Para ello se considera que las instituciones públicas de educación superior, la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), en conjunto con la CAMe, apoyarán los esfuerzos para tener una investigación sólida basada en resultados técnicos que ayuden a la correcta implementación del ProAire.

11.3 Barreras de implementación

Como se describió en el capítulo anterior, de manera general, las políticas públicas integran el trabajo de diversos entes con formas de operar variadas, diferentes intereses, presupuestos e incluso capacidades técnicas y tecnológicas. Por ello es posible que el proceso de implementación se enfrente a diversas barreras que deberían de ser analizadas para encontrar soluciones que logren que las acciones se desarrollen eficientemente.

Para el ProAire se identificaron siete barreras que podrían retrasar u obstaculizar el desarrollo de las 40 acciones, las cuales abarcan temas económicos, políticos, sociales, tecnológicos y operativos. La Figura 11.2 resume la cantidad de acciones asociadas a las barreras identificadas, donde se observa que las de mayor frecuencia corresponden a las institucionales, mientras que las políticas son las de menor presencia. De manera general, estos retos podrían ser superados mediante esquemas de cooperación entre instituciones, el adecuado desarrollo de una estrategia de financiamiento para aumentar la eficiencia en la ejecución de los presupuestos, y la ejecución de acciones adicionales encaminadas a la correcta implementación de las actividades.

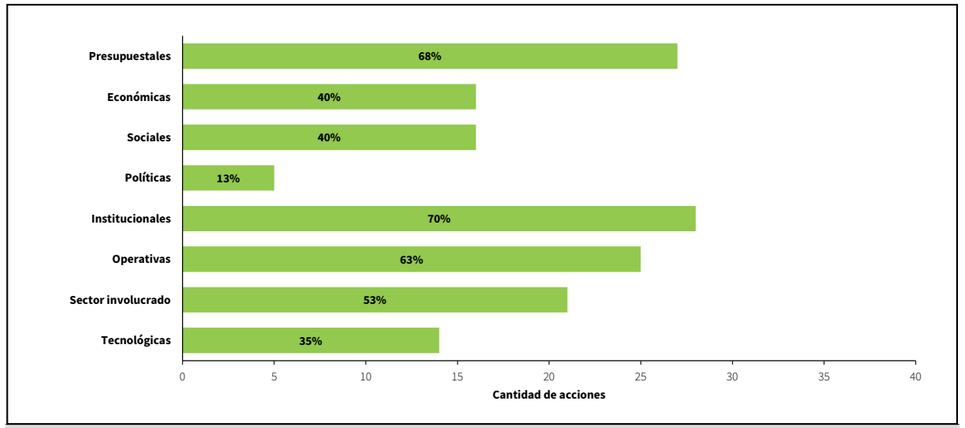


Figura 11.2 Cantidad de acciones asociadas por barrera identificada
Fuente: *Elaboración propia.*

11.3.1 Barreras presupuestales

En cualquier política pública, los presupuestos cumplen un rol importante ya que por medio de estos se obtienen los recursos necesarios para ejecutar las acciones. Por ello, la implementación exitosa de las medidas de calidad de aire propuestas depende en gran medida de los recursos asignados para poderlas llevar a cabo.

Por ejemplo, la Acción 13.1 (Mejora de la capacidad de manejo del fuego) tiene la particularidad de que todos los componentes necesarios para implementar esta acción existen, pues las instituciones responsables del combate a incendios han funcionado bien en la ZMVM y la participación social también se ha realizado históricamente entre comunidades y gobierno. Sin embargo, la limitante es presupuestal, ya que el sector carece de todos los insumos económicos necesarios para mejorar sus capacidades tecnológicas y de equipamiento. Al igual que esta acción, el 68% de las acciones del ProAire se enfrentan a barreras presupuestales que podrían impedir el correcto avance de las acciones propuestas.

Para superar los obstáculos presupuestales, será necesario elaborar y ejecutar la Estrategia Integral de Financiamiento (Acción 16.3). La acción contempla analizar fuentes de financiamiento municipal, estatal y federal; así como alternativas para dirigir recursos adicionales provenientes del sector privado, académico y social, y de la colaboración internacional. En la ejecución de las actividades que deriven de este análisis, las autoridades implementadoras deberán priorizar la colaboración y coordinación entre las entidades involucradas. Además, deberán tener una aproximación pragmática a la implementación de las acciones de acuerdo con la priorización definida; de forma que se privilegie el costo-efectividad basado en fundamentos técnicos relevantes que logren éxitos concisos.

En este ProAire se calculó el costo-efectividad[1] de cada acción al relacionar su costo total de implementación y las toneladas reducidas esperadas de un contaminante determinado; es decir, se estimó el costo de reducir una tonelada de un contaminante a través de una acción específica. Por consiguiente, dicho valor permite establecer una base para priorizar su implementación al conocer qué acciones requieren menos recursos para mitigar las emisiones deseadas. En este sentido, la tablas 11.3 y 11.4 muestran las cuatro acciones más costo-efectivas para controlar los niveles de los contaminantes prioritarios para el ProAire; estos son las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, y el ozono.

Tabla 11.3 Acciones con mayor costo-efectividad en términos de reducción de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$

Acción	
9.1	Reducción de las emisiones de contaminantes asociadas a la generación de electricidad
1.1	Actualización de la normatividad aplicable a las unidades de carga
8.2	Reducción de la emisión de partículas en los sectores industriales de mayor contribución
8.1	Marco regulatorio para la reducción de COV, partículas, tóxicos y gases de combustión

Fuente: *Elaboración propia con base en estimaciones de la SEDEMA (2021).*

Tabla 11.4 Acciones con mayor costo-efectividad en términos de reducción de los principales precursores del ozono (NOx y COV)

NO_x Acción		COV Acción	
9.1	Reducción de las emisiones de contaminantes asociadas a la generación de electricidad	**14.4**	Monitoreo en estaciones de servicio
1.1	Actualización de la normatividad aplicable a las unidades de carga	**4.1**	Creación del marco regulatorio para la reducción de COV en productos de uso doméstico
2.3	Administración de la demanda del transporte individual motorizado	**8.1**	Marco regulatorio para la reducción de COV, partículas, tóxicos y gases de combustión
2.1	Actualización de la normatividad de emisiones vehiculares y de eficiencia energética, aplicable a unidades ligeras	**14.2**	Limitación del contenido de COV en productos de limpieza y recubrimientos de superficies industriales

Fuente: *Elaboración propia con base en estimaciones de la SEDEMA (2021).*

1 Además del costo-efectividad, es deseable contemplar los beneficios en salud en función de la magnitud de las reducciones de emisiones atribuidas a cada acción mediante análisis de costo-beneficio. No obstante, la falta de información impidió realizar el análisis para esta etapa del ProAire.

Considerando lo anterior, se destaca que las acciones de mejora regulatoria en los sectores industriales y de transporte, así como la reducción de viajes, son las acciones de mayor costo-efectividad, por lo que se debe dar prioridad a su implementación.

11.3.2 Barreras económicas

La consideración del entorno económico es crucial para desarrollar cualquier acción relacionada a la política pública, ya que estas características son esenciales para evaluar si la política es susceptible de ser implementada. En el caso de las medidas del ProAire, se considera que el 40% de las actividades presentan barreras económicas para su ejecución. A pesar de que el entorno económico puede tener diversas características de relevancia dependiendo de la política a implementar, se identificaron tres características cruciales que podrían interferir en el desarrollo exitoso del Programa.

La primera característica está relacionada con los costos de diversos productos o servicios sobre los que el gobierno no tiene un control y están regidos por el mercado internacional. Por ejemplo, la Acción 4.1 (Creación del marco regulatorio para la reducción de COV en productos de uso doméstico) se puede ver impactada por la variación del costo de los productos con un bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles en el mercado derivada de la necesidad de cumplir con la nueva regulación. Considerando lo anterior, es fundamental la elaboración de los análisis de impactos regulatorios (AIR) en las normas que regulen la elaboración de productos, toda vez que debe demostrarse el beneficio ambiental y en salud que estos pueden generar.

La segunda característica es el costo de las tecnologías innovadoras que permitan la implementación de la acción buscada, ya que, en algunas de ellas, la adquisición de tecnología es clave. Un claro ejemplo es la Acción 3.1 (Renovación tecnológica y electromovilidad del transporte público masivo y de alta capacidad), la cual depende en gran medida de la adquisición de nuevas unidades de transporte, tanto para la renovación como en el aumento de la flota, y la adquisición de tecnologías con sistemas de control de emisiones; ambas con costos regidos internacionalmente.

La última característica son los costos variables para la implementación. Estos podrían ser una barrera si se encuentran omisiones en diversas actividades que deriven en una necesidad económica extraordinaria. Esto se puede solventar mediante la planeación precisa de las actividades a desarrollar y su ejecución de acuerdo con lo planeado.

11.3.3 Barreras sociales

La participación de la sociedad es esencial para que un programa de política pública se lleve a cabo exitosamente. Considerar las necesidades, conocimiento y la inclusión de la población podría ser el elemento clave para que la política se adopte y se aplique. En el caso del ProAire, alrededor del 40% de las acciones a implementar requieren la participación activa y constante de la sociedad para que se logren los objetivos esperados.

A pesar de que las acciones tienen beneficios para la sociedad en general, existen diversas barreras que impiden que sean adoptadas completamente, entre ellas se encuentran el desinterés en el tema, la desconfianza, la falta de conocimiento y la resistencia al cambio. La mayoría de las veces, la solución a estas barreras está relacionada con la comunicación efectiva de los beneficios de las acciones a implementar. Para ello, el ProAire requerirá una estrategia de comunicación que siga los lineamientos del “Capítulo 8 Comunicación y Participación Ciudadana” y con la Acción 15.3 (Desarrollo e implementación de una Estrategia Integral de Comunicación de Calidad del Aire).

Con estas herramientas, se espera subsanar las barreras sociales que impidan la adopción de diferentes acciones como la Acción 7.1 (Control de emisiones agrícolas), la cual tiene beneficios importantes para los agricultores como la mejora en las técnicas de labrado, la diversificación de ingresos y el fortalecimiento de la organización comunitaria.

11.3.4 Barreras políticas

La implementación del ProAire contempla la apertura y cooperación de los entes políticos involucrados en la coordinación de las acciones a desarrollar. Como se ha discutido anteriormente, el ProAire abarca el trabajo de secretarías de tres estados de la República, cada uno con intereses políticos distintos y que, a lo largo de diez años, pueden modificarse de acuerdo con la situación del país. Por ello, es importante que las actividades a desarrollar contemplen las políticas y objetivos actuales de los actores en el poder para que se asegure su continuidad a lo largo del tiempo, aunado al establecimiento de canales de seguimiento y una adecuada difusión de los beneficios del Programa.

Un ejemplo claro de una acción con barreras políticas es la Acción 18.1 (Control de contaminación en el corredor industrial de Tula-Vito-Apasco), la cual requiere consenso político para lograr los cambios necesarios a nivel federal y local. A pesar del reto que las barreras políticas representan, las acciones del ProAire están diseñadas para minimizar el riesgo ante asuntos políticos, por lo cual solo el 13% de las mismas presenta alguna barrera de este estilo.

11.3.5 Barreras institucionales

Como se discutió en la sección 11.2, el ProAire de la ZMVM requerirá la participación de múltiples instituciones públicas esparcidas en el ámbito federal, en tres entidades federativas y en 60 municipios y 16 alcaldías; además de la participación de la sociedad, de instituciones académicas y de entes privados. Esto representa un reto mayúsculo al tener que lograr la colaboración y coordinación del personal involucrado en las acciones a implementar. Esta barrera es una de las más recurrentes dentro del ProAire, ya que el 70% de las acciones tendrá que sortear estos retos para su correcta implementación.

La Acción 1.1 (Actualización de la normatividad aplicable a las unidades de carga) ejemplifica las barreras institucionales que podrían encontrarse al llevar a cabo diversas actividades. Esta acción requiere modificaciones a normas oficiales mexicanas que deben realizar la SEMARNAT y la CRE en conferencia con los sectores relevantes del sector público y entes privados directamente relacionados como las cámaras de transporte, centros de investigación, organismos de la sociedad civil e incluso organismos internacionales. En general, se considera que la publicación de normas presenta barreras institucionales, pues antes tienen que ser discutidas y acordadas por diversos actores.

Como se discutió anteriormente, el superar estas barreras requerirá una comunicación constante y una definición de roles y responsabilidades. Esta labor de coordinación será liderada por la CAMe, con el apoyo de las secretarías de medio ambiente estatales y la SEMARNAT. Esto ayudará a que la comunicación con otras instituciones públicas y privadas sea fluida y ayude a implementar las acciones requeridas en tiempo y forma.

11.3.6 Barreras operativas

Este tipo de barrera se relaciona con el contexto en el que se desarrolla la acción y los recursos disponibles para asegurar su correcta ejecución a largo plazo. Un ejemplo claro se visualiza en la Acción 10.1 (Reducción de emisiones por quema a cielo abierto y residuos no gestionados), la cual puede verse obstaculizada en caso de no contar con personal suficiente para cumplir con la vigilancia y recolección de los residuos sólidos urbanos, así como por el difícil acceso de los vehículos recolectores a algunas zonas de la metrópoli por sus condiciones geográficas.

El superar este tipo de barreras implica realizar una planeación adecuada considerando las limitantes existentes y asegurar una correcta capacitación y distribución de personal dedicado a las diferentes acciones. El contratar nuevo personal depende únicamente del presupuesto de cada instancia de gobierno, pero existen diversos esquemas de voluntariado que, en conjunto con instituciones educativas, permite disponer de estudiantes capacitados para llevar a cabo actividades especializadas. Además, existen esquemas de colaboración internacional para realizar capacitaciones en determinados temas, por ejemplo, la otorgada por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA); así como avances en las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) que pueden ser aprovechados para optimizar los procesos operativos. Esto es de importancia ya que alrededor del 63% de las acciones propuestas en el ProAire podrían enfrentar barreras operativas.

11.3.7 Barreras del sector involucrado

Anteriormente se ha mencionado que existen diversos actores públicos y privados que interactúan con cada una de las acciones a implementar. En este caso, los retos que se presentan tienen especial énfasis en las entidades privadas pertenecientes al sector relevante de cada acción. Estas entidades abarcan un amplio rango de sectores, desde transporte de carga, transporte de pasajeros, construcción, agrícola e incluso académico.

En la Acción 9.1 (Reducción de las emisiones de contaminantes asociadas a la generación de electricidad) es clara la necesidad de tener en cuenta el punto de vista del sector energético para lograr una implementación exitosa, ya que en este caso se requiere la instalación de sistemas de monitoreo continuo y equipos de control de emisiones, lo cual podría considerar intrusivo y provocar rechazo por parte del sector. Al igual que esta acción, el 53% de las descritas en el ProAire presentan algún reto relacionado al sector al que impactan.

Por ello, es relevante que desde la planeación de las acciones se incluya la opinión de los diversos sectores para evitar que existan controversias cuando las actividades se encuentren en periodos de implementación. Para ello es importante considerar la información contenida en el “Capítulo 8 Comunicación y Participación Ciudadana” y la Acción 15.3 (Desarrollo e implementación de una Estrategia Integral de Comunicación de Calidad del Aire).

11.3.8 Barreras tecnológicas

Una consecuencia muy recurrente al proponer políticas públicas innovadoras es la necesidad de contar con tecnología disponible a un precio accesible que satisfaga las necesidades de dichas políticas. Los temas de calidad del aire no son la excepción, ya que se requiere tecnología de vanguardia para poder hacer mediciones precisas y buscar soluciones satisfactorias.

En el caso del ProAire se han identificado áreas de oportunidad relacionadas a estos desafíos de innovación. Por ejemplo, la Acción 2.3 (Administración de la demanda del transporte individual motorizado) presenta retos en el fortalecimiento de los sistemas informáticos para aumentar la cantidad de trámites digitales asegurando altos estándares de seguridad y privacidad, y la Acción 3.2 (Eficiencia energética y electromovilidad en el transporte público de baja y mediana capacidad) se enfrenta a que la disponibilidad de unidades de transporte público con tecnología alternativa es limitada, de forma que en el corto plazo existirán retos para abastecer la demanda planteada y poder dar el mantenimiento requerido por estas unidades. También, la Acción 14.4 (Monitoreo en estaciones de servicio) tiene un fuerte componente tecnológico ya que es necesario contar con sensores que sean capaces de medir y transmitir adecuadamente los datos de concentración de contaminantes detectados en las estaciones de servicio en las condiciones de la ZMVM. Al igual que estas acciones, el 35% de las acciones contenidas en el ProAire presentan retos tecnológicos que requieren de creatividad para resolverlos.

En este contexto, para la correcta implementación del Programa será necesario la realización de esfuerzos conjuntos con terceros y con expertos en diferentes disciplinas. En reconocimiento a dicha condición, para buscar una solución a los retos tecnológicos relacionados con el monitoreo de la calidad del aire, el ProAire incluye la medida AI, con la cual se define una agenda de investigación que busca generar conocimiento que permita mejorar la gestión de calidad del aire. Específicamente, para mejorar la confiabilidad de los datos, entre sus actividades considera el desarrollo de proyectos para incrementar la precisión y reducir la incertidumbre de la medición y estimación de la contaminación atmosférica.

12

Conclusiones

El ProAire es un instrumento de gestión pública que surge del compromiso de los gobiernos involucrados en mejorar la calidad del aire de la ZMVM.

12



La gestión de la calidad del aire en el Valle de México – una tarea compleja

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), integrada por las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo, tiene un papel muy importante como centro económico, financiero, político y cultural del país. El crecimiento demográfico, la estructura urbana dispersa, distante y desconectada, y los patrones no sostenibles de producción, consumo y movilidad de su población, que suma poco más de 21.8 millones de personas y aporta casi un cuarto del producto interno bruto (PIB) nacional, son los agentes de presión más importantes sobre la calidad del aire local.

La quema de combustibles fósiles en viviendas, comercios, servicios, establecimientos industriales y vehículos motorizados es la principal fuente de óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, partículas suspendidas y gases de efecto invernadero. De acuerdo con la matriz

energética del Inventario de Emisiones 2018, tan solo en ese año, se consumieron 880 petajoules en toda la ZMVM, siendo el transporte de personas y bienes el sector de mayor demanda (49.8%), seguido por el sector industrial (31.2%), las viviendas (11.9%) y los comercios y servicios (6.9%).

En la región circulan seis millones de vehículos particulares, públicos y de carga. La generación de contaminantes atmosféricos por estos vehículos se ve fuertemente influenciada por la estructura urbana de la ZMVM. Debido a que los principales atractores de viajes (empleo, centros educativos y de salud) se encuentran en la Ciudad de México, se generan grandes flujos de viajes desde las periferias hacia el centro, causando externalidades negativas en la calidad del aire. A esto se añade la desarticulación y fragmentación del servicio de transporte público entre la Ciudad de México y su zona conurbada, que empuja a la población a adquirir un automóvil particular o utilizar sistemas de baja a mediana capacidad con tecnologías ineficientes para el control de la contaminación. Esta situación, además de incrementar la congestión vehicular y los tiempos de traslado, aumenta el consumo de energéticos y por ende la emisión de contaminantes atmosféricos.

Las actividades productivas y domésticas también tienen un impacto sobre la calidad del aire. Algunos de los giros que más contribuyen a la contaminación por partículas son las industrias metálicas básicas (alumineras y siderúrgicas), la generación de energía eléctrica y la fabricación de cemento, concreto y vidrio. Por otro lado, en las viviendas, la quema de gas L.P. para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua es el principal factor para la emisión de contaminantes en este sector. Por último, otras fuentes de contaminación incluyen la agricultura, el tránsito sobre vialidades y la erosión del suelo, que también contribuyen al deterioro de la calidad del aire por la emisión y re-suspensión de partículas.

Asimismo, se registran otras actividades que liberan contaminantes al aire ambiente, como la gestión de residuos sólidos urbanos y aguas residuales, fugas de gas L.P. y el uso de productos como solventes, pinturas y agentes limpiadores. Este tipo de fuentes liberan compuestos orgánicos volátiles (COV) que reaccionan en la atmósfera para formar contaminantes secundarios como el ozono.

A estos procesos se suma el impacto negativo que tienen algunas fuentes de emisión externas sobre los niveles de contaminación locales. En específico, se destaca la actividad de la refinería Miguel Hidalgo y la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, ubicadas en la región de Tula, Hidalgo, que generan dióxido de azufre, el cual puede ser transportado hacia la ZMVM. Otras fuentes externas de contaminación importantes son los incendios forestales en estados aledaños.

Estas problemáticas se ven agravadas por las condiciones físicas de la ZMVM, que de forma natural favorecen la acumulación de los contaminantes en el aire. La región se ubica a una altitud promedio de más de dos mil metros sobre el nivel del mar, y su relieve se caracteriza por varios sistemas montañosos que rodean a un valle central. Si bien los accidentes geográficos son menos pronunciados al norte de la cuenca, los vientos predominantes soplan desde el noreste, por lo que arrastran la contaminación hacia el sur e impiden su dispersión.

El clima de la ZMVM también tiene un papel importante en los procesos de dispersión, formación y comportamiento de la contaminación. De forma general, existen sistemas de alta presión que generan condiciones de estabilidad atmosférica e inhiben la circulación de los vientos y la formación de nubes. Durante la temporada seca-fría (noviembre a febrero), estas condiciones de estabilidad, aunadas a las bajas temperaturas, agudizan fenómenos como las inversiones térmicas, las cuales impiden el movimiento y la dispersión de contaminantes. En la temporada seca-caliente (marzo a mayo), la falta de nubosidad, la intensa radiación solar y las altas temperaturas hacen que la atmósfera de la ZMVM sea altamente foto-reactiva y favorecen la formación de contaminantes secundarios. En cambio, de junio a octubre, los sistemas de baja presión, vientos más fuertes y la temporada de lluvias tienen un efecto depurador en la atmósfera.

Por último, cuando se presentan condiciones meteorológicas adversas y emisiones inusuales, se pueden presentar eventos extraordinarios y transitorios con concentraciones elevadas de contaminación, comúnmente denominadas contingencias ambientales atmosféricas. Por ejemplo, en mayo de 2019, se registró un episodio importante de mala calidad del aire en la ZMVM, que resultó del impacto de los incendios en varios estados de la República. Las condiciones meteorológicas favorecieron el transporte de partículas hacia la ZMVM y condiciones de estabilidad atmosférica retuvieron la contaminación. Además, una elevada y constante radiación solar durante el día, consecuencia de la poca nubosidad, condujo a la mayor formación de ozono y partículas secundarias.

Desaceleración de las tendencias de mejora en la calidad del aire

A inicios de los noventa, la Ciudad de México y su zona conurbada fueron clasificadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como la ciudad con la peor calidad del aire a nivel mundial[1]. Desde entonces, las autoridades locales y federales implementaron exitosamente distintas estrategias para limitar las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire, a través de los denominados Programas para mejorar la calidad del aire o ProAire.

En el pasado, los esfuerzos se centraron en limitar las emisiones de fuentes móviles e industriales a través de cambios tecnológicos. Algunas de las políticas más efectivas fueron la reformulación de combustibles, la adopción de convertidores catalíticos, el Programa de Verificación Vehicular Obligatorio, el Programa Hoy No Circula, la expansión de sistemas de transporte público masivos y de alta capacidad, la clausura o reubicación de fuentes industriales y el establecimiento de normas ambientales.

Estas políticas e inversiones impulsaron una mejora continua en la calidad del aire desde la segunda mitad de la década de los noventa. Las concentraciones atmosféricas de plomo, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno mostraron reducciones significativas y actualmente no se superan los límites permisibles normados. De manera similar, para ozono y partículas suspendidas se registró una mejoría sustancial, aunque estos contaminantes siguen superando constantemente los límites permisibles establecidos en las normas de salud ambiental. Además, existe una desaceleración notoria en la mejora de la calidad del aire, sin tendencias a la baja perceptibles en las concentraciones de ozono y partículas suspendidas en la última década. No obstante, los resultados de la gestión de la calidad de aire en los últimos años son meritorios, puesto que se ha limitado la contaminación a pesar del crecimiento poblacional y la expansión del área urbana.

Las concentraciones de partículas superan frecuentemente los límites permisibles, especialmente durante la temporada seca-fría. El Inventario de Emisiones 2018 estimó una generación de más de 34 mil y 16 mil toneladas anuales de partículas menores a 10 y 2.5 micras (PM_{10} y $PM_{2.5}$), respectivamente. Las primeras provienen principalmente del tránsito sobre vialidades, la agricultura y la quema a cielo abierto de residuos, que en conjunto aportan el 37.5%, valor de magnitud similar a la contribución del sector transporte (39.6%). En cambio, las $PM_{2.5}$ provienen en su mayoría del transporte (43.0%), donde los vehículos pesados tienen la mayor contribución. Las fuentes de área (35.8%) tienen una fuerte incidencia en el nivel de partículas $PM_{2.5}$ emitidas, particularmente por la quema a cielo abierto de residuos, el tránsito sobre vialidades y la labranza y la cosecha. Es importante destacar que estas estimaciones corresponden a emisiones primarias, y que en la atmósfera se pueden formar partículas secundarias por la reacción entre otros contaminantes.

1 Organización Mundial de la Salud. (1992). Urban air pollution in megacities of the world. Oxford: Blackwell Reference. Disponible en https://apps.who.int/iris/handle/10665/39902

En cuanto al ozono, su concentración supera los límites permisibles durante todo el año, pero de forma más frecuente y severa durante la temporada seca-caliente, cuando la intensa radiación solar y las temperaturas más cálidas catalizan reacciones entre los COV y los óxidos de nitrógeno. En este sentido, en la ZMVM se liberaron más de 413 mil toneladas de COV y 144 mil toneladas de óxidos de nitrógeno en 2018. Los óxidos de nitrógeno provienen en su mayoría del transporte (85.8%), mientras que los COV son emitidos por diversas actividades como las fugas en instalaciones de gas L.P. (20.0%), el uso comercial y doméstico de solventes (31.6%) y el sector transporte (22.2%).

La formación de ozono a partir de sus dos precursores es compleja y depende de su cantidad y relación de concentraciones en el aire ambiente. Investigaciones recientes muestran que, en el área urbana de la ZMVM, la producción de ozono actualmente es limitada por COV. Por ello, las políticas de control de contaminantes locales deben enfocarse en las fuentes que generan este tipo de contaminantes, ya que solo reducir los óxidos de nitrógeno podría no causar cambios significativos o incluso detonar aumentos en la concentración de ozono. Ejemplo de esto es lo observado durante la emergencia sanitaria por COVID-19, cuando las restricciones a la movilidad provocaron una disminución de más del 60% en el tránsito vehicular. En abril y mayo de 2020 se observaron reducciones en las concentraciones promedio de todos los contaminantes criterio, excepto el ozono, cuyos niveles, de acuerdo con las mediciones del SIMAT, aumentaron en 11%.

A esta complejidad se suma el posible impacto del cambio climático en la calidad del aire. En la ZMVM, el incremento de la temperatura media ha sido consistente con los niveles observados a escala global. En tan solo 17 años, la temperatura media anual ha aumentado en aproximadamente 1°C. Diferentes estudios muestran como un cambio de esta magnitud puede derivar en mayores niveles de concentración de ozono y partículas $PM_{2.5}$. A este impacto se le conoce como penalización climática, y distintos estudios cuantifican su posible valor. Por ejemplo, para el ozono se tiene que, a 2050, el cambio climático podría provocar un aumento de entre 2 y 12 ppb de ozono en comparación con el año 2000, dependiendo de diversos factores y trayectorias de emisión de gases de efecto invernadero.

La salud pública y la promoción de la salud como prioridad de la gestión de la calidad del aire

La mala calidad del aire es reconocida como una amenaza global a la salud pública. Además de que afecta la salud de millones de habitantes, es causa de muertes prematuras, genera pérdidas económicas asociadas a gastos en los sistemas de salud y reduce la productividad de las personas.

Los contaminantes del aire tienen distinto potencial para generar daños en la salud humana en función de sus propiedades químicas y físicas, la concentración en la cual se manifiesten, y la intensidad y frecuencia de la exposición. Se ha demostrado la relación entre la exposición a óxidos de nitrógeno y ozono con la morbilidad y mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como la afectación que tiene la exposición al dióxido de azufre en el sistema respiratorio y el monóxido de carbono en el corazón y el cerebro. También, algunos de los COV se clasifican como compuestos altamente tóxicos y/o carcinogénicos, y pueden afectar a otros sistemas como el endocrino, el reproductor o el nervioso.

Son de especial preocupación los efectos que tienen las partículas suspendidas por su capacidad de penetración en las vías respiratorias. Además de causar afectaciones en el sistema respiratorio y cardiovascular, la exposición a partículas puede provocar o exacerbar enfermedades metabólicas y tener impactos neurológicos, entre otros efectos. Por ejemplo, la dimensión de las partículas ultrafinas (diámetro aerodinámico menor a 0.1 micras) permite que estas lleguen al torrente sanguíneo y que se puedan translocar a otros sistemas y órganos como el corazón o el cerebro. Además, la composición de las partículas provoca que algunas de ellas sean carcinogénicas, siendo las partículas finas ($PM_{2.5}$) provenientes de la quema de diésel las más dañinas.

Alcanzar los límites permisibles establecidos en las normas oficiales mexicanas (NOM) de salud ambiental se traduciría en beneficios en salud y económicos para la población. La mala calidad del aire incrementa la tasa de incidencia y la mortalidad asociada a condiciones de salud cardiovasculares como la enfermedad isquémica del corazón, accidentes cerebrovasculares, enfermedades respiratorias agudas y crónicas, diabetes, y cáncer de pulmón, entre otras. Distintos estudios estiman que, en la ZMVM, se podrían evitar más de 6 mil 500 muertes anuales en caso de cumplir con los límites normados para partículas $PM_{2.5}$ y ozono, lo cual equivale a 5.6% de la mortalidad natural en la zona de estudio en 2018; la mayoría de estos beneficios (alrededor del 90%) se asocian a la contaminación por $PM_{2.5}$. Los beneficios económicos por evitar estas defunciones oscilan entre 25 y 130 mil millones de pesos (precios de 2018), en función del valor de una vida estadística empleado para la monetización de la mortalidad evitable; se resalta que la cifra superior equivale a 2.55% del PIB de la ZMVM en 2018. Asimismo, estas estimaciones incrementan a 8 mil muertes prematuras evitables en caso de cumplir con las Guías de Calidad del Aire (GCA) de la OMS, con beneficios económicos en el orden 30 a 160 mil millones de pesos.

Los impactos a la salud por la contaminación atmosférica se presentan de forma diferenciada de acuerdo con la vulnerabilidad de cada persona. La OMS especifica grupos de población vulnerable en función de factores intrínsecos, factores adquiridos como resultado de condiciones ambientales, sociales o de conducta, o simplemente por exposiciones inusualmente elevadas. Estos grupos incluyen a niñas y niños, personas adultas mayores, embarazadas y población con condiciones médicas preexistentes o prevalencia de enfermedades crónicas. También se consideran como factores que inciden en la vulnerabilidad el estatus socioeconómico, el nivel de actividad física en exteriores, el modo predominante de transporte utilizado, el lugar de residencia, la profesión ejercida y los roles de género, variables que determinan el grado de exposición a los contaminantes. Cuando distintas variables se combinan, los efectos en cuanto a la vulnerabilidad de la persona pueden ser aditivos o multiplicativos.

Si bien es de suma importancia reducir las emisiones contaminantes en beneficio de la salud de la población, es igualmente relevante garantizar una adecuada comunicación de los riesgos asociados a la mala calidad del aire. Esto permite informar a la población sobre el estado general de la calidad del aire y los posibles riesgos asociados a los niveles de contaminación, para que las personas implementen acciones que reduzcan su exposición en función de sus condiciones de vulnerabilidad. Además, los esfuerzos de comunicación de riesgos se deben intensificar durante episodios de contaminación severa. Para coadyuvar a reducir estos eventos extraordinarios, desde 1990, las autoridades locales y federales han implementado programas de contingencias ambientales atmosféricas, dirigidos a los propietarios de industrias, comercios y servicios y a la ciudadanía en general, con el fin de controlar y reducir las emisiones contaminantes del aire, reducir la exposición de la población y con esto disminuir los efectos adversos a la salud pública.

Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2021-2030 (ProAire ZMVM 2021-2030)

El ProAire ZMVM 2021-2030 es un instrumento que establece metas, medidas y acciones con el propósito de reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera, mejorar la calidad del aire que respiran los habitantes de la región y proteger su salud. Este corresponde a la actualización del ProAire ZMVM 2011-2020, y ahora incluye al municipio de Tizayuca, Hidalgo, como parte del área de estudio.

Con el fin de garantizar la congruencia con otros instrumentos de gestión de la calidad del aire, este Programa rescata algunas de las medidas ya planteadas en otros ProAire vigentes que cubren parcialmente el territorio de la ZMVM: el Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017-2030, el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México 2018-2030 y el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo 2016-2024. Adicionalmente, se alinea con los objetivos de los Planes de Desarrollo de los tres estados que comprende, e incorpora insumos de otros esfuerzos, como las 14 medidas necesarias para mejorar la calidad del aire en la ZMVM, y la Estrategia Local de Acción Climática (ELAC) 2021-2050 y el Programa de Acción Climática de la Ciudad de México (PACCM) 2021-2030.

En línea con el Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México a 2040, el Programa tiene como objetivo general que la ZMVM disfrute de una buena calidad del aire durante al menos dos terceras partes del año, bajo los estándares de la OMS. En específico, este ProAire considera como contaminantes prioritarios al ozono y a las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, por ser aquellos que exceden los límites permisibles establecidos en las NOM de salud ambiental. En este sentido, se estima que para alcanzar la Guía de Calidad del Aire (GCA) de la OMS para el promedio de 24 horas de $PM_{2.5}$ (25 $\mu g/m^3$), se requiere una reducción del 31% en las emisiones totales. Además, para alcanzar la GCA de la OMS para el promedio móvil de 8 horas de ozono (51 ppb) se requiere una reducción aproximada del 71% en todas las fuentes que emiten precursores de este contaminante, esto es óxidos de nitrógeno y, especialmente, COV. En cuanto a las concentraciones horarias máximas de ozono, se requiere una reducción aproximada del 50% de todas las fuentes de precursores para alcanzar el valor guía de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), igual a 90 ppb. Lo anterior denota el gran esfuerzo que se requiere para mejorar la calidad del aire.

El desarrollo del diagnóstico de la situación actual, sumado a procesos participativos con las partes interesadas, resultó en la definición de las 19 medidas, 40 acciones y 126 actividades que conforman el Programa. Con la aportación de agencias gubernamentales federales, estatales y municipales, la academia, organizaciones civiles y no gubernamentales, se definió un listado preliminar de propuestas, las cuales se priorizaron a juicio de las partes expertas y en atención a los resultados del Inventario de Emisiones de la ZMVM 2018. El ejercicio culminó en la definición de medidas enfocadas en la reducción de emisiones en fuentes prioritarias dentro de la ZMVM y una medida que atiende el impacto de la contaminación del corredor industrial Tula-Vito-Apasco como fuente externa. Para recuperar y acelerar la inercia en la mejora de la calidad del aire, y con base en el diagnóstico y el análisis de las lecciones aprendidas del ProAire anterior, las medidas y acciones del ProAire ZMVM 2021-2030 se enfocan en:

- Reducir las emisiones en el sector transporte, a través de tecnologías más limpias y eficientes, y mediante ajustes normativos.
- Disminuir las emisiones totales del sector transporte mediante acciones que reduzcan la necesidad de viajes, disminuyan los tiempos de traslado y prioricen el uso de modos de transporte masivos y de bajas emisiones.
- Mitigar las emisiones de COV asociadas al consumo de gas L.P. y de productos con alto contenido de COV en viviendas, comercios, servicios e industrias.
- Atender la emisión de partículas fugitivas por el tránsito en vialidades, actividades de labranza y cosecha.
- Modificar la normatividad para reducir las emisiones industriales, así como aplicar esquemas de auditoría y vigilancia para controlar las emisiones en industrias prioritarias (siderúrgica, del aluminio, del vidrio y la generación electricidad).
- Mejorar la gestión de residuos sólidos urbanos y las aguas residuales, a través de acciones que permitan prevenir su generación y fomentar esquemas de tratamiento y disposición más sustentables, toda vez que estos sectores son fuentes importantes de metano y COV.
- Reforestar áreas verdes silvestres y urbanas para aminorar la erosión eólica del suelo, y fortalecer el combate a incendios forestales.
- Modificar los patrones de producción y movilidad en la ZMVM, para favorecer esquemas con menor impacto ambiental.

Además, se incluyen medidas para mejorar la gestión de calidad del aire a través de procesos de comunicación de riesgos y protección a la salud, el fortalecimiento institucional, el monitoreo ambiental y la investigación, en línea con las siguientes prioridades:

1. Procurar la promoción de la salud y la reducción de la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos, a través de acciones regulatorias y normativas, la comunicación de riesgos, la participación ciudadana, y la generación de información que relacione la calidad del aire y la salud.
2. Garantizar una correcta implementación del ProAire y el cumplimiento de sus objetivos, a través de lineamientos para la evaluación y difusión de resultados, mecanismos de seguimiento institucional y sistemas de reporte, y el financiamiento de las medidas propuestas.

3 Mejorar el monitoreo de calidad del aire en la ZMVM, en relación con las concentraciones de contaminantes normados, así como COV prioritarios[2] por sus impactos a la salud.

4 Generar conocimiento científico para mejorar la gestión de la calidad del aire. Es prioritario investigar los procesos que controlan la formación de ozono y partículas secundarias, así como mejorar la caracterización de las emisiones a través de los inventarios de emisiones y cuantificar los impactos a la salud asociados a la calidad del aire.

Se estima que el ProAire ZMVM 2021-2030 ayude a reducir, en promedio, entre 20% y 25% de la contaminación atmosférica en 2030. En cuanto a los contaminantes prioritarios, las estimaciones indican que la implementación del Programa podría significar una reducción de emisiones de más del 20% de PM_{10}, 35% de $PM_{2.5}$, 35% de óxidos de nitrógeno y 20% de COV respecto al escenario tendencial. Es importante destacar que las medidas han sido conceptualizadas como esfuerzos a corto, mediano y largo plazo, de forma que no todas tendrán impactos en la calidad del aire de forma inmediata. Además, el escenario de reducción de emisiones está condicionado al cumplimiento de las medidas en tiempo y forma. En este sentido, se subraya la necesidad de contar con la colaboración del Gobierno Federal y otros actores para realizar las medidas correspondientes.

En cuanto a los beneficios en la calidad del aire por la aplicaión del ProAire ZMVM 2021-2030, se estimó que los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ serían ~22% (~4 µg/m^3) menores en el promedio anual de 24 horas en toda la ZMVM. Así mismo, se reducirían los niveles de concentración promedio diaria de O_3 en ~2% (~3 ppb) y, si se considera el valor máximo horario de ozono, se presentaría una reducción de hasta el ~7% (~13 ppb).

En cuanto a los beneficios en salud debido la menor exposición que tendría la población a la contaminación atmosférica de implementarse el ProAire, especialmente por la mejora en los niveles de NO_2 y $PM_{2.5}$, se calcula se podrían evitar al menos seis mil muertes en el año 2030, con un ahorro económico estimado de 119 mil 256 millones de pesos.

Reconociendo la importancia de la comunicación y difusión de información referente a la calidad del aire, el Programa propone desarrollar una Estrategia Integral de Comunicación, bajo los ejes de protección de la salud pública y participación ciudadana para disminuir emisiones contaminantes. Para lograr la comunicación efectiva, esta Estrategia se dirigirá a cuatro audiencias diferenciadas: el público en general, la población más vulnerable, actores participantes en la implementación del ProAire, y especialistas en la materia.

Para alcanzar los objetivos propuestos, se debe asegurar la implementación y mejora continua del Programa. Por ello, se definieron las bases para el desarrollo de estrategias de financiamiento, seguimiento y evaluación, e implementación para guiar su ejecución. Para cubrir el costo aproximado de la implementación, estimado en $280.71 mil millones de pesos mexicanos[3] a precios de 2021, se plantea desarrollar una Estrategia Integral de Financiamiento basada en la sostenibilidad financiera y practicidad económica, que fomente la corresponsabilidad e involucramiento del sector privado, académico y social, así como la colaboración internacional. El diseño del seguimiento y reporte del ProAire contempla evaluaciones periódicas que permitan la mejora continua del Programa, el uso de plataformas digitales y el reporte constante de resultados y rendición de cuentas. Finalmente, la planeación de la implementación involucró la definición de fechas de ejecución, la definición de roles y responsabilidades y la identificación de posibles barreras.

Asimismo, sobresale que las medidas de mayor costo-efectividad se relacionan con las acciones de mejora regulatoria en el transporte, industria, comercios y servicios, que en su mayoría deben ser atendidas por el Gobierno Federal, por lo que resulta fundamental su participación y apoyo para el cumplimiento de las metas del ProAire ZMVM 2021-2030.

Del mismo modo, se considera fundamental incorporar el principio de igualdad sustantiva y lograr la transversalidad de la perspectiva de género en la gestión de calidad del aire. Durante la implementación del Programa, se deben estimar los impactos diferenciados de la contaminación atmosférica tanto en territorios, como entre mujeres y hombres, y proveer herramientas a grupos de población específicos para proteger su salud. También es importante documentar cómo factores ligados al género se relacionan con los procesos antropogénicos que originan la contaminación atmosférica.

Como última observación, el ProAire ZMVM 2021-2030 es un instrumento de gestión pública que surge del compromiso de los gobiernos involucrados en mejorar la calidad del aire de la ZMVM.

Se reconoce que la gestión de la calidad del aire requiere de acciones encaminadas a reducir las emisiones de las principales fuentes generadoras de contaminantes, de forma que se proteja la salud de la población.

Por su cobertura geográfica y complejidad administrativa, la gestión de calidad del aire no se limita a las autoridades ambientales. La formulación e implementación de políticas públicas requieren de la colaboración entre el Gobierno Federal, los Gobiernos Estatales de la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo, y 76 Gobiernos Locales, dado que todos tienen atribuciones distintas y jurisdicción sobre fuentes específicas de contaminación. Esto no solo implica la colaboración entre autoridades ambientales; en el sector público se requiere la colaboración con diversos sectores como el transporte y movilidad, el desarrollo urbano, energía y agua, el sector salud y educativo, entre muchos otros. Asimismo, la ejecución de acciones concretas para mitigar emisiones también requiere la participación del sector privado, la academia, las organizaciones no gubernamentales y la sociedad en general.

En consecuencia, las medidas y acciones que comprenden este Programa requieren de un trabajo colaborativo entre los diferentes niveles de gobierno y partes interesadas, para lograr los objetivos de mejoramiento de la calidad del aire y de protección a la salud pública.

2 Se propone ampliar las normas oficiales mexicanas de salud ambiental que definen límites permisibles de contaminantes en el aire ambiente, para incluir a COV prioritarios como el benceno, el tolueno y los xilenos (BTX).

3 Incluye los costos de 18 de las 19 medidas del ProAire. Se excluye el costo de la medida 18, que atiende las emisiones de SO_2 provenientes del corredor Tula-Vito-Apasco; las acciones de dicha medida atienden dos fuentes fijas de jurisdicción exclusivamente federal, la refinería Miguel Hidalgo y la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos, de competencia estrictamente federal y ubicadas fuera de los límites geográficos de la ZMVM. Considerando la medida 18, el costo total de implementación asciende a $280.71 mil millones de pesos mexicanos a precios de 2021.

Fuentes de información

Capítulo 1. Fuentes de información

Almanza, V. H., Molina, L. T., & Sosa, G. (2012). Soot and SO_2 contribution to the supersites in the MILAGRO campaign from elevated flares in the Tula Refinery. *Atmos. Chem. Phys.*, *12*(21), 10583–10599. https://doi.org/10.5194/acp-12-10583-2012

Almejo, R., & Téllez, Y. (2016). Cambio demográfico en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2000-2010. En *La Situación Demográfica de México 2015*. Recuperado de http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Resource/2709/1/images/10_cambio_demografico.pdf

Álvarez De la Torre, G. B., & Ayala Macías, E. G. (2018). Evolución, similitudes y diferencias en la estructura urbana entre ciudades fronterizas y coloniales mexicanas. *Investigaciones Geográficas; Núm. 97DO - 10.14350/rig.59682* . Recuperado de http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59682/53268

Aranda Sánchez, M. (2004). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Dirección General de Recursos Naturales y Desarrollo Rural. SEDEMA.

Arriaga Cabrera, L., Aguilar, V., & Espinoza, J. M. (2009). Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. En *Capital natural de México. Estado de conservación y tendencias de cambio* (Vol. II, pp. 433–457). México: CONABIO.

BID. (2018). Políticas de tarificación por congestión: Efectos potenciales y consideraciones para su implementación en Bogotá, Ciudad de México y Santiago. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Políticas-de-tarificación-por-congestión-Efectos-potenciales-y-consideraciones-para-su-implementación-en-Bogotá-Ciudad-de-México-y-Santiago.pdf

Bravo, A. H., Sosa, E. R., Sánchez, A. P., Jaimes, P. M., & Saavedra, R. M. I. (2002). Impact of wildfires on the air quality of Mexico City, 1992–1999. *Environmental Pollution*, *117*(2), 243–253. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00277-9

Calfapietra, C., Wiberley, A., Falbel, T., Linskey, A., Mugnozza, G., Karnosky, D., … Sharkey, T. (2007). Isoprene synthase expression and protein levels are reduced under elevated O_3 but not under elevated CO_2 (FACE) in field-grown aspen trees. *Plant, Cell & Environment*, *30*(5), 654–661. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01646.x

CAMe. (2018a). Cuencas atmosféricas que integran la Megalópolis. Recuperado el 9 de junio de 2020, de https://www.gob.mx/comisionambiental/es/articulos/cuencas-atmosfericas-que-integran-la-megalopolis?idiom=es

CAMe. (2018b, mayo 3). Comunicado de prensa Núm. 007/2018, p. 2018. Recuperado de https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/comunicado-de-prensa-3-05-08?idiom=es

CAMe. (2019). Comunicado Núm. 027/2018. Se activa contingencia ambiental atmosférica extraordinaria por partículas ($PM_{2.5}$) y ozono en la ZMVM. Recuperado de http://189.240.89.22/boletines-contingencia/14-05-2019/comunicado2.pdf

CAPSUS S.C. (2018a). *Herramienta de Generación de Escenarios para Evaluar las Emisiones de Compuestos y Gases de Efecto Invernadero en Relación con la Modificación de Áreas Urbanas de la CDMX*. Ciudad de México: CAPSUS Capital Sustentable. Recuperado de https://www.urbanperformance.in/cdmx/UP/CM

CAPSUS S.C. (2018b). *Perfil Metropolitano versión 2.0*. Ciudad de México: CAPSUS Capital Sustentable. Recuperado de https://www.urbanperformance.in/mexico/UP/MX

CENAPRED. (s/f). Incendios Forestales. Boletín Informativo. Recuperado el 16 de abril de 2020, de http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/115.pdf

CENAPRED. (2014). *Historia de la Actividad del Volcán Popocatépetl. 17 años de erupciones*. (R. Espinasa Pereña, Ed.) (1a edición). Recuperado de http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/225-HISTORIADELAACTIVIDADDELVOLCNPOPOCATPETL-17AOSDEERUPCIONES.PDF

Centro Mario Molina. (2012). Actualización al diagnóstico de la Megalópolis del centro de México. Proyecto CONACYT 08/2012. En *Propuestas estratégicas para el desarrollo sustentable de la Megalópolis del centro de México*.

CEPANAF. (2020). Visor Geográfico de la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF). Recuperado el 14 de abril de 2020, de http://acvisor.edomex.gob.mx/CEPANAF/portal/visorCEPANAF.do

Cobos, E. P. (2016). Zona Metropolitana del Valle de México: neoliberalismo y contradicciones urbanas. *Sociologias*, *18*, 54–89.

Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal. (2008). *Informe especial sobre el derecho humano a un medio ambiente sano y la calidad del aire en la ciudad de México*. México. Recuperado de https://cdhcm.org.mx/wp-content/uploads/2014/06/informe-calidad-del-aire.pdf

Comisión para la Cooperación Ambiental. (1997). *Regiones Ecológicas de América del Norte: hacia una perspectiva común*. Québec.

Comisión para la Cooperación Ambiental. (2011). Terrestrial Ecoregions: Level III. Recuperado el 13 de abril de 2020, de http://www.cec.org/tools-and-resources/map-files/terrestrial-ecoregions-level-iii

CONABIO. (2017). Regionalización. Datos abiertos de. Recuperado el 15 de abril de 2020, de https://datos.gob.mx/busca/dataset/regionalizacion

CONABIO, & SEDEMA. (2016). La Biodiversidad en la Ciudad de México. En *La Biodiversidad en la Ciudad de México Volumen I* (Vol. 1, pp. 285–302). Ciudad de México: CONABIO/SEDEMA.

CONAFOR. (2014). *Incendios Forestales, Serie Fascículos*. (V. Ramos Radilla, Ed.) (3a edición). México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

CONAFOR. (2019). *Reporte de Resultados de Incendios Forestales 2018*. Recuperado de https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Incendios/Informes anuales/2018-CIERRE.pdf

CONAGUA. (2010). División hidrológico-administrativa. Recuperado el 8 de abril de 2020, de http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=divisionHidrologicaAdministrativa

CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México, edición 2018*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

CONAGUA. (2020). Sistema Nacional de Información del Agua. Recuperado el 8 de abril de 2020, de http://sina.conagua.gob.mx/sina/

CONANP. (2019). Información espacial de las Áreas Naturales Protegidas. Recuperado el 14 de abril de 2020, de http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm

CONAPO. (2013a). Indicadores demográficos de México de 1970 a 2050. Recuperado de http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa_Ind_Dem18/index.html#

CONAPO. (2013b). Proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015-2030. Recuperado el 17 de abril de 2020, de https://www.gob.mx/conapo/documentos/proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-2015-2030

CONAPO. (2017). *La situación demográfica en México 2017*. (M. Márquez Villeda, M. Muñoz del Valle, & E. Landón Zepeda, Eds.). México: Consejo Nacional de Población. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/344406/SDM-2017_completo_web2.pdf

CONAPO. (2018). Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050. Datos abiertos. Recuperado el 17 de abril de 2020, de https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050

CONAPO, SEDATU, & INEGI. (2018). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. (M. Márquez Villeda, Ed.). México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/344506/1_Preliminares_hasta_V_correcciones_11_de_julio.pdf

Coordinación Nacional de Protección Civil. (2017). Riesgos Volcánicos en el Popocatépetl. Recuperado el 12 de abril de 2020, de http://www.cenapred.gob.mx/es/documentosWeb/Tertulias/Presentacion_Dr._Ramon_Espinasa.pdf

de Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., … Molina, M. J. (2005). Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, *5*(8), 2267–2288. https://doi.org/10.5194/acp-5-2267-2005

de Foy, B., Fast, J. D., Paech, S. J., Phillips, D., Walters, J. T., Coulter, R. L., … Molina, L. T. (2008). Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, *8*(5), 1209–1224. https://doi.org/10.5194/acp-8-1209-2008

Díaz-Nigenda, E., Tatarko, J., Jazcilevich, A. D., García, A. R., Caetano, E., & Ruíz-Suárez, L. G. (2010). A modeling study of Aeolian erosion enhanced by surface wind confluences over Mexico City. *Aeolian Research*, *2*(2), 143–157. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2010.04.004

DOF. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. (2018). Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018

Drake, B. G., González-Meler, M. A., & Long, S. P. (1997). MORE EFFICIENT PLANTS: A Consequence of Rising Atmospheric CO_2? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, *48*(1), 609–639. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.609

FICEDA. (s/f). Central de Abasto de la Ciudad de México. Recuperado el 28 de abril de 2020, de https://ficeda.com.mx/index.php?id=central

Garcia-Yee, J., Torres-JArdon, R., Barrera, H., Castro, T., Peralta, O., Espinosa, M., … Ruiz Suárez, L. G. (2017). Characterization of NOx-Ox relationships during daytime interchange of air masses over a mountain pass in the Mexico City megalopolis. *Atmospheric Environment*, *177*. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.017

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. (R. T. Trujillo, Ed.) (5a edición). Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM.

García Ortega, M. G., & Martner Peyrelongue, C. (2018). Análisis geográfico de los flujos de carga ferroviaria en México, con datos de 2016. Instituto Mexicano del Transporte; SCT. Recuperado de https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt521.pdf

H. Ayuntamiento de Tizayuca. (2018). Programa Operativo Anual 2018. Dirección de Ecología y Medio Ambiente. Recuperado de http://tizayuca.gob.mx/Transparencia/Fracciones/contraloria/programasoperativos/2018/POA_ECOLOGIA_2018.pdf

Heald, C. L., & Spracklen, D. V. (2015). Land Use Change Impacts on Air Quality and Climate. *Chemical Reviews*, *115*(10), 4476–4496. https://doi.org/10.1021/cr500446g

IGECEM. (2019). Producto Interno Bruto Nacional y Estatal 2019. Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. Recuperado de https://igecem.edomex.gob.mx/indole_economica

INE-SEMARNAT. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM 2.5*. (G. Mejía Velázquez & V. H. Páramos Figueroa, Eds.). Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf

INECC-PNUD, & Hernández Grajales, R. V. (2017). *Generación de un conjunto de procedimientos e instrumentos para la creación de un sistema de alerta temprana en el Marco del Cambio Climático y desde una perspectiva de contingencia ambiental atmosférica de la calidad del aire de las Zonas Metropolitanas*. México.

INECC. (2013). *Monitoreo de las Emisiones del Volcán Popocatépetl. Determinación de los niveles de concentración de partículas suspendidas, óxidos de azufre y parámetros meteorológicos en zonas potencialmente impactadas que se encuentren fuera de la cobertura de los sis*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/151162/2013_CGCSA_Monitoreo_de_las_emisiones_del_volcan_popocatepetl.pdf

INECC. (2016). Programa Institucional del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2014-2018. Logros 2016. Recuperado de https://www.inecc.gob.mx/transparencia/transparencia/2016_logros_inecc.pdf

INECC, & UNAM. (2015a). Climatología de referencia (SMN 1961-2000, 30" x 30"). Recuperado el 10 de abril de 2020, de https://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/

INECC, & UNAM. (2015b). Climatología de referencia (WorldClim 1950-2000). Recuperado el 15 de abril de 2020, de https://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/

INEGI. (2001). Fisiografía. En *Síntesis de información geográfica del estado de México*. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224028/702825224028_4.pdf

INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía: Climatológica*. México. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825231781

INEGI. (2012a). *Clasificación para Actividades Económicas*. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Ed.). México. Recuperado de http://www3.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/205/download/5998

INEGI. (2012b). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Recuperado el 8 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/

INEGI. (2013a). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado el 14 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Tabulados

INEGI. (2013b). Serie histórica censal e intercensal (1990-2010). Recuperado el 17 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/cpvsh/default.html#Tabulados

INEGI. (2015). Encuesta Intercensal 2015. Recuperado el 14 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/default.html#Tabulados

INEGI. (2016). Banco de Información Económica (BIE). Recuperado el 28 de agosto de 2018, de http://www.inegi.org.mx/Sistemas/BIE/Default.aspx?Topic=0&idserPadre=1020004300300010017 0#D10200043003000100170

INEGI. (2017a). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2017. Recuperado el 23 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2017/

INEGI. (2017b). Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2017. México. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/eod/2017/doc/resultados_eod_2017.pdf

INEGI. (2018). Directorio Nacional de Unidades Económicas. DENUE. Recuperado el 22 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/

INEGI. (2019a). Marco Geoestadístico, septiembre 2019. Recuperado el 8 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/temas/mg

INEGI. (2019b). Relieve. Ciudad de México. Recuperado el 8 de abril de 2020, de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=09

INEGI. (2019c). Relieve. Estado de México. Recuperado el 8 de abril de 2020, de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=15

INEGI. (2020a). Biblioteca digital de Mapas. Recuperado el 8 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/app/mapas/

INEGI. (2020b). Indicador Trimestral de la Actividad Económica Estatal. Recuperado el 22 de abril de 2020, de https://www.inegi.org.mx/temas/itaee/default.html#Tabulados

INEGI, & Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2017*. Recuperado de https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/CDMX_ANUARIO_PDF.pdf

Instituto de Geografía UNAM. (2017). Infraestructura de Datos Espaciales Abiertos. Recuperado el 27 de abril de 2020, de https://www.gits.igg.unam.mx/idea/descarga

Instituto de Investigaciones Parlamentarias. (2017). Diagnóstico de movilidad en la Ciudad de México. El impacto del crecimiento vehicular (problemas, estadísticas y evaluación de políticas). Ciudad de México: Asamblea Legislativa del Distrito Federal. Recuperado de http://aldf.gob.mx/archivo-9f6f5328e0f0853d4453d481cbffa2b6.pdf

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2002). Enciclopedia de los Municipios de México. Hidalgo.- Tizayuca. Recuperado el 15 de abril de 2020, de http://intranet.e-hidalgo.gob.mx/enciclomuni/municipios/13069a.htm

ITDP. (2015). Transporte Público Masivo en la Zona Metropolitana del Valle de México. Proyecciones de demanda y soluciones al 2024. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo. ITDP México. Recuperado de http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Transporte-PuḺblico-Masivo-en-la-Zona-Metropolitana-del-Valle-de-MeḺxico-Proyecciones-de-demanda-y-soluciones-al-2024.pdf

Jáuregui, E. (1989). The dust storms of Mexico City. *International Journal of Climatology*, *9*(2), 169–180. https://doi.org/10.1002/joc.3370090205

Köfalusi, G., & Aguilar, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica, Instituto Nacional de Ecología*, *79*, 39–51. Recuperado de http://estudiosterritoriales.org/resumen.oa?id=53907903

Kroll, J. H., Ng, N. L., Murphy, S. M., Flagan, R. C., & Seinfeld, J. H. (2006). Secondary Organic Aerosol Formation from Isoprene Photooxidation. *Environmental Science & Technology*, *40*(6), 1869–1877. https://doi.org/10.1021/es0524301

Lombardozzi, D., Sparks, J. P., Bonan, G., & Levis, S. (2012). Ozone exposure causes a decoupling of conductance and photosynthesis: implications for the Ball-Berry stomatal conductance model. *Oecologia*, *169*(3), 651–659. https://doi.org/10.1007/s00442-011-2242-3

López, M. T., Villaseñor, R., Quintanar, A. I., & Mora, V. (1970). Transport and dispersion of blowing dust in the Mexico Basin. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, (51).

Magaña, V., & Quintanar, A. I. (1997). On the use of General Circulation Models to study regional climate. En *Proceedings of the Second UNAM–CRAY Supercomputing Conference* (pp. 39–48). Ciudad de México: Cambridge University Press.

Martin-Del Pozzo, A. L. (2012). Precursors to eruptions of Popocatépetl Volcano, Mexico. *Geofísica internacional*. Scielo.

Mena-Carrasco, M., Carmichael, G. R., Campbell, J. E., Zimmerman, D., Tang, Y., Adhikary, B., … Zheng, W. (2009). Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry. *Atmos. Chem. Phys.*, *9*(11), 3731–3743. https://doi.org/10.5194/acp-9-3731-2009

Miranda, F., & Hernández, E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Botanical Sciences*, (28), 29. https://doi.org/10.17129/botsci.1084

Newman, P. A. (2018). Nasa Ozone Watch: Ozone facts. NASA. Recuperado de https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/SH.html

Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, *4*(3–4), 115–123. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007

OCDE. (2015). *Estudios Territoriales de la OCDE. Valle de México, México*. https://doi.org/10.1787/9789264245174-en

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., … Kassem, K. R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, *51*(11), 933. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:teotwa]2.0.co;2

OMS. (2000). La salud y el medio ambiente en el desarrollo sostenible. *Organización Panamericana de la Salud.*, (Publicación Científica 572), 283. Recuperado de http://www1.paho.org/hq/dmdocuments/salud-ambiente-desarrollo-sostenible2000.pdf

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2014). *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Edición 2013*. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2015/09/Estadisticas_Agua_Valle_de_Mexico_2014.pdf

Partida-Bush, V. (2013). Migración hacia y desde 16 zonas metropolitanas de México. una reconstrucción histórica 1965-2010. *Papeles de Población*, *19*(76), 9–51.

Pascual Ramírez, R., López Quiroz, M., Martínez Sánchez, J., Chablé Pech, L., Espejo Madrigal, A., & Ledesma Juana, I. (2018). *Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2018*. México. Recuperado de https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reporte-del-clima-en-mexico

Possell, M., & Hewitt, N. (2011). Isoprene emissions from plants are mediated by atmospheric CO_2 concentrations. *Global Change Biology*, *17*(4), 1595–1610. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02306.x

Romo Viramontes, R., & Velázquez Isidro, M. (2018). La dinámica inter e intrametropolitana de migración y movilidad entre la Zona Metropolitana del Valle de México y zonas metropolitanas vecinas. En N. Baca Tavira, Z. Ronzón Hernández, R. Romo, R. P. Román Reyes, & M. Padrón Innamorato (Eds.), *Migraciones y movilidades en el centro de México* (1a edición, p. 206 págs). México: Universidad Autónoma del Estado de México; Consejo Nacional de Población; Sociedad Mexicana de Demografía; Universidad Nacional Autónoma de México.

Rzedowski, J. (2006). Tipos de vegetación. En *Vegetación de México* (1a edición). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Salcedo, D., Castro, T., Ruiz-Suárez, L. G., García-Reynoso, A., Torres-Jardón, R., Torres-Jaramillo, A., … Suárez-Lastra, M. (2012). Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state). *Science of The Total Environment*, *414*, 417–432. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.041

SCT. (2020). AICM en cifras. Diciembre 2019. Recuperado de https://www.aicm.com.mx/acercadelaicm/archivos/files/Estadisticas/Estadisticas-2019Dic.pdf

Secretaría de Desarrollo Económico. (2019). Guía para la Inversión 2019. Ciudad de México. DGPSE. Recuperado de https://www.sedeco.cdmx.gob.mx/storage/app/media/guia-para-la-inversion-2019-portal.pdf

Secretaría de Turismo. (2019). Actividad Turística de la Ciudad de México. Indicadores enero-diciembre 2008-2018. Gobierno de la Ciudad de México. Recuperado de https://www.turismo.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Estadisticas/Estadisticas 2018/Enero a diciembre 2008 - 2018.pdf

SECTUR, & Gobierno del Distrito Federal. (2013). Agenda de Competitividad Turística de la Ciudad de México 2013-2018.

SEDEMA. (2006). *Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2006*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_climatologico_2006/informe_anual_climatologico_2006.pdf

SEDEMA. (2007). *Agenda Ambiental de la Ciudad de México. Programa de Medio Ambiente 2007-2012*. Recuperado de http://centro.paot.org.mx/documentos/sma/agenda_amb_ciudad_mexico.pdf

SEDEMA. (2015a). Biodiversidad. Especies de la Ciudad de México. Recuperado el 14 de abril de 2020, de http://data.sedema.cdmx.gob.mx/biodiversidadcdmx/fauna.html

SEDEMA. (2015b). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2014*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2014/mobile/informe-calidad-aire.pdf

SEDEMA. (2016). *Programa de Manejo del Área Natural Protegida, con Categoría de Zona sujeta a Conservación Ecológica "Sierra de Guadalupe"*. Recuperado de http://www.cms.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/594/d40/076/594d4007630a0667718310.pdf

SEDEMA. (2018a). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2017*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2018b). Inventarios de emisiones de la ZMVM. Recuperado el 29 de abril de 2020, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=&dc=Zg==

SEDEMA. (2019a). Áreas de valor ambiental — Datos CDMX. Recuperado el 3 de abril de 2020, de https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/areas-de-valor-ambiental/table/

SEDEMA. (2019b). Áreas Naturales Protegidas. Recuperado el 14 de abril de 2020, de https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/areas-naturales-protegidas/information/

SEDEMA. (2019c). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México 2018*. (E. Arriaga Ramos, Z. Rodríguez González, & I. Delit López, Eds.). Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente. Recuperado de https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS-2018-VF-09-09-2019.pdf

SEDEMA. (2020a). Áreas Naturales Protegidas. Recuperado el 14 de abril de 2020, de https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/areas-naturales-protegidas

SEDEMA. (2020b). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2018*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2020c). Inventario de emisiones de la ZMVM 2018. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (datos preliminares).

SEDEMA. (2020d). *Primer Informe de Labores 2019*. Ciudad de México. Recuperado de https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/5e5/57a/bbc/5e557abbc930d091015469.pdf

SEDENA. (s/f). Nuevo Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles. Recuperado el 27 de abril de 2020, de https://www.gob.mx/nuevoaeropuerto-felipeangeles

SEDENA. (2019). Programa General de Ejecución de Obra. Frentes de Trabajo Aeropuerto Internacional "General Felipe Ángeles". Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/512636/PROGRAMA_GENERAL.pdf

SEDESOL. (2012). Capítulo I. Vialidad urbana. En *Manual de Normas y Reglas de vialidad, dispositivos de tránsito y Mobiliario Urbano* (p. 24). México. Recuperado de http://normateca.sedesol.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/1592/1/images/ContenidoTOMOI.pdf

SEDESOL, Gobierno de la Ciudad de México, Gobierno del Estado de México, & Gobierno del Estado de Hidalgo. (2011). *Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México.*

SEMARNAT. (2012). *Población y medio ambiente*. México. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap1_poblacion.pdf

SEMARNAT. (2014). El Medio Ambiente en México 2013-2014. Recuperado el 9 de junio de 2020, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/05_atmosfera/5_2_3.html

SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015*. México: SEMARNAT. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de Calidad del Aire. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf

SEMARNAT, CAMe, & INECC. (2017). *Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017-2030*. Recuperado de http://www.gob.mx/semarnat

SEMARNAT, Gobierno de la Ciudad de México, & Gobierno del Estado de México. (1996). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000*. Ciudad de México. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/69323/18_PROAIRE_ZMVM_1995-2000.pdf

SEMARNAT, Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, & Secretaría de Salud. (2001). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010*. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf

SEMARNATH. (2014). Actualización del Programa de Ordenamiento Ecológico de la Región Valle Pachuca - Tizayuca. Etapa de Diagnóstico. Recuperado de http://201.99.98.88/actualizacion_pachuca_tizayuca/Fases Metodologicas/diagnostico/Diagnostico_ambiental_memoria.pdf

SEMOVI. (2016). *Programa de mediano Plazo "Programa Integral de Seguridad Vial" 2016-2018 para la Ciudad de México*. Ciudad de México. Recuperado de https://www.semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/PISVI_Low.pdf

SEMOVI. (2019a). Anexo Estadístico 2019. Secretaría de Movilidad. Recuperado de https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/anexo-estadistico-21102019.pdf

SEMOVI. (2019b). Plan estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México. Recuperado de https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/plan-estrategico-de-movilidad-2019.pdf

SEMOVI. (2019c). Presentación del Sistema de Transporte Público Cablebús de la Ciudad de México.

SEMOVI. (2020). GTFS estático (General Transit Feed Specifications) de la Ciudad de México. Recuperado el 27 de abril de 2020, de https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/gtfs-general-transit-feed-specifications-actualizado-de-la-ciudad-de-mexico/information/?location=9,19.4018,-99.1439

SENER. (2018). Balance Nacional de Energía 2017. Secretaría de Energía. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf

Sheinbaum Pardo, C., Jazcilevich Diamant, A., Siebe Grabach, C., & García, E. C. (2014). Mitigación de fuentes de material particulado emitidos por erosión eólica que afectan la Zona Metropolitana del Valle de México. Universidad Nacional Autónoma de México.

SMAGEM. (2017). Actualización de la primera etapa (caracterización y diagnóstico). En Gobierno del Estado de México & SEMARNAT (Eds.), *Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Estatal 2018*. Estado de México. Recuperado de https://dgoia.edomex.gob.mx/actualizacion_programa

SMAGEM. (2018a). Etapa de diagnóstico. Memoria. En Gobierno del Estado de México & SEMARNAT (Eds.), *Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Estatal 2018*. Estado de México. Recuperado de https://dgoia.edomex.gob.mx/sites/dgoia.edomex.gob.mx/files/files/POETEM_DIAGNÓSTICO_28-02-2019.pdf

SMAGEM. (2018b). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México. ProAire 2018 - 2030. Recuperado de http://proaire.edomex.gob.mx/sites/proaire.edomex.gob.mx/files/files/mis pdf/ProAire 2018-2030.pdf

SMAGEM. (2019). Datos de la generación de residuos del Estado de México 2018. Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México. Información proporcionada por correo electrónico el día 21 de noviembre 2019 de la Dra. Susana Libién Díaz González, Directora General de Manejo Integral de Residuos.

Solomon, S., Qin, D., & Manning, M. (2007). Resumen Técnico. En *Cambios Climáticos 2007: Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos*. Cambridge University Press. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf

SSP. (2015a). Ejes viales y avenidas principales. Recuperado el 9 de junio de 2020, de http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/documentos/mapas/red_vial_primaria.pdf

SSP. (2015b). Vías de acceso controlado. Recuperado el 9 de junio de 2020, de http://data.ssp.cdmx.gob.mx/reglamentodetransito/documentos/mapas/vias_acceso_controlado.pdf

UN-Habitat. (2016). Measurement of City Prosperity. Methodology and Metadata. UN-Habitat. Recuperado de http://cpi.unhabitat.org/sites/default/files/resources/CPI METADATA.2016.pdf

UN-Habitat, & New York University. (2016). Atlas of Urban Expansion. Recuperado de http://atlasofurbanexpansion.org/

UNAM. (2017). *Memoria técnica del mapa de peligros del volcán Popocatépetl*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Hugo_Delgado_Granados/publication/325631300_Estudios_geologicos_y_actualizacion_del_mapa_de_peligros_del_volcan_Popocatepetl/links/5b19af92aca272021cf2179e/Estudios-geologicos-y-actualizacion-del-mapa-de-peligros-del-v

UNAM, & INECC. (2016). *Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208883/Informe_Final_AECAME_20161230.pdf

Velázquez Uribe, M. T. (1996). Dinámica poblacional y medio ambiente. *Ciencias*, (44), 56–63. Recuperado de http://www.ejournal.unam.mx/cns/no44/CNS04408.pdf

Wang, K.-Y., & Shallcross, D. E. (2000). Modelling terrestrial biogenic isoprene fluxes and their potential impact on global chemical species using a coupled LSM–CTM model. *Atmospheric Environment*, *34*(18), 2909–2925. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00525-7

Capítulo 2. Fuentes de información

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2019). La cuestión de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el disfrute de un medio ambiente sin riesgos, limpio, saludable y sostenible. En *A/HRC/40/55*. Organización de las Naciones Unidas. https://doi.org/10.18268/bsgm1908v4n1x1

DOF. (1992). *Acuerdo por el que se crea la Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México.*

DOF. (2017). Constitución Política de la Ciudad de México. En *Constitución Política de la Ciudad de México* (Vol. 2017, p. 220). https://doi.org/42867930

DOF. (2020). *Decreto Promulgatorio del Acuerdo en Materia de Cooperación Ambiental entre los Gobiernos de los Estados Unidos Mexicanos, de los Estados Unidos de América y de Canadá.* http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596750&fecha=15/07/2020

Gobierno de la Ciudad de México. (2018). *NADF-009-AIRE-2017, que Establece los Requisitos para Elaborar el Índice de Calidad del Aire en la Ciudad de México*. Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA).

Gobierno de la Ciudad de México. (2019). *Programa de Gobierno de la Ciudad de México 2019-2024*.

Gobierno del Distrito Federal. (2000). *Ley Ambiental del Distrito Federal*.

Gobierno del Distrito Federal. (2005). *Declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de México.*

Gobierno del Distrito Federal. (2011). *Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal.*

Gobierno del Estado de Hidalgo. (2015). *Ley para la protección al Ambiente del Estado de Hidalgo* (p. 81).

Gobierno del Estado de Hidalgo. (2016). *Constitución Política del Estado de Hidalgo* (p. 133).

OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*. Organización Mundial de la Salud.

ONU. (1992). *Declaración de Rio sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm

ONU. (1995). *Declaración y Plataforma de Acción de Beijing, Declaración política y documentos resultados de Beijing+5* (pp. 3, 181 y 182).

https://www.unwomen.org/-/media/headquarters/attachments/sections/csw/bpa_s_final_web.pdf

ONU. (2002). *Declaración de Johannesburgo sobre el Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/WSSDsp_PD.htm

ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/news/communications-material/

SEMARNAT. (2019). *Posicionamiento oficial para la participación de la Delegación Mexicana en la COP25* (pp. 1–13). https://www.gob.mx/semarnat/documentos/posicionamiento-oficial-para-la-participacion-de-la-delegacion-mexicana-en-la-cop-25?state=published

T-MEC. (2019). *Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC)*. https://www.gob.mx/t-mec/acciones-y-programas/resultados-de-la-modernizacion-del-acuerdo-comercial-entre-mexico-estados-unidos-y-canada?state=published

Capítulo 3. Fuentes de información

Alcántar González, F. S., & Cruz Gómez, M. J. (2011). Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SOx y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación. *Revista internacional de contaminación ambiental*. scielomx

BSC-SEDEMA. (2017). *Aplicación del pronóstico para la evaluación de políticas de reducción de emisiones*.

Centro Mario Molina. (2013). Evaluación de la mejora en la calidad de los combustibles automotrices en el país. Recuperado el 13 de mayo de 2020, de: http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2013/02/3Costo-beneficiofinal.pdf

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). STL A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess (with Discussion). *Journal of Official Statistics*, *6*(1), 3–73.

Cruz Núñez, X. (2019). Black carbon radiative forcing in south Mexico City, 2015. *Atmósfera; Vol 32, No 3 (2019)*. https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.03.01

Dirección de Monitoreo Atmosférico. (2018). Datos horarios por contaminante. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBhnml=%27&opcion=Zg==

DOF. NOM-026-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población (1993). Secretaría de Salud.

DOF. NOM-021-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud (1994). Secretaría de Salud.

DOF. NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO_2). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO_2) en el aire ambiente como medida de protección a la salud (1994). Secretaría de Salud.

DOF. NOM-022-SSA1-2010, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO_2). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la (2009). Secretaría de Salud.

DOF. NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire (2012). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-156-SEMARNAT-2012.pdf

DOF. NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O_3) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. (2014). Secretaría de Salud.

DOF. NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación (2014). Secretaría de Salud.

DOF. NOM-022-SSA1-2019, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO_2). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud (2019). Secretaría de Salud.

DOF. NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (2019). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

EPA Systems. (2012). Audit of Ambient Air Monitoring Stations for the Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Recuperado el 8 de mayo de 2020, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aBhnmI=&dc=%27Zg==

EPA Systems. (2018). SIMAT Air Quality Audit Report. Recuperado el 8 de mayo de 2020, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aBhnmI=&dc=%27Zg==

Fang, T., Guo, H., Zeng, L., Verma, V., Nenes, A., & Weber, R. J. (2017). Highly Acidic Ambient Particles, Soluble Metals, and Oxidative Potential: A Link between Sulfate and Aerosol Toxicity. *Environmental Science & Technology*, *51*(5), 2611–2620. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06151

Garzón, J. P., Huertas, J. I., Magaña, M., Huertas, M. E., Cárdenas, B., Watanabe, T., … Blanco, S. (2015). Volatile organic compounds in the atmosphere of Mexico City. *Atmospheric Environment*, *119*, 415–429. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.014

Gobierno de la Ciudad de México. (2018). *NADF-009-AIRE-2017, que Establece los Requisitos para Elaborar el Índice de Calidad del Aire en la Ciudad de México*. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA).

Gobierno de la Ciudad de México. Aviso por el que se da a conocer el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México (2019). Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/ultima-hora/calidad-aire/pcaa/Gaceta_Oficial_CDMX.pdf

Gobierno del Estado de México. Acuerdo por el que se establece el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en los 59 municipios del Estado de México que se localizan dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (2019). Toluca, Estado de México: Gaceta el Gobierno del Estado Libre y Soberano de México. Periódico Oficial. Recuperado de http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2019/Periodico_oficial_GOB_EDOMEX.pdf

Guevara, M., Tena, C., Soret, A., Serradell, K., Guzmán, D., Retama, A., … Mediavilla, A. (2017). An emission processing system for air quality modelling in the Mexico City metropolitan area: Evaluation and comparison of the MOBILE6.2-Mexico and MOVES-Mexico traffic emissions. *Science of The Total Environment*, *584–585*, 882–900. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.135

Harvard T.H. Chan School of Public Health, & SEDEMA. (2018). *Análisis histórico de los beneficios en la salud de la población, asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/beneficios-en-salud-por-la-mejora-de-la-calidad-del-aire/

Heald, C., & Spracklen, D. (2015). Land Use Change Impacts on Air Quality and Climate. *Chemical Reviews*, *115*, 4476–4496. https://doi.org/10.1021/cr500446g

Health Effects Institute. (2013). *Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles*. Recuperado de https://www.healtheffects.org/system/files/Perspectives3-ExecutiveSummary.pdf

INECC. (2010). *Procedimiento para obtener indicadores de la Calidad del Aire*. Recuperado de http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/625/procedimiento.pdf

INECC. (2018). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2017, México*. Recuperado de https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2017.pdf

Jacobson, M. Z. (2012). *Air Pollution and Global Warming* (2a ed.). Cambridge University Press.

Jaimes, M. (2017). *Control de la formación de ozono a través de un caso de uso*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Janssen, N., Gerlofs-Nijland, M., Lanki, T., Salonen, R., Cassee, F., Hoek, G., … Krzyzanowski, M. (2012). Health effects of black carbon. World Health Organization. Recuperado de http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/162535/e96541.pdf

Lei, W., de Foy, B., Zavala, M., Volkamer, R., & Molina, L. T. (2007). Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model. *Atmos. Chem. Phys.*, *7*(5), 1347–1366. https://doi.org/10.5194/acp-7-1347-2007

Lei, W., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., & Molina, L. T. (2008). Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.*, *8*(24), 7571–7581. https://doi.org/10.5194/acp-8-7571-2008

OMS. (1999). Environmental Health Criteria 213. Carbon Monoxide (second edition). Recuperado de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42180/WHO_EHC_213.pdf?sequence=1

OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*.

OMS. (2017). Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. Organización Mundial de la Salud. Recuperado de http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/331660/Evolution-air-quality.pdf?ua=1

OMS. (2018). Calidad del aire ambiente y salud. Recuperado el 26 de abril de 2019, de https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Ostro, B., Prüss-Üstün, A., Campbell-Lendrum, D., Corvalán, C., & Woodward, A. (2004). Outdoor air pollution. Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. Recuperado de https://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/ebd5.pdf

Peralta, O., Ortínez-Alvarez, A., Basaldud, R., Santiago, N., Alvarez-Ospina, H., de la Cruz, K., … Gavilán, A. (2019). Atmospheric black carbon concentrations in Mexico. *Atmospheric Research*, *230*, 104626. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104626

Pogány, A., Balslev-Harder, D., Braban, C., Cassidy, N., Ebert, V., Ferracci, V., … Niederhauser, B. (2015). Metrology for ammonia in ambient air–concept and first results of the EMRP project MetNH3. En *17th International Congress of Metrology*. Paris: EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/metrology/20150007003

Retama, A., Neria-Hernández, A., Jaimes-Palomera, M., Rivera-Hernández, O., Sánchez-Rodríguez, M., López-Medina, A., & Velasco, E. (2019). Fireworks: A major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico city. *Atmospheric Environment: X*, *2*, 100013. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100013

SEDEMA. (2012). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2011*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2016). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2015*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2017). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2016*. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2018a). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2017*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2018b). El monitoreo de la calidad del aire. Recuperado el 6 de mayo de 2020, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27

SEDEMA. (2018c). Estaciones de monitoreo. Recuperado el 6 de mayo de 2020, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27&dc=ZA==

SEDEMA. (2018d). Información Sobre el Monitoreo Atmosférico en la Ciudad de México. Recuperado el 6 de mayo de 2020, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/objetivos-redes/objetivos-monitoreo-calidad-aire-rama.html

SEDEMA. (2018e). Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/#p=2

SEDEMA. (2018f). Pronóstico de calidad del aire para la CDMX. Recuperado el 14 de agosto de 2018, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/pronostico-aire/pronostico-por-contaminante.php

SEDEMA. (2018g). Pronóstico meteorológico para la CDMX. Recuperado el 14 de agosto de 2018, de http://www.aire.cdmx.gob.mx/pronostico-aire/pronostico-meteorologico.php

SEDEMA. (2020a). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2018*. Ciudad de México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2020b). *Matriz de Seguimiento de Medidas del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. Ciudad de México.

SEDEMA, SMAGEM, & SEMARNAT. (2011). *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. México. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. *Physics Today* (2a ed., Vol. 51). New Jersey, USA: John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1063/1.882420

SEMARNAT. (2020). *Seguimiento y Evaluación del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (2018).* Comunicación personal (vía correo electrónico), julio de 2020.

SMAGEM. (2020). *Matriz de Seguimiento de Medidas del Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020.* Comunicación personal (vía correo electrónico), junio de 2020.

Song, J., Lei, W., Bei, N., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., … Molina, L. T. (2010). Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, *10*(8), 3827–3846. https://doi.org/10.5194/acp-10-3827-2010

Stephens, S., Madronich, S., Wu, F., Olson, J. B., Ramos, R., Retama, A., & Muñoz, R. (2008). Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO, NO_x, PM_{10} and O_3 during 1986–2007. *Atmos. Chem. Phys.*, *8*(17), 5313–5325. https://doi.org/10.5194/acp-8-5313-2008

Tie, X., Madronich, S., Li, G., Ying, Z., Zhang, R., Garcia-Reynoso, A., … Liu, Y. (2007). Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study. *Atmospheric Environment*, *41*, 1989–2008. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.053

Trejo-González, A., Riojas-Rodriguez, H., Texcalac Sangrador, J. L., Guerrero López, C. M., Cervantes-Martínez, K., Magali, H.-D., … Zuñiga-Bello, P. (2019). Quantifying health impacts and economic costs of PM2.5 exposure in Mexican cities of the National Urban System. *International Journal of Public Health*, *64*. https://doi.org/10.1007/s00038-019-01216-1

US EPA. (s/f). How is the NowCast algorithm used to report current air quality? Recuperado de https://www.airnow.gov/faqs/how-nowcast-algorithm-used-report/

US EPA. (2008). *Final Ozone NAAQS Regulatory Impact Analysis*. Recuperado de https://www3.epa.gov/ttnecas1/regdata/RIAs/452_R_08_003.pdf

US EPA. (2012). *Report to Congress on Black Carbon*. Recuperado de https://19january2017snapshot.epa.gov/www3/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf

US EPA. (2016). National Ambient Air Quality Standards. Recuperado el 4 de junio de 2020, de https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table

US EPA. (2017). Technical Overview of Volatile Organic Compounds. Recuperado de https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#5

US EPA. (2018). Lead at Superfund Sites: Human health. Recuperado de https://www.epa.gov/superfund/lead-superfund-sites-human-health

US EPA, & Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS). (2005). *Report from the Performance Audit of the Mexico City Ambient Air Monitoring Network*. Recuperado de http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Zg==

Wang, L. K., Pereira, N. C., & Hung, Y.-T. (2004). *Air Pollution Control Engineering*. New Jersey: Human Press Inc.

Williams, J. (2004). Organic trace gases in the atmosphere: An overview. *Environmental Chemistry*, *1*(3), 125–136. https://doi.org/10.1071/EN04057

Yang, L., Gao, X., Wang, X., Nie, W., Wang, J., Gao, R., … Wang, W. (2014). Impacts of firecracker burning on aerosol chemical characteristics and human health risk levels during the Chinese New Year Celebration in Jinan, China. *Science of The Total Environment*, *476–477*, 57–64. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.110

Zhang, Y., & Dubey, M. K. (2009). Comparisons of WRF/Chem simulated O_3 concentrations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the MILAGRO period. *Atmospheric Environment*, *43*(30), 4622–4631. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.039

Capítulo 4. Fuentes de información

Bento, A., Mookerjee, M., & Severnini, E. (2017). *A New Approach to Measuring Climate Change Impacts and Adaptation*.

Bravo Cabrera, J. L., Azpra Romero, E., Rodriguez Gonzalez, F. J., & Rodriguez López, O. (2018). Effects of ENSO on precipitation in Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, *97*. https://doi.org/10.14350/rig.59679

Bravo Cabrera, J. L., Azpra Romero, E., Zarraluqui-Such, V., & Gay-Garcia, C. (2017). Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: An extended treatment. *Atmósfera*, *30*(3), 221–232. https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.03

C40. (2013). *Mexico City: ProAire*. https://www.c40.org/profiles/2013-mexicocity

Climate Action Tracker. (2020). *2100 Warming Projections*. https://climateactiontracker.org/global/temperatures/

CONAGUA. (2019). *Reporte anual del clima en México 2019*. 1–18.

Del Genio, A., & Wolf, A. (2000). The Temperature Dependence of the Liquid Water Path of Low Clouds in the Southern Great Plains. *NASA Goddard Institute for Space Studies*.

Fang, Y., Naik, V., Horowitz, L. W., & Mauzerall, D. L. (2013). Air pollution and associated human mortality: The role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*(3), 1377–1394. https://doi.org/10.5194/acp-13-1377-2013

Fiore, A. M., Naik, V., & Leibensperger, E. M. (2015). Air quality and climate connections. *Journal of the Air and Waste Management Association*, *65*(6), 645–685. https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1040526

Fu, T.-M., & Tian, H. (2019). *Climate Change Penalty to Ozone Air Quality: Review of Current Understandings and Knowledge Gaps*.

Garcia-Menendez, F., Saari, R., Monier, E., & Selin, N. (2015). *U.S. Air Quality and Health Benefits from Avoided Climate Change under Greenhouse Gas Mitigation*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Climate Change.

Gonzalez-Abraham, R., Chung, S. H., Avise, J., Lamb, B., Salathé Jr., E. P., Nolte, C. G., Loughlin, D., Guenther, A., Wiedinmyer, C., Duhl, T., Zhang, Y., & Streets, D. G. (2015). The effects of global change upon United States air quality. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(21), 12645–12665. https://doi.org/10.5194/acp-15-12645-2015

Heald, C., & Spracklen, D. (2015). Land Use Change Impacts on Air Quality and Climate. *Chemical Reviews*, *115*, 4476–4496. https://doi.org/10.1021/cr500446g

INECC. (2019). *Estrategias integradas en contaminantes climáticos de vida corta para mejorar la calidad del aire y reducir el impacto al cambio climático*.

INECC, & UNAM. (2015). *Climatología de referencia (WorldClim 1950-2000)*. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. https://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/

INECC-PNUD, & Hernández Grajales, R. V. (2017). *Generación de un conjunto de procedimientos e instrumentos para la creación de un sistema de alerta temprana en el Marco del Cambio Climático y desde una perspectiva de contingencia ambiental atmosférica de la calidad del aire de las Zonas Metropolitanas*.

IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014. Informe de síntesis: Resumen para responsables de políticas*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

IPCC. (2019). *Calentamiento Global de 1.5°C: Resumen para responsables de políticas*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf

IUCN. (2015). *Gender and climate change: Strengthening climate action by promoting gender equality*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/gender_and_climate_change_issues_brief_cop21__04122015.pdf

Jacobson, M. Z. (2012). *Air Pollution and Global Warming* (2a ed.). Cambridge University Press.

Kelly, J., Makar, P. A., & Plummer, D. A. (2012). Projections of mid-century summer air-quality for North America: Effects of changes in climate and precursor emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *12*(12), 5367–5390. https://doi.org/10.5194/acp-12-5367-2012

Kimmelman, M. (2017). Mexico City, Parched and Sinking, Faces a Water Crisis. *New York Times*. https://www.nytimes.com/interactive/2017/02/17/world/americas/mexico-city-sinking.html

Lezama, J. L., & Graizbord, Boris. (2012). *Los grandes problemas de México. Medio ambiente*. https://books.google.de/books?id=VPUcAwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Párez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofisica Internacional*, *42*, 313–330.

NASA. (2020). *Los efectos del cambio climático*. Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. https://climate.nasa.gov/efectos/

Nolte et al. (2018). The potential effects of climate change on air quality across the conterminous US at 2030 under three Representative Concentration Pathways. *Atmospheric Chemistry and Physics*.

OCDE. (2015). *The Economic Consequences of Climate Change*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. https://www.oecd.org/env/the-economic-consequences-of-climate-change-9789264235410-en.htm

OEHHA. (2020). *PM2.5*. California Office of Environmental Health Hazard Assessment. https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25

Poma, A. (2019). *El cambio climático en México*. Canal Instituto de Investigaciones Sociales: UNAM. https://www.youtube.com/watch?v=-o2RaC3RbxM

Ritchie, H., & Roser, M. (2019). CO_2 and Greenhouse Gas Emissions. *Oxford Martin School: Our World in Data*. https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions

Sánchez, Armando & Gay Garcia, Carlos & Estrada, Francisco. (2011). Cambio climático y pobreza en el Distrito Federal. Investigación económica / Escuela Nacional de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México. 278. 45-74.

SEDEMA. (2016). *Estrategia de Resiliencia CDMX. Transformación Adaptativa, Incluyente y Equitativa*. Gobierno de la Ciudad de México. https://www.resiliencia.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Estrategia%20de%20Resiliencia%20CDMX.pdf

SEDEMA, & CIEG-UNAM. (2017). *Diagnóstico para Conocer los Impactos del Cambio Climático en Mujeres y Hombres de la CDMX*.

http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/diagnostico-impactos_cambio_climatico.pdf

SEDEMA. (2018a). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2017*. Gobierno de la Ciudad de México. http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA. (2018b). *Impactos y costos del cambio climático*. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/Costos_cambio_climatico_vf.pdf

SEDEMA. (2020). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2018*. Gobierno de la Ciudad de México. http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=

SEDEMA, & C40. (2017). *CAP 1.5°C. Prioritisation analysis of climate actions*. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/climate-change/images/biblioteca_cc/Analisis-de-priorizacion-de-acciones-climaticas-ing.pdf

SEMARNAT. (2016). *Cómo afecta el cambio climatico a México*. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/como-afecta-el-cambio-climatico-a-mexico

SEMARNAT, CAMe, Gobierno de la Ciudad de México, & Gobierno del Estado de México. (2019). *Medidas necesarias para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/541242/DOCUMENTO_14_MEDIDAS_NECESARIAS_vFINAL_2.pdf

Sheinbaum, J. (2003). *Current theories on El Niño-Southern Oscillation: A review*. /paper/Current-theories-on-El-Ni%C3%B1o-Southern-Oscillation%3A-A-Sheinbaum/f26074a4bb2a232877ea690c3f05a8b019d47e47

Shi, L., Liu, P., Wang, Y., Zanobetti, A., Kosheleva, A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. (2016). Chronic effects of temperature on mortality in the Southeastern USA using satellite-based exposure metrics. *Scientific Reports*, *6*(30161), Article 30161.

Shi, L., Liu, P., Zanobetti, A., & Schwartz, J. (2019). Climate Penalty: Climate-driven increases in ozone and PM2.5 levels and mortality. *Environmental Epidemiology*.

Trail, M., Tsimpidi, A. P., Liu, P., Tsigaridis, K., Rudokas, J., Miller, P., Nenes, A., Hu, Y., & Russell, A. G. (2014). Sensitivity of air quality to potential future climate change and emissions in the United States and major cities. *Atmospheric Environment*, *94*, 552–563. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.079

UNEP. (2020). *El mundo registra concentración récord de dióxido de carbono a pesar de la COVID-19*. Programa de Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente. http://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-mundo-registra-concentracion-record-de-dioxido-de-carbono-pesar

UNFCCC. (2015). *Acuerdo de París*. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climáico. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement

Val Martin, M., Heald, C. L., Lamarque, J.-F., Tilmes, S., Emmons, L. K., & Schichtel, B. A. (2015). How emissions, climate, and land use change will impact mid-century air quality over the United States: A focus on effects at national parks. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(5), 2805–2823. https://doi.org/10.5194/acp-15-2805-2015

Wang, B., Luo, X., Yang, Y. M., Sun, W., Cane, M. A., Cai, W., Yeh, S. W., & Liu, J. (2019). Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *116*(45), 22512–22517. https://doi.org/10.1073/pnas.1911130116

West et al. (2013). Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human health. *Nature Climate Change*.

Wu, S., Mickley, L. J., Leibensperger, E. M., Jacob, D. J., Rind, D., & Streets, D. G. (2008). Effects of 2000–2050 global change on ozone air quality in the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *113*(D6). https://doi.org/10.1029/2007JD008917

Zeng et al. (2019). A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, *9*. https://www.nature.com/articles/s41558-019-0622-6?draft=collection

Capítulo 5. Fuentes de información

Almanza, V. H., Molina, L. T., & Sosa, G. (2012). Soot and SO_2 contribution to the supersites in the MILAGRO campaign from elevated flares in the Tula Refinery. *Atmos. Chem. Phys.*, *12*(21), 10583–10599. https://doi.org/10.5194/acp-12-10583-2012

Benbrahim-Tallaa, L., Baan, R. A., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Guha, N., Loomis, D., Straif, K., & International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. (2012). Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *The Lancet. Oncology*, *13*(7), 663–664. https://doi.org/10.1016/s1470-2045(12)70280-2

Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., … Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(11), 5380–5552. https://doi.org/10.1002/jgrd.50171

California Air Resources Board. (2020). *Overview: Diesel Exhaust & Health*. https://ww2.arb.ca.gov/resources/overview-diesel-exhaust-and-health

de Foy, B., Krotkov, N. A., Bei, N., Herndon, S. C., Huey, L. G., Martínez, A.-P., Ruiz-Suárez, L. G., Wood, E. C., Zavala, M., & Molina, L. T. (2009). Hit from both sides: Tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO_2 retrievals during the MILAGRO field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *9*(24), 9599–9617. https://doi.org/10.5194/acp-9-9599-2009

de Foy, B., Lei, W., Zavala, M., Volkamer, R., Samuelsson, J., Mellqvist, J., Galle, B., Martínez, A.-P., Grutter, M., Retama, A., & Molina, L. T. (2007). Modelling constraints on the emission inventory and on vertical dispersion for CO and SO_2 in the Mexico City Metropolitan Area using Solar FTIR and zenith sky UV spectroscopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *7*(3), 781–801. https://doi.org/10.5194/acp-7-781-2007

García-Escalante, J. S., García-Reynoso, J. A., Jazcilevich-Diamant, A., & Ruiz-Suárez, L. G. (2014). The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmósfera*, *27*(2), Article 2. https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/45531

Hill, B. (2009). *The Carbon Dioxide-Equivalent Benefits of Reducing Black Carbon Emissions from U.S. Class 8 Trucks Using Diesel Particulate Filters: A Preliminary Analysis* (p. 31). Clean Air Task Force.

Jaimes, M. (2017). *Diseño del monitoreo de compuestos precursores de ozono en la atmósfera de la ciudad de méxico y su área metropolitana* [Universidad Nacional Autónoma de México]. http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12375/tesis.pdf?sequence=1

Khokhar, M., Frankenberg, C., Van Roozendael, M., Beirle, S., Kühl, S., Richter, A., Platt, U., & Wagner, T. (2005). Satellite observations of atmospheric SO2 from volcanic eruptions during the time-period of 1996–2002. *Advances in Space Research*, *36*, 879–887. https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.114

Loyola, D., van Geffen, J., Valks, P., Erbertseder, T., Van Roozendael, M., Thomas, W., Zimmer, W., & Wißkirchen, K. (2008). Satellite-based detection of volcanic sulphur dioxide from recent eruptions in Central and South America. *Advances in Geosciences*, *14*, 35–40. https://doi.org/10.5194/adgeo-14-35-2008

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., & Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. En Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

PEMEX. (2018). *Anuario Estadístico 2018*. https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/anuario-estadistico_2018.pdf

Robinson, D. L. (2017). Composition and oxidative potential of $PM_{2.5}$ pollution and health. *Journal of Thoracic Disease*, *9*(3), 444–447. https://doi.org/10.21037/jtd.2017.03.92

SEDEMA. (2021). *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Contaminantes criterio, tóxicos y compuestos de efecto invernadero*. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (datos preliminares).

SEMARNATH. (2016). *Inventario de Emisiones del Estado de Hidalgo. Año base 2016*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo.

SENER. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2018-2032*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf

Sosa, G., Vega, E., González-Avalos, E., Mora, V., & López-Veneroni, D. (2013). Air Pollutant Characterization in Tula Industrial Corridor, Central Mexico, during the MILAGRO Study. *BioMed Research International*, *2013*. https://doi.org/10.1155/2013/521728

West, J. J., Fiore, A. M., Horowitz, L. W., & Mauzerall, D. L. (2006). Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *103*(11), 3988. https://doi.org/10.1073/pnas.0600201103

Capítulo 6. Fuentes de información

Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. Egyptian Journal of Petroleum, 25(1), 107–123. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011

Abelsohn, A., & Stieb, D. M. (2011). Health effects of outdoor air pollution. *Canadian Family Physician*, *57*(8), 881–887.

Alver, K., Meyer, H. E., Falch, J. A., Nafstad, P., & Søgaard, A. J. (2007). Outdoor air pollution and bone mineral density in elderly men—The Oslo Health Study. *Osteoporosis International: A Journal Established as Result of Cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, *18*(12), 1669–1674. https://doi.org/10.1007/s00198-007-0424-y

Alver, K., Meyer, H. E., Falch, J. A., & Søgaard, A. J. (2010). Outdoor air pollution, bone density and self-reported forearm fracture: The Oslo Health Study. *Osteoporosis International: A Journal Established as Result of Cooperation between the European Foundation for Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, *21*(10), 1751–1760. https://doi.org/10.1007/s00198-009-1130-8

Amador-Muñoz, O., Bazán-Torija, S., Villa-Ferreira, S. A., Villalobos-Pietrini, R., Bravo-Cabrera, J. L., Munive-Colín, Z., Hernández-Mena, L., Saldarriaga-Noreña, H., & Murillo-Tovar, M. A. (2013). Opposing seasonal trends for polycyclic aromatic hydrocarbons and PM_{10}: Health risk and sources in southwest Mexico City. *Atmospheric Research*, *122*, 199–212. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.003

Amador-Muñoz, O., Villalobos-Pietrini, R., Agapito-Nadales, Ma. C., Munive-Colín, Z., Hernández-Mena, L., Sánchez-Sandoval, M., Gómez-Arroyo, S., Bravo-Cabrera, J. L., & Guzmán-Rincón, J. (2010). Solvent extracted organic matter and polycyclic aromatic hydrocarbons distributed in size-segregated airborne particles in a zone of México City: Seasonal behavior and human exposure. *Atmospheric Environment*, *44*(1), 122–130. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.012

Anenberg, S. C., Horowitz, L. W., Tong, D. Q., & West, J. J. (2010). An Estimate of the Global Burden of Anthropogenic Ozone and Fine Particulate Matter on Premature Human Mortality Using Atmospheric Modeling. *Environmental Health Perspectives*, *118*(9), 1189–1195. https://doi.org/10.1289/ehp.0901220

ATSDR. (2004). *Interaction Profile for: Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX)*. https://www.atsdr.cdc.gov/interactionprofiles/IP-btex/ip05.pdf

ATSDR. (2012). *Resumen de salud pública: Monóxido de carbono*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs201.pdf

ATSDR. (2016). *ToxFAQS | Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.) (Nitrogen Oxides)*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html

Baldacci, S., Maio, S., Cerrai, S., Sarno, G., Baïz, N., Simoni, M., Annesi-Maesano, I., & Viegi, G. (2015). Allergy and asthma: Effects of the exposure to particulate matter and biological allergens. *Respiratory Medicine*, *109*(9), 1089–1104. https://doi.org/10.1016/j.rmed.2015.05.017

Bell, M. L., Davis, D., Cifuentes, L., Cohen, A., Gouveia, N., Grant, L., Green, C., Johnson, T., Rogat, J., Spengler, J., & Thurston, G. (2002). International expert workshop on the analysis of the economic and public health impacts of air pollution: Workshop summary. *Environmental Health Perspectives*, *110*(11), 1163–1168.

Benbrahim-Tallaa, L., Baan, R. A., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Guha, N., Loomis, D., Straif, K., & International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. (2012). Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *The Lancet. Oncology*, *13*(7), 663–664. https://doi.org/10.1016/s1470-2045(12)70280-2

Bhaskaran, K., Gasparrini, A., Hajat, S., Smeeth, L., & Armstrong, B. (2013). Time series regression studies in environmental epidemiology. *International Journal of Epidemiology*, *42*(4), 1187–1195. https://doi.org/10.1093/ije/dyt092

Bolden, A. L., Kwiatkowski, C. F., & Colborn, T. (2015). New Look at BTEX: Are Ambient Levels a Problem? *Environmental Science & Technology*, *49*(9), 5261–5276. https://doi.org/10.1021/es505316f

Bordonada, M. Á. R., & Moreno, J. D. (2009). *Método epidemiológico* (p. 219). Instituto de Salud Carlos III. https://www.isciii.es/QuienesSomos/CentrosPropios/ENS/Documents/2009-0843_Manual_epidemiologico_ultimo_23-01-10.pdf

Borja-Aburto, V., Rosales-Castillo, J. A., Torres-Meza, V. M., Corey, G., & Olaíz-Fernández, G. (2000). Evaluation of Health Effects of Pollution. En OCDE, *Ancillary Benefits and Costs of Greenhouse Gas Mitigation* (pp. 275–342). Organization for Economic Cooperation and Development. http://eurequa.univ-paris1.fr/membres/vergnaud/AncillaryBenefitsOCDE2000.pdf

Bose, S., & Diette, G. B. (2016). Health Disparities Related to Environmental Air Quality. En L. B. Gerald & C. E. Berry (Eds.), *Health Disparities in Respiratory Medicine* (pp. 41–58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23675-9_3

Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., … Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(38), 9592. https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115

Burnett, R., & Cohen, A. (2020). Relative Risk Functions for Estimating Excess Mortality Attributable to Outdoor $PM_{2.5}$ Air Pollution: Evolution and State-of-the-Art. *Atmosphere*, *11*(6), 589. https://doi.org/10.3390/atmos11060589

Burnett, R., Pope, C., Ezzati, M., Olives, C., Lim, S., Mehta, S., Shin, H., Singh, G., Hubbell, B., Brauer, M., Anderson, H., Smith, K., Balmes, J., Bruce, N., Kan, H., Laden, F., Prüss-Ustün, A., Turner, M., Gapstur, S., & Cohen, A. (2014). An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure. *Environmental health perspectives*, *122*. https://doi.org/10.1289/ehp.1307049

Calderón-Garcidueñas, L., Mora-Tiscareño, A., Ontiveros, E., Gómez-Garza, G., Barragán-Mejía, G., Broadway, J., Chapman, S., Valencia-Salazar, G., Jewells, V., Maronpot, R. R., Henríquez-Roldán, C., Pérez-Guillé, B., Torres-Jardón, R., Herrit, L., Brooks, D., Osnaya-Brizuela, N., Monroy, M. E., González-Maciel, A., Reynoso-Robles, R., … Engle, R. W. (2008). Air pollution, cognitive deficits and brain abnormalities: A pilot study with children and dogs. *Brain and Cognition*, *68*(2), 117–127. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.04.008

California Air Resources Board. (2020). *Overview: Diesel Exhaust & Health*. https://ww2.arb.ca.gov/resources/overview-diesel-exhaust-and-health

Carlsten, C., Dybuncio, A., Becker, A., Chan-Yeung, M., & Brauer, M. (2011). Traffic-related air pollution and incident asthma in a high-risk birth cohort. *Occupational and Environmental Medicine*, *68*(4), 291–295. https://doi.org/10.1136/oem.2010.055152

Cepeda, M., Schoufour, J., Freak-Poli, R., Koolhaas, C. M., Dhana, K., Bramer, W. M., & Franco, O. H. (2017). Levels of ambient air pollution according to mode of transport: A systematic review. *The Lancet Public Health*, *2*(1), e23–e34. https://doi.org/10.1016/S2468-2667(16)30021-4

Cerón Bretón, J. G., Cerón Bretón, R. M., Martínez Morales, S., Kahl, J. D. W., Guarnaccia, C., Lara Severino, R. del C., Rangel Marrón, M., Ramírez Lara, E., Espinosa Fuentes, M. de la L., Uc Chi, M. P., & Sánchez, G. L. (2020). Health Risk Assessment of the Levels of BTEX in Ambient Air of One Urban Site Located in Leon, Guanajuato, Mexico during Two Climatic Seasons. *Atmosphere*, *11*(2), 165. https://doi.org/10.3390/atmos11020165

Chakraborti, L., Heres, D., & Hernandez, D. (2019). Are land values related to ambient air pollution levels? Hedonic evidence from Mexico City. *Environment and Development Economics*, *24*(3), 252–270. Cambridge Core. https://doi.org/10.1017/S1355770X18000542

Chau, T.-T., & Wang, K.-Y. (2020). An association between air pollution and daily most frequently visits of eighteen outpatient diseases in an industrial city. *Scientific Reports*, *10*(1), 2321. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58721-0

Chen, B., & Kan, H. (2008). Air pollution and population health: A global challenge. *Environmental Health and Preventive Medicine*, *13*(2), 94–101. https://doi.org/10.1007/s12199-007-0018-5

Chen, J., & Hoek, G. (2020). Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 105974. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974

Clougherty, J. E. (2010). A Growing Role for Gender Analysis in Air Pollution Epidemiology. *Environmental Health Perspectives*, *118*(2), 167–176. https://doi.org/10.1289/ehp.0900994

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., … Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, *389*(10082), 1907–1918. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6

Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal. (2008). *Informe especial sobre el derecho humano a un medio ambiente sano y la calidad del aire en la ciudad de México*.

CONACYT. (s/f). *Daños a la salud y al medio ambiente producidos por la exposición a gasolina*. Recuperado el 30 de junio de 2020, de https://www.conacyt.gob.mx/index.php/comunicacion/comunicados-prensa/937-danos-a-la-salud-y-al-medio-ambiente-producidos-por-la-exposicion-a-gasolina

CONEVAL. (2015). Índice de Rezago Social. https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Indice_Rezago_Social_2015.aspx

CONEVAL. (2017). *Pobreza Urbana en México, 2015*. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/POBREZA-URBANA-EN-MEXICO-2015.aspx

Cortez-Lugo, M., Escamilla-Núñez, C., Barraza-Villarreal, A., Texcalac-Sangrador, J. L., Chow, J., Watson, J., Hernández-Cadena, L., & Romieu, I. (2013). Association between light absorption measurements of PM2.5 and distance from heavy traffic roads in the Mexico City metropolitan area. *Salud Pública de México*, *55*(2), 155–161.

Croft, D. P., Zhang, W., Lin, S., Thurston, S. W., Hopke, P. K., Masiol, M., Squizzato, S., van Wijngaarden, E., Utell, M. J., & Rich, D. Q. (2018). The Association between Respiratory Infection and Air Pollution in the Setting of Air Quality Policy and Economic Change. *Annals of the American Thoracic Society*, *16*(3), 321–330. https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201810-691OC

Daigle, C. C., Chalupa, D. C., Gibb, F. R., Morrow, P. E., Oberdörster, G., Utell, M. J., & Frampton, M. W. (2003). Ultrafine Particle Deposition in Humans During Rest and Exercise. *Inhalation Toxicology*, *15*(6), 539–552. https://doi.org/10.1080/08958370304468

de Lima, M. (2020). The value of a statistical life in Mexico. *Journal of Environmental Economics and Policy*, *9*(2), 140–166. https://doi.org/10.1080/21606544.2019.1617196

Deguen, S., & Zmirou-Navier, D. (2010). Social inequalities resulting from health risks related to ambient air quality—A European review. *European Journal of Public Health*, *20*(1), 27–35. https://doi.org/10.1093/eurpub/ckp220

Department for Environment Food and Rural Affairs. (2015). *UK and EU Air Quality Limits- Defra, UK*. https://uk-air.defra.gov.uk/air-pollution/uk-eu-limits

Dirección General de Epidemiología de la Secretaría de Salud. (2018). *Anuario de Morbilidad 1984-2018*. https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/anuarios-de-morbilidad-1984-2018

NOM-022-SSA1-2019, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO_2). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud, (2019) (testimony of DOF).

Dons, E., Temmerman, P., Van Poppel, M., Bellemans, T., Wets, G., & Int Panis, L. (2013). Street characteristics and traffic factors determining road users' exposure to black carbon. *Science of The Total Environment*, *447*, 72–79. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.076

Elder, A., Gelein, R., Silva, V., Feikert, T., Opanashuk, L., Carter, J., Potter, R., Maynard, A., Ito, Y., Finkelstein, J., & Oberdörster, G. (2006). Translocation of Inhaled Ultrafine Manganese Oxide Particles to the Central Nervous System. *Environmental Health Perspectives*, *114*(8), 1172–1178. https://doi.org/10.1289/ehp.9030

Escamilla-Nuñez, M. C., Barraza-Villarreal, A., Hernandez-Cadena, L., Moreno-Macias, H., Ramirez-Aguilar, M., Sienra-Monge, J.-J., Cortez-Lugo, M., Texcalac, J.-L., del Rio-Navarro, B., & Romieu, I. (2008). Traffic-related air pollution and respiratory symptoms among asthmatic children, resident in Mexico City: The EVA cohort study. *Respiratory Research*, *9*(1), 74. https://doi.org/10.1186/1465-9921-9-74

European Commission. (2019). *Air Quality Standards*. https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm

Eze, I. C., Hemkens, L. G., Bucher, H. C., Hoffmann, B., Schindler, C., Künzli, N., Schikowski, T., & Probst-Hensch, N. M. (2015). Association between Ambient Air Pollution and Diabetes Mellitus in Europe and North America: Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives*, *123*(5), 381–389.

Félix-Arellano, E. E., Schilmann, A., Hurtado-Díaz, M., Texcalac-Sangrador, J. L., & Riojas-Rodríguez, H. (2020). Revisión rápida: Contaminación del aire y morbimortalidad por Covid-19. *Salud Pública de México; Primero en línea (Online first)*. https://doi.org/10.21149/11481

Fleischer, N., Merialdi, M., van Donkelaar, A., Vadillo-Ortega, F., Martin, R., Betran, A. P., & Souza, J. P. (2014). Outdoor Air Pollution, Preterm Birth, and Low Birth Weight: Analysis of the World Health Organization Global Survey on Maternal and Perinatal Health. *Environmental Health Perspectives*, *122*(4), 425–430. https://doi.org/10.1289/ehp.1306837

Garcia-Menendez, F., Saari, R. K., Monier, E., & Selin, N. E. (2015). U.S. Air Quality and Health Benefits from Avoided Climate Change under Greenhouse Gas Mitigation. *Environmental Science & Technology*, *49*(13), 7580–7588. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01324

Gauderman, W. J., Avol, E., Gilliland, F., Vora, H., Thomas, D., Berhane, K., McConnell, R., Kuenzli, N., Lurmann, F., Rappaport, E., Margolis, H., Bates, D., & Peters, J. (2004). The Effect of Air Pollution on Lung Development from 10 to 18 Years of Age. *New England Journal of Medicine*, *351*(11), 1057–1067. https://doi.org/10.1056/NEJMoa040610

Gauderman, W. J., Urman, R., Avol, E., Berhane, K., McConnell, R., Rappaport, E., Chang, R., Lurmann, F., & Gilliland, F. (2015). Association of Improved Air Quality with Lung Development in Children. *New England Journal of Medicine*, *372*(10), 905–913. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1414123

Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., & Balali-Mood, M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *Journal of Research in Medical Sciences : The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences*, *21*. https://doi.org/10.4103/1735-1995.189646

Gobierno de Ontario. (2016). *Ontario's Ambient Air Quality Criteria*. Government of Ontario. https://www.ontario.ca/page/ontarios-ambient-air-quality-criteria-sorted-contaminant-name

Gordon, S. B., Bruce, N. G., Grigg, J., Hibberd, P. L., Kurmi, O. P., Lam, K. H., Mortimer, K., Asante, K. P., Balakrishnan, K., Balmes, J., Bar-Zeev, N., Bates, M. N., Breysse, P. N., Buist, S., Chen, Z., Havens, D., Jack, D., Jindal, S., Kan, H., … Martin, W. J. (2014). Respiratory risks from household air pollution in low and middle income countries. *The Lancet Respiratory Medicine*, *2*(10), 823–860. https://doi.org/10.1016/S2213-2600(14)70168-7

Gutiérrez-Avila, I., Rojas-Bracho, L., Riojas-Rodríguez, H., Kloog, I., Just, A. C., & Rothenberg, S. J. (2018). Cardiovascular and cerebrovascular mortality associated with acute exposure to PM2.5 in Mexico City. *Stroke*, *49*(7), 1734–1736. https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.021034

Hallal, P. C., Andersen, L. B., Bull, F. C., Guthold, R., Haskell, W., & Ekelund, U. (2012). Global physical activity levels: Surveillance progress, pitfalls, and prospects. *The Lancet*, *380*(9838), 247–257. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60646-1

Harvard Medical School. (2019). *Carbon Monoxide Poisoning*. Harvard Health Publishing. https://www.health.harvard.edu/a_to_z/carbon-monoxide-poisoning-a-to-z

Harvard T.H. Chan School of Public Health, & SEDEMA. (2018). *Análisis histórico de los beneficios en la salud de la población, asociados a la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015*. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Harvard T.H. Chan School of Public Health. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/beneficios-en-salud-por-la-mejora-de-la-calidad-del-aire/

Hazilla, M., & Kopp, R. J. (1990). Social Cost of Environmental Quality Regulations: A General Equilibrium Analysis. *Journal of Political Economy*, *98*(4), 853–873. JSTOR.

Health Effects Institute. (2010). *Traffic-Related Air Pollution: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects. A Special Report of the HEI Panel on the Health Effects of Traffic-Related Air Pollution*. healtheffects.org/system/files/SR17TrafficReview_Exec_Summary.pdf

Health Effects Institute. (2013). *Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles*.

Health Effects Institute. (2019). *State of Global Air 2019. Special Report*. Health Effects Institute. https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf

Heinrich, J., Thiering, E., Rzehak, P., Krämer, U., Hochadel, M., Rauchfuss, K. M., Gehring, U., & Wichmann, H.-E. (2013). Long-term exposure to NO2 and PM10 and all-cause and cause-specific mortality in a prospective cohort of women. *Occupational and Environmental Medicine*, *70*(3), 179. https://doi.org/10.1136/oemed-2012-100876

Hernández-Paniagua, I. Y., Andraca-Ayala, G. L., Diego-Ayala, U., Ruiz-Suarez, L. G., Zavala-Reyes, J. C., Cid-Juárez, S., Torre-Bouscoulet, L., Gochicoa-Rangel, L., Rosas-Pérez, I., & Jazcilevich, A. (2018). Personal Exposure to PM2.5 in the Megacity of Mexico: A Multi-Mode Transport Study. *Atmosphere*, *9*(2), 57. https://doi.org/10.3390/atmos9020057

Hodges, E., & Tomcej, V. (2016). Is there a link between pollutant exposure and emerging infectious disease? *The Canadian Veterinary Journal*, *57*(5), 535–537.

Hoek, G., Krishnan, R. M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., & Kaufman, J. D. (2013). Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: A review. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, *12*(1), 43. https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-43

Hoek, G., & Raaschou-Nielsen, O. (2014). Impact of fine particles in ambient air on lung cancer. *Chinese Journal of Cancer*, *33*(4), 197–203. https://doi.org/10.5732/cjc.014.10039

Honda, T., Pun, V. C., Manjourides, J., & Suh, H. (2017). Associations between long-term exposure to air pollution, glycosylated hemoglobin and diabetes. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, *220*(7), 1124–1132. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.06.004

Hong, C., Zhang, Q., Zhang, Y., Davis, S. J., Tong, D., Zheng, Y., Liu, Z., Guan, D., He, K., & Schellnhuber, H. J. (2019). Impacts of climate change on future air quality and human health in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*(35), 17193–17200. https://doi.org/10.1073/pnas.1812881116

Huang, C., Nichols, C., Liu, Y., Zhang, Y., Liu, X., Gao, S., Li, Z., & Ren, A. (2015). Ambient air pollution and adverse birth outcomes: A natural experiment study. *Population Health Metrics*, *13*. https://doi.org/10.1186/s12963-015-0050-4

Hystad, P., Larkin, A., Rangarajan, S., AlHabib, K. F., Avezum, Á., Calik, K. B. T., Chifamba, J., Dans, A., Diaz, R., du Plessis, J. L., Gupta, R., Iqbal, R., Khatib, R., Kelishadi, R., Lanas, F., Liu, Z., Lopez-Jaramillo, P., Nair, S., Poirier, P., … Brauer, M. (2020). Associations of outdoor fine particulate air pollution and cardiovascular disease in 157 436 individuals from 21 high-income, middle-income, and low-income countries (PURE): A prospective cohort study. *The Lancet Planetary Health*, *4*(6), e235–e245. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30103-0

INECC. (2014). *Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM2.5 en tres zonas metropolitanas mexicanas*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/224/712_2014_Valoracion_economica_beneficios_salud.pdf?sequence=1&isAllowed=y

INECC, & LSE. (2015). *The value of statistical life in Mexico: A contingent valuation study*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. London School of Economics and Political Science. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191446/Disponibilidad_a_pagar_por_reducir_riesgo_de_muerte.pdf

INEGI. (2013). *Censo de Población y Vivienda 2010*. INEGI; INEGI. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Tabulados

INEGI. (2018). *Defunciones registradas (mortalidad general)*. https://www.inegi.org.mx/programas/mortalidad/default.html#Datos_abiertos

INE-SEMARNAT. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de $PM_{2.5}$* (G. Mejía Velázquez & V. H. Páramos Figueroa, Eds.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

INSP, & INECC. (2017). *Estimación de impactos en salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de control*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/52/738_2017_Estimacion_impactos_contaminacion_atmosferica_centropais.pdf?sequence=1&isAllowed=y

INSP, & SEDEMA. (2020). *Estimación de impactos en salud y económicos por contaminación atmosférica y estimación de beneficios por mejoras en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México*.

Institute for Health Metrics and Evaluation. (2018a). *Global Burden of Disease (GBD)*. http://www.healthdata.org/gbd

Institute for Health Metrics and Evaluation. (2018b). *Global Burden of Disease Study 2017 (GBD 2017) Causes of Death and Nonfatal Causes Mapped to ICD Codes. Version: 14/09/17*. http://ghdx.healthdata.org/record/ihme-data/gbd-2017-cause-icd-code-mappings

Jerrett, M., Burnett, R. T., Pope, C. A., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., Shi, Y., Calle, E., & Thun, M. (2009). Long-Term Ozone Exposure and Mortality. *New England Journal of Medicine*, *360*(11), 1085–1095. https://doi.org/10.1056/NEJMoa0803894

Jerrett, M., McConnell, R., Wolch, J., Chang, R., Lam, C., Dunton, G., Gilliland, F., Lurmann, F., Islam, T., & Berhane, K. (2014). Traffic-related air pollution and obesity formation in children: A longitudinal, multilevel analysis. *Environmental Health*, *13*, 49. https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-49

Knibbs, L. D., Cole-Hunter, T., & Morawska, L. (2011). A review of commuter exposure to ultrafine particles and its health effects. *Atmospheric Environment*, *45*(16), 2611–2622. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.065

Kochi, I., Hubbell, B., & Kramer, R. (2006). An Empirical Bayes Approach to Combining and Comparing Estimates of the Value of a Statistical Life for Environmental Policy Analysis. *Environmental & Resource Economics*, *34*(3), 385–406. https://doi.org/10.1007/s10640-006-9000-8

Koman, P. D., Hogan, K. A., Sampson, N., Mandell, R., Coombe, C. M., Tetteh, M. M., Hill-Ashford, Y. R., Wilkins, D., Zlatnik, M. G., Loch-Caruso, R., Schulz, A. J., & Woodruff, T. J. (2018). Examining Joint Effects of Air Pollution Exposure and Social Determinants of Health in Defining "At-Risk" Populations Under the Clean Air Act: Susceptibility of Pregnant Women to Hypertensive Disorders of Pregnancy. *World medical & health policy*, *10*(1), 7–54. https://doi.org/10.1002/wmh3.257

Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Horak, F., Puybonnieux-Texier, V., Quénel, P., Schneider, J., Seethaler, R., Vergnaud, J.-C., & Sommer, H. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: A European assessment. *The Lancet*, *356*(9232), 795–801. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02653-2

Laeremans, M., Dons, E., Avila-Palencia, I., Carrasco-Turigas, G., Orjuela, J. P., Anaya, E., Cole-Hunter, T., de Nazelle, A., Nieuwenhuijsen, M., Standaert, A., Van Poppel, M., De Boever, P., & Int Panis, L. (2018). Short-term effects of physical activity, air pollution and their interaction on the cardiovascular and respiratory system. *Environment International*, *117*, 82–90. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.040

Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., & Schwartz, J. (2012). Chronic exposure to fine particles and mortality: An extended follow-up of the Harvard Six Cities study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, *120*(7), 965–970. https://doi.org/10.1289/ehp.1104660

Lerner, R. A., & Eschenmoser, A. (2003). Ozone in biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *100*(6), 3013–3015. https://doi.org/10.1073/pnas.0730791100

Li, N., Georas, S., Alexis, N., Fritz, P., Xia, T., Williams, M. A., Horner, E., & Nel, A. (2016). A work group report on ultrafine particles (American Academy of Allergy, Asthma & Immunology): Why ambient ultrafine and engineered nanoparticles should receive special attention for possible adverse health outcomes in human subjects. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *138*(2), 386–396. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2016.02.023

Link, B. G., & Phelan, J. C. (1996). Understanding sociodemographic differences in health—The role of fundamental social causes. *American Journal of Public Health*, *86*(4), 471–473.

Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Matus, P., Valdes Ortega, N., Osorio Garcia, S., Pascal, M., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Hurtado-Díaz, M., Cruz, J., … Kan, H. (2019). Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. *New England Journal of Medicine*, *381*(8), 705–715. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364

Loomis, D., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., Ghissassi, F. E., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Baan, R., Mattock, H., & Straif, K. (2013). The carcinogenicity of outdoor air pollution. *The Lancet Oncology*, *14*(13), 1262–1263. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(13)70487-X

Makri, A., & Stilianakis, N. I. (2008). Vulnerability to air pollution health effects. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, *211*(3), 326–336. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.06.005

Marín Martínez, F., Sánchez Meca, J., & López López, J. A. (2009). El metaanálisis en el ámbito de las Ciencias de la Salud: Una metodología imprescindible para la eficiente acumulación del conocimiento. *Fisioterapia*, *31*(3), 107–114. https://doi.org/10.1016/j.ft.2009.02.002

McConnell, R., Islam, T., Shankardass, K., Michael, J., Lurmann, F., Gilliland, F., Gauderman, J., Avol, E., Künzli, N., Yao, L., Peters, J., & Berhane, K. (2010). Childhood Incident Asthma and Traffic-Related Air Pollution at Home and School. *Environmental Health Perspectives*, *118*(7), 1021–1026. https://doi.org/10.1289/ehp.0901232

Moreno, T., Reche, C., Rivas, I., Cruz Minguillón, M., Martins, V., Vargas, C., Buonanno, G., Parga, J., Pandolfi, M., Brines, M., Ealo, M., Sofia Fonseca, A., Amato, F., Sosa, G., Capdevila, M., de Miguel, E., Querol, X., & Gibbons, W. (2015). Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. *Environmental Research*, *142*, 495–510. https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.07.022

National Research Council (US) Committee on Toxicology. (1984). *Emergency and Continuous Exposure Limits for Selected Airborne Contaminants: Volume 2. SULFUR DIOXIDE*. National Academies Press (US). https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK208295/

Nemet, G. F., Holloway, T., & Meier, P. (2010). Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking. *Environmental Research Letters*, *5*(1), 014007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014007

Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Urban and transport planning, environmental exposures and health-new concepts, methods and tools to improve health in cities. *Environmental Health*, *15*(1), S38. https://doi.org/10.1186/s12940-016-0108-1

OCDE. (2011). *Valuing Mortality Risk Reductions in Regulatory Analysis of Environmental, Health and Transport Policies: Policy Implications*. Organization for Economic Cooperation and Development. https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/48279549.pdf

OCDE. (2012). *Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies*. https://doi.org/10.1787/9789264130807-en

OMS. (1999). *Environmental Health Criteria 213. Carbon Monoxide (second edition)*.

OMS. (2000). *WHO air quality guidelines for Europe* (2a ed.). World Health Organization.https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/who-air-quality-guidelines-for-europe,-2nd-edition,-2000-cd-rom-version

OMS. (2004). *Health aspects of air pollution: Results from the WHO project "Systematic review of health aspects of air pollution in Europe"* (EUR/04/5046026). World Health Organization. https://apps.who.int/iris/handle/10665/107571

OMS. (2006a). *Fuel for life: Household energy and health*. World Health Organization. https://www.who.int/indoorair/publications/fuelforlife/en/

OMS. (2006b). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*. Organización Mundial de la Salud.

OMS. (2013). *Health Effects of Particulate Matter*. World Health Organization. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf?ua=1

OMS. (2015). *WHO Expert Consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs)* (p. 50). World Health Organization. https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/update-of-who-global-air-quality-guidelines

OMS. (2016a). *Burning Opportunity: Clean Household Energy for Health, Sustainable Development, and Wellbeing of Women and Children*. http://www.who.int/airpollution/publications/burning-opportunities/en/

OMS. (2016b). *Health risk assessment of air pollution*. Organización Mundial de la Salud. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/298482/Health-risk-assessment-air-pollution-General-principles-en.pdf?ua=1

OMS. (2018a). *AirQ+ Glossary. October 2018 version. Available when downloading the AirQ+ software*. Organización Mundial de la Salud. https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/airq-software-tool-for-health-risk-assessment-of-air-pollution

OMS. (2018b). *AirQ+ Mortality Data. Available when downloading the AirQ+ software*. Organización Mundial de la Salud. https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/activities/airq-software-tool-for-health-risk-assessment-of-air-pollution

OMS. (2018c). *Breathe clean air: Everywhere, for everyone. Protecting workers from air pollution outdoors and indoors*. First WHO Global Conference on Air Pollution and Health: Improving air quality, combatting climate change – saving lives, Ginebra, Suiza. https://www.who.int/airpollution/events/conference/05_Protecting_workers_from_air_pollution_outdoors_and_indoors.pdf?ua=1

OMS. (2018d). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

OMS. (2020). *Ambient air pollution: Pollutants*. World Health Organization. http://www.who.int/airpollution/ambient/pollutants/en/

OMS, & OCDE. (2015). *Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth* (p. 66). World Health Organization Regional Office for Europe, Organization for Economic Cooperation and Development. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/276772/Economic-cost-health-impact-air-pollution-en.pdf

Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$), nitrogen dioxide (NO_2), and ozone (O_3) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, *142*, 105876. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876

Organización Panamericana de la Salud. (2016). *Determinantes ambientales y sociales de la salud* (L. A. Galvao, J. Finkelman, & S. Henao, Eds.). McGraw-Hill. https://iris.paho.org/handle/10665.2/51688

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*, *287*(9), 1132–1141. https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., & Godleski, J. J. (2004). Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution. *Circulation*, *109*(1), 71–77. https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F

Pope, C. A., Coleman, N., Pond, Z. A., & Burnett, R. T. (2020). Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies. *Environmental Research*, *183*, 108924. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108924

Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *56*(6), 709–742. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485

Pope, C. A., Lefler, J. S., Ezzati, M., Higbee, J. D., Marshall, J. D., Kim, S.-Y., Bechle, M., Gilliat, K. S., Vernon, S. E., Robinson, A. L., & Burnett, R. T. (2019). Mortality Risk and Fine Particulate Air Pollution in a Large, Representative Cohort of U.S. Adults. *Environmental Health Perspectives*, *127*(7). https://doi.org/10.1289/EHP4438

Raaschou-Nielsen, O., Andersen, Z. J., Samoli, E., Stafoggia, M., Weinmayr, G., Hoffmann, B., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M. J., Brunekreef, B., Xun, W. W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Sommar, J., Forsberg, B., Modig, L., Oudin, A., Oftedal, B., Schwarze, P. E., Nafstad, P., … Hoek, G. (2013). Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: Prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *The Lancet Oncology*, *14*(9), 813–822. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(13)70279-1

Raaschou-Nielsen, O., Sørensen, M., Ketzel, M., Hertel, O., Loft, S., Tjønneland, A., Overvad, K., & Andersen, Z. J. (2013). Long-term exposure to traffic-related air pollution and diabetes-associated mortality: A cohort study. *Diabetologia*, *56*(1), 36–46. https://doi.org/10.1007/s00125-012-2698-7

Ragettli, M. S., Corradi, E., Braun-Fahrländer, C., Schindler, C., de Nazelle, A., Jerrett, M., Ducret-Stich, R. E., Künzli, N., & Phuleria, H. C. (2013). Commuter exposure to ultrafine particles in different urban locations, transportation modes and routes. *Atmospheric Environment*, *77*, 376–384. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.003

Robinson, D. L. (2017). Composition and oxidative potential of $PM_{2.5}$ pollution and health. *Journal of Thoracic Disease*, *9*(3), 444–447. https://doi.org/10.21037/jtd.2017.03.92

Romero-Lankao, P., Qin, H., & Borbor-Cordova, M. (2013). Exploration of health risks related to air pollution and temperature in three Latin American cities. *Social Science & Medicine*, *83*, 110–118. https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2013.01.009

Romieu, I., Gouveia, N., & Cifuentes, L. (2012). Estudio de Salud y Contaminación del Aire en Latinoamérica (Estudio ESCALA). *Health Effects Institute*, *171*, 4.

Schraufnagel, D. E. (2020). The health effects of ultrafine particles. *Experimental & Molecular Medicine*, *52*(3), 311–317. https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3

Schraufnagel, D. E., Balmes, J. R., Cowl, C. T., De Matteis, S., Jung, S.-H., Mortimer, K., Perez-Padilla, R., Rice, M. B., Riojas-Rodriguez, H., Sood, A., Thurston, G. D., To, T., Vanker, A., & Wuebbles, D. J. (2019a). Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution. *Chest*, *155*(2), 409–416. https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.042

Schraufnagel, D. E., Balmes, J. R., Cowl, C. T., De Matteis, S., Jung, S.-H., Mortimer, K., Perez-Padilla, R., Rice, M. B., Riojas-Rodriguez, H., Sood, A., Thurston, G. D., To, T., Vanker, A., & Wuebbles, D. J. (2019b). Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 2: Air Pollution and Organ Systems. *Chest*, *155*(2), 417–426. PubMed. https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.041

SEDEMA. (2018). *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones. www.sedema.cdmx.gob.mx

Setti, L., Passarini, F., Gennaro, G. D., Baribieri, P., Perrone, M. G., Borelli, M., Palmisani, J., Gilio, A. D., Torboli, V., Pallavicini, A., Ruscio, M., Piscitelli, P., & Miani, A. (2020). SARS-Cov-2 RNA Found on Particulate Matter of Bergamo in Northern Italy: First Preliminary Evidence. *MedRxiv*, 2020.04.15.20065995. https://doi.org/10.1101/2020.04.15.20065995

Sharman, J. E., Cockcroft, J. R., & Coombes, J. S. (2004). Cardiovascular implications of exposure to traffic air pollution during exercise. *QJM: Monthly Journal of the Association of Physicians*, *97*(10), 637–643. https://doi.org/10.1093/qjmed/hch104

Shi, L., Liu, P., Wang, Y., Zanobetti, A., Kosheleva, A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. (2016). Chronic effects of temperature on mortality in the Southeastern USA using satellite-based exposure metrics. *Scientific Reports*, *6*(30161), Article 30161.

Shi, L., Liu, P., Zanobetti, A., & Schwartz, J. (2019). Climate Penalty: Climate-driven increases in ozone and $PM_{2.5}$ levels and mortality. *Environmental Epidemiology*.

Simoni, M., Baldacci, S., Maio, S., Cerrai, S., Sarno, G., & Viegi, G. (2015). Adverse effects of outdoor pollution in the elderly. *Journal of Thoracic Disease*, *7*(1), 34–45. https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2014.12.10

SMAGEM. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México. ProAire 2018—2030*. http://proaire.edomex.gob.mx/proaire_edomex

Smith, K. R. (1993). Fuel Combustion, Air Pollution Exposure, and Health: The Situation in Developing Countries. *Annual Review of Energy and the Environment*, *18*(1), 529–566. https://doi.org/10.1146/annurev.eg.18.110193.002525

Somayaji, R., Neradilek, M. B., Szpiro, A. A., Lofy, K. H., Jackson, M. L., Goss, C. H., Duchin, J. S., Neuzil, K. M., & Ortiz, J. R. (2020). Effects of Air Pollution and Other Environmental Exposures on Estimates of Severe Influenza Illness. *Emerging Infectious Diseases*, *26*(5), 920–929. https://doi.org/10.3201/eid2605.190599

Sood, A., Petersen, H., Blanchette, C. M., Meek, P., Picchi, M. A., Belinsky, S. A., & Tesfaigzi, Y. (2010). Wood Smoke Exposure and Gene Promoter Methylation Are Associated with Increased Risk for COPD in Smokers. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *182*(9), 1098–1104. https://doi.org/10.1164/rccm.201002-0222OC

Tainio, M., de Nazelle, A. J., Götschi, T., Kahlmeier, S., Rojas-Rueda, D., Nieuwenhuijsen, M. J., de Sá, T. H., Kelly, P., & Woodcock, J. (2016). Can air pollution negate the health benefits of cycling and walking? *Preventive Medicine*, *87*, 233–236. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2016.02.002

Tamagawa, E., Bai, N., Morimoto, K., Gray, C., Mui, T., Yatera, K., Zhang, X., Xing, L., Li, Y., Laher, I., Sin, D. D., Man, S. F. P., & van Eeden, S. F. (2008). Particulate matter exposure induces persistent lung inflammation and endothelial dysfunction. *American Journal of Physiology. Lung Cellular and Molecular Physiology*, *295*(1), L79–L85. https://doi.org/10.1152/ajplung.00048.2007

Téllez-Rojo, M. M., Romieu, I., Polo-Peña, M., Ruiz-Velasco, S., Meneses-González, F., & Hernández-Avila, M. (1997). Efecto de la contaminación ambiental sobre las consultas por infecciones respiratorias en niños de la Ciudad de México. *Salud Pública de México*, *39*(6), 10.

Téllez-Rojo, M. M., Romieu, I., Ruiz-Velasco, S., Lezana, M.-A., & Hernández-Avila, M.-M. (2000). Daily respiratory mortality and PM_{10} pollution in Mexico City: Importance of considering place of death. *European Respiratory Journal*, *16*(3), 391. https://doi.org/10.1034/j.1399-3003.2000.016003391.x

Travaglio, M., Yu, Y., Popovic, R., Selley, L., Leal, N. S., & Martins, L. M. (2020). Links between air pollution and COVID-19 in England. *MedRxiv*, 2020.04.16.20067405. https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067405

Trejo-González, A., Riojas-Rodriguez, H., Texcalac Sangrador, J. L., Guerrero López, C. M., Cervantes-Martínez, K., Magali, H.-D., de la Sierra de la Vega, L., & Zuñiga-Bello, P. (2019). Quantifying health impacts and economic costs of PM2.5 exposure in Mexican cities of the National Urban System. *International Journal of Public Health*, *64*. https://doi.org/10.1007/s00038-019-01216-1

Turner, M. C., Jerrett, M., Pope, C. A., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Beckerman, B. S., Marshall, J. D., Su, J., Crouse, D. L., & Burnett, R. T. (2016). Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *193*(10), 1134–1142. https://doi.org/10.1164/rccm.201508-1633OC

UNAM. (2020). *Visualizador geográfico—ICOVID*. https://www.gits.igg.unam.mx/iCOVID-19/home

US EPA. (2016). *National Ambient Air Quality Standards*. https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table

US EPA. (2017). *Particle Pollution Exposure* [Collections and Lists]. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/pmcourse/particle-pollution-exposure

US EPA. (2018). *How BenMAP-CE Estimates the Health and Economic Effects of Air Pollution* [Overviews and Factsheets]. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/benmap/how-benmap-ce-estimates-health-and-economic-effects-air-pollution

US EPA. (2019a). *Health Effects of Ozone Pollution* [Overviews and Factsheets]. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution

US EPA. (2019b). *Policy Assessment for the Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, External Review Draft*. https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-09/documents/draft_policy_assessment_for_pm_naaqs_09-05-2019.pdf

US EPA. (2020a). *Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants*. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-ozone-and-related-photochemical-oxidants

US EPA. (2020b). *Integrated Sciences Assessments (ISAs)*. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/isa

Vecoli, C., Pulignani, S., & Andreassi, M. G. (2016). Genetic and Epigenetic Mechanisms Linking Air Pollution and Congenital Heart Disease. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, *3*(4). https://doi.org/10.3390/jcdd3040032

Velasco, E., Retama, A., Segovia, E., & Ramos, R. (2019). Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City. *Atmospheric Environment*, *219*, 117044. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117044

Verdin, A., Cazier, F., Fitoussi, R., Blanchet, N., Vié, K., Courcot, D., Momas, I., Seta, N., & Achard, S. (2019). An in vitro model to evaluate the impact of environmental fine particles (PM0.3-2.5) on skin damage. *Toxicology Letters*, *305*, 94–102. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2019.01.016

Vicedo-Cabrera, A. M., Sera, F., Liu, C., Armstrong, B., Milojevic, A., Guo, Y., Tong, S., Lavigne, E., Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Indermitte, E., Pascal, M., Huber, V., Schneider, A., Katsouyanni, K., Samoli, E., Stafoggia, M., Scortichini, M., … Gasparrini, A. (2020). Short term association between ozone and mortality: Global two stage time series study in 406 locations in 20 countries. *BMJ*, 10. https://doi.org/10.1136/bmj.m108

Vodonos, A., Awad, Y. A., & Schwartz, J. (2018). The concentration-response between long-term $PM_{2.5}$ exposure and mortality; A meta-regression approach. *Environmental Research*, *166*, 677–689. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.021

Wellenius, G. A., Boyle, L. D., Coull, B. A., Milberg, W. P., Gryparis, A., Schwartz, J., Mittleman, M. A., & Lipsitz, L. A. (2012). Residential Proximity to Major Roadway and Cognitive Function in Community-Dwelling Seniors: Results from the MOBILIZE Boston Study. *Journal of the American Geriatrics Society*, *60*(11), 2075–2080. https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2012.04195.x

West, J. J., Fiore, A. M., Horowitz, L. W., & Mauzerall, D. L. (2006). Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *103*(11), 3988. https://doi.org/10.1073/pnas.0600201103

West, J. J., Smith, S. J., Silva, R. A., Naik, V., Zhang, Y., Adelman, Z., Fry, M. M., Anenberg, S., Horowitz, L. W., & Lamarque, J.-F. (2013). Co-benefits of Global Greenhouse Gas Mitigation for Future Air Quality and Human Health. *Nature climate change*, *3*(10), 885–889. https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2009

Wong, C.-M., Ou, C.-Q., Thach, T.-Q., Chau, Y.-K., Chan, K.-P., Ho, S.-Y., Chung, R. Y., Lam, T.-H., & Hedley, A. J. (2007). Does regular exercise protect against air pollution-associated mortality? *Preventive Medicine*, *44*(5), 386–392. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2006.12.012

Woodruff, T. J., Darrow, L. A., & Parker, J. D. (2008). Air Pollution and Postneonatal Infant Mortality in the United States, 1999–2002. *Environmental Health Perspectives*, *116*(1).

Wu, X., Braun, D., Schwartz, J., Kioumourtzoglou, M. A., & Dominici, F. (2020). Evaluating the impact of long-term exposure to fine particulate matter on mortality among the elderly. *Science Advances*, eaba5692. https://doi.org/10.1126/sciadv.aba5692

Wu, X., Nethery, R., Benjamin, M., Braun, D., & Dominici, F. (2020). *Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study*.

Yang, F., Kaul, D., Wong, K. C., Westerdahl, D., Sun, L., Ho, K., Tian, L., Brimblecombe, P., & Ning, Z. (2015). Heterogeneity of passenger exposure to air pollutants in public transport microenvironments. *Atmospheric Environment*, *109*, 42–51. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.009

Yang, W.-S., Zhao, H., Wang, X., Deng, Q., Fan, W.-Y., & Wang, L. (2016). An evidence-based assessment for the association between long-term exposure to outdoor air pollution and the risk of lung cancer. *European Journal of Cancer Prevention*, *25*(3), 163–172. https://doi.org/10.1097/CEJ.0000000000000158

Yorifuji, T., Naruse, H., Kashima, S., Takao, S., Murakoshi, T., Doi, H., & Kawachi, I. (2013). Residential proximity to major roads and adverse birth outcomes: A hospital-based study. *Environmental Health*, *12*(1), 34. https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-34

Young, M. T., Sandler, D. P., DeRoo, L. A., Vedal, S., Kaufman, J. D., & London, S. J. (2014). Ambient Air Pollution Exposure and Incident Adult Asthma in a Nationwide Cohort of U.S. Women. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *190*(8), 914–921. https://doi.org/10.1164/rccm.201403-0525OC

Zu, K., Liu, X., Shi, L., Tao, G., Loftus, C. T., Lange, S., & Goodman, J. E. (2017). Concentration-response of short-term ozone exposure and hospital admissions for asthma in Texas. *Environment International*, *104*, 139–145. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.04.006

Capítulo 7. Fuentes de información

Benbrahim-Tallaa, L., Baan, R. A., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Guha, N., Loomis, D., Straif, K., & International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. (2012). Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. The Lancet. Oncology, 13(7), 663–664. https://doi.org/10.1016/s1470-2045(12)70280-2

California Air Resources Board. (2020). Overview: Diesel Exhaust & Health. https://ww2.arb.ca.gov/resources/overview-diesel-exhaust-and-health

Gobierno de la Ciudad de México. (2020). Plan General de Desarrollo de la Ciudad de México. https://plazapublica.cdmx.gob.mx/processes/plan-general-desarrollo

Gobierno del Estado de Hidalgo. (2020). Actualización del Plan Estatal de Desarrollo de Hidalgo 2016-2022. Visión Prospectiva para un estado Resiliente ante COVID-19. http://planestataldedesarrollo.hidalgo.gob.mx/pdf/PED/PED/Ped_Completo.pdf

Gobierno del Estado de México. (2018). Plan de Desarrollo del Estado de México 2017-2023. https://edomex.gob.mx/sites/edomex.gob.mx/files/files/PDEM%202017-2023%20PE.pdf

ICM, MCE2, & SEDEMA. (2018). Taller para la evaluación del ProAire 2011-2020 e identificación de estrategias para mejorar la calidad del aire de la CDMX. Iniciativa Climática de México, Molina Center for Environment and Energy, y Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/taller-evaluacion-PROAIRE-2011-2020/mobile/

INECC, UNAM, & RedCAM. (2019). Soporte científico para las políticas pú-blicas a implementar en el ProAire de la ZMVM 2021 – 2030. https://www.researchgate.net/publication/342378729_propuesta_de_agenda_cientii-fica_ProAire_MCMA_20190409

Li, G., Lei, W., Zavala, M., Volkamer, R., Dusanter, S., Stevens, P., and Molina, L. T.: Impacts of HONO sources on the photochemistry in Mexico City during the MCMA-2006/MILAGO Campaign, Atmos. Chem. Phys., 10, 6551–6567, https://doi.org/10.5194/acp-10-6551-2010, 2010.

Malley, C., & Kuylenstierna, J. C. I. (2019). Opportunities for increasing ambition of Nationally Determined Contributions through integrated air pollution and climate change planning: A practical guidance document. https://www.sei.org/publications/onationally-determined-contributions-through-integrated-air-pollution-and-climate-change-planning-guidance/

Ortegón, E., Pacheco, J. F., & Prieto, A. (2005). Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. Naciones Unidas.

PNUD & INECC. (2018). Diagnóstico del estado del arte de la química atmosférica en México con relación a los gases de efecto invernadero y los contaminantes climáticos. http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/245

Retama, A., Neria, A., Jaimes, M., Rivera, O., Sánchez, M., López, A., Velasco, E. (2019). Fireworks: A major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico City. Atmospheric Environment: X 2, 100013. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100013

Rui Zhang, Golam Sarwar, Jimmy C. H. Fung, Alexis K. H. Lau, Yuanhang Zhang, "Examining the Impact of Nitrous Acid Chemistry on Ozone and PM over the Pearl River Delta Region", Advances in Meteorology, vol. 2012, Article ID 140932, 18 pages, 2012. https://doi.org/10.1155/2012/140932.

SEDEMA. (2021). Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Contaminantes criterio, tóxicos y compuestos de efecto invernadero. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (versión preliminar sin publicar).

Zhang, L., T. Wang, Q. Zhang, J. Zheng, Z. Xu, and M. Lv (2016), Potential sources of nitrous acid (HONO) and their impacts on ozone: A WRF-Chem study in a polluted subtropical region, J. Geophys. Res. Atmos., 121, 3645–3662, doi:10.1002/2015JD024468.

Capítulo 8. Fuentes de información

Agencia de Protección Sanitaria de la Ciudad de México. (2019). *Primera sesión ordinaria del Comité Científico-técnico de Vigilancia sobre Contaminación Atmosférica de la Ciudad de México*. https://www.aps.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/comite-cientifico-tecnico-de-vigilancia-sobre-contaminacion-atmosferica-de-la-ciudad-de-mexico

Cromar, K. R., Ghazipura, M., Gladson, L. A., & Perlmutt, L. (2020). Evaluating the U.S. Air Quality Index as a risk communication tool: Comparing associations of index values with respiratory morbidity among adults in California. PLOS ONE, 15(11), e0242031. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242031

DOF. (2013). Convenio de Coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental de la Megalópolis, que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Gobierno del Distrito Federal y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Puebla y Tlaxcala. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/332496/CONVENIO_CREACIO_N_CAME_DOF.pdf

Gobierno de Canadá. (2019). *About the Air Quality Health Index*. https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-quality-health-index/about.html

Hsu, A. (2013). *Shanghai's New Air Quality mascot.* https://datadrivenlab. org/air-quality-2/shanghais-new-air-quality-mascot/

Instituto Mexicano para la Competitividad. (2016). *Observatorio ciudadano de calidad del aire*. https://imco.org.mx/observatorio-ciudadano-de-calidad-del-aire/

INTERCOM. (2018). RICE Prioritization Framework for Product Managers. https://www.intercom.com/blog/rice-simple-prioritization-for-product-managers/

Levine, D., Stephan, D., Krehbiel, T., & Berenson, M. (2017). Section 8.7 Estimation and Sample Size Determination for Finite Populations. Chapter 8. Confidence Interval Estimation. En Statistics for Managers Using Microsoft Excel (8a ed.). Pearson.

OCCA. (2019). Ruta urgente para mejorar la calidad del aire. https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2019/05/Demana-Urgente-ok.pdf

OMS. (2020). *Personal interventions and risk communication on air pollution: Summary report of WHO expert consultation, 12-14 February 2019*, Geneva, Switzerland. World Health Organization. https://apps.who.int/iris/handle/10665/333781

SEDEMA. (2017). *Convenio general de colaboración interinstitucional que celebran por una parte la Secretaría de Salud y Servicios de Salud Pública y la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México*. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/5a6/8d0/f2c/5a68d-0f2c21c3362883222.pdf

SEDEMA. (2018). *Firma Gobierno de la CDMX convenio con el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM*. https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/firma-gobierno-de-la-cdmx-convenio-con-el-centro-de-ciencias-de-la-atmosfera-de-la-unam

SEDEMA. (2019). Manual Operativo del Comité de Normalización Ambiental de la Ciudad de México. http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/Manual_Operativo_CONACDMX_2019.pdf

SEDEMA. (2021). Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Contaminantes criterio, tóxicos y compuestos de efecto invernadero. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (datos preliminares).

SEDESA. (2020). Comisión Intersectorial de Promoción de la Salud de la Ciudad de México. Minuta de la primer reunión virtual de trabajo. [Comunicación vía correo electrónico con la SEDEMA].

SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de Calidad del Aire. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf

Shen, F., Sheer, V. C., & Li, R. (2015). Impact of Narratives on Persuasion in Health Communication: A Meta-Analysis. Journal of Advertising, 44(2), 105–113. https://doi.org/10.1080/00913367.2015.1018467

Subsecretaría de Coordinación Metropolitana y Enlace Gubernamental. (2018). Instalan Consejo Metropolitano del Valle de México. Subsecretaría de Coordinación Metropolitana y Enlace Gubernamental. https://metropolitanos.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/instalan-consejo-metropolitano-del-valle-de-mexico

Capítulo 9. Fuentes de información

AFD. (s. f.-a). La investigación en la AFD. Recuperado 27 de febrero de 2021, de https://www.afd.fr/es/la-investigacion-en-la-afd

AFD. (s. f.-b). Mexico. AFD - Agence Française de Développement. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://www.afd.fr/en/page-region-pays/mexico

Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo. (2018). ¿Qué es la cooperación internacional para el desarrollo? http://www.gob. mx/amexcid/acciones-y-programas/que-es-la-cooperacion-internacional-para-el-desarrollo-29339

Almeyda, M. (s. f.). Asociaciones Público Privadas Aplicadas en Manejo de Residuos Sólidos. Recuperado 10 de marzo de 2021, de https://www.gob. mx/cms/uploads/attachment/file/208269/Waste_APP_Miguel_Almeida.pdf

Banco Mundial. (2018a). Proyecto de Manejo de Desechos y Captura de Carbono [Text/HTML]. World Bank. https://projects.bancomundial.org/es/projects-operations/project-detail/P088546

Banco Mundial. (2018b). Reducir la contaminación [Text/HTML]. Banco Mundial. https://www.bancomundial.org/es/topic/environment/brief/pollution

Banco Mundial. (2018c). Sustainable Transport and Air Quality [Text/HTML]. World Bank. https://projects.bancomundial.org/es/projects-operations/project-detail/P114012

Banco Mundial. (2021). Quiénes somos. Banco Mundial. https://www.bancomundial.org/es/who-we-are

Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C. (2020). Programa Banobras-FAIS. gob.mx. http://www.gob.mx/banobras/acciones-y-programas/programa-banobras-fais

Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C. (2021). ¿Cómo invertir? [Proyectos México]. https://www.proyectosmexico.gob.mx/como-invertir-en-mexico/financiamiento/

BID. (2020). Financiamiento y donaciones. Banco Interamericano de Desarrollo. https://www.iadb.org/es/acerca-del-bid/financiamiento-del-bid/financiamiento-del-bid%2C6028.html

CAF. (2021). About CAF. Development Bank of Latin America. https://www.caf.com/en/about-caf/

Carbon Trust México S.A. de C.V. (2018). Seguimiento y Evaluación de la Emisión del Bono Verde 2016 de la CDMX-Segundo Año. http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/images/biblioteca_cc/Segundo_reporte_de_seguimiento_Bono_Verde_2016.pdf

CCAC. (s. f.-a). About. Climate & Clean Air Coalition. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://ccacoalition.org/en/content/about-0

CCAC. (s. f.-b). Climate and Clean Air Coalition Trust Fund. Climate & Clean Air Coalition. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://ccacoalition.org/en/content/climate-and-clean-air-coalition-trust-fund

CCAC. (s. f.-c). Initiatives. Climate & Clean Air Coalition. Recuperado 27 de febrero de 2021, de https://ccacoalition.org/en/initiatives

CCAC. (s. f.-d). Mexico. Climate & Clean Air Coalition. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://ccacoalition.org/en/partners/mexico

CEFP. (2016). Las Asociaciones Público Privadas como Alternativa de Financiamiento para las Entidades Federativas. https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2016/junio/eecefp0032016.pdf

Centro Mario Molina. (2014). Guía para la elaboración de Programas de Acción Climática. Nivel local. http://centromariomolina.org/cambio-climatico-2/guia-para-la-elaboracion-de-programas-de-accion-climatica-ni-vel-local/

Ciudades del Futuro. (2020, diciembre 7). Firman acuerdo de colaboración la CDMX y el Reino Unido para mejorar las condiciones de movilidad en la capital del país. Ciudades del Futuro. https://www.ciudadesdelfuturo.mx/boletin-de-prensa/firman-acuerdo-de-colaboracion-la-cdmx-y-el-reino-unido-para-mejorar-las-condiciones-de-movilidad-en-la-capital-del-pais/

Comexus Fulbright-García Robles. (2013). COMEXUS Becas Fulbright-García Robles. https://comexus.org.mx/acerca.php

CONABIO. (2020). GEF. Biodiversidad Mexicana. https://www.biodiversidad.gob.mx/planeta/internacional/gef-1

CONACyT. (2019). CONACyT. https://www.conacyt.gob.mx/

CONUEE. (s. f.). ¿Qué hacemos? Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://www.gob.mx/conuee/que-hacemos

Embajada del Japon en Mexico. (s. f.). Servicios: Becas (JICA, Fundación Japón, AOTS). Embajada del Japon en Mexico. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://www.mx.emb-japan.go.jp/sp/servicios/becas-jica-jf-aots.htm

FIDE. (2021). Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica. Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica. https://www.fide.org.mx/

Fundación Carlos Slim. (s. f.). Salud. Fundación Carlos Slim. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://fundacioncarlosslim.org/salud/

Fundación Gonzalo Río Arronte. (2019). Salud. Fundación Gonzalo Río Arronte. https://fundaciongonzalorioarronte.org/salud

GCF. (s. f.). Green Climate Fund [Text]. Green Climate Fund; Green Climate Fund. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://www.greenclimate.fund

GEF. (2018). Climate Change Focal Area Strategy. https://www.thegef.org/sites/default/files/documents/Focal_area_GEF-7_Programming_Directions_Climate_Change.pdf

GIZ. (s. f.-a). Gestión Ambiental Urbana e Industrial II. Recuperado 27 de febrero de 2021, de https://www.giz.de/en/worldwide/32987.html

GIZ. (s. f.-b). México (español). giz.de. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://www.giz.de/en/worldwide/33041.html

GIZ. (s. f.-c). Sustainable infrastructure: Water, energy, transport. Giz.De. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://www.giz.de/en/ourservices/sustainable_infrastructure.html

GIZ. (2017). Guía de financiamiento climático para las entidades federativas en México.

Gobierno de la Ciudad de México. (2019). Presupuesto de Egresos de la Ciudad de México para el Ejercicio Fiscal 2020. https://www.iecm.mx/www/transparencia/art.121/121.f.01/marco.legal/24_PresupEgresosCdMx_23122019.pdf

Gobierno de México. (s. f.). Acerca del FONADIN. Recuperado 10 de febrero de 2021, de https://www.fonadin.gob.mx/fni2/acerca-del-fonadin/

Gobierno de Reino Unido. (2020). Prosperity Fund Mexico Programme. GOV. UK. https://www.gov.uk/government/publications/prosperity-fund-mexico-programme

Gobierno del Distrito Federal. (2006). Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal 2000-2006. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/gaa_avances_propuestas_2000_2006.pdf

Gobierno del Estado de Hidalgo. (2019). Presupuesto de Egresos del Estado de Hidalgo Ejercicio Fiscal 2020. https://s-finanzas.hidalgo.gob.mx/descargables/2019/paquete%20hacendario/2020/Reportes%20Proyec-to%20de%20Ppto%202020/2020_52_Reporte%20armonizado%201%20Clasificacion%20administrativa.pdf

Gobierno del Estado de México. (2019). Presupuesto de Egresos del Gobierno del Estado de México para el Ejercicio Fiscal 2020. http://atlacomulco. gob.mx/atlacomulco.gob.mx/Transparencia/3.Tesoreria%20Municipal/3. Tesoreria%20Municipal/NORMATIVIDAD%20APLICABLE/23PRESEGREDO-MEX2020.pdf

Green Climate Fund. (2021, enero 22). Results areas [Text]. Green Climate Fund. https://www.greenclimate.fund/results

Grupo BMV. (s. f.). Bonos Verdes. Recuperado 25 de noviembre de 2020, de https://www.bmv.com.mx/docs-pub/MI_EMPRESA_EN_BOLSA/CTEN_MINGE/BONOS%20VERDES.PDF

Health Effects Institute. (s. f.). Search Site. Health Effects Institute. Recuperado 27 de febrero de 2021, de https://www.healtheffects.org/search/site/mexico

Health Effects Institute. (2016, enero 17). About HEI. Health Effects Institute. https://www.healtheffects.org/about

Health Effects Institute. (2020). HEI Strategic Plan For Understanding the Health Effects of Air Pollution 2020-2025. https://www.healtheffects.org/system/files/hei-strategic-plan-2020-2025_0.pdf

IDB. (2019). IDB Group Country Strategy (2019-2024). https://idbdocs.iadb. org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-26730841-18

IDB. (2020). Mexico. Inter-American Development Bank. https://www.iadb. org/en/countries/mexico/overview

INAFED, & SEGOB. (2018). Catálogo de Programas, Fondos y Subsidios Federales para Entidades Federativas. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310655/Catalogo_Programas_Fondos_Subsidios_2018.pdf

JICA. (s. f.). Actividades en México. Japan International Cooperation Agency. Recuperado 11 de febrero de 2021, de https://www.jica.go.jp/mexico/espanol/activities/proyeintegr.html

Jiménez, R. (2020, diciembre 3). Avala Naucalpan planta de tratamiento de basura. El Universal. https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/edomex/avala-naucalpan-planta-de-tratamiento-de-basura

México2. (2016). MÉXICO2 Plataforma Mexicana de Carbono. http://www. mexico2.com.mx/

O'Neill, M. S., Loomis, D., Torres Meza, V., Retama, A., & Gold, D. (2002). Estimating particle exposure in the Mexico City metropolitan area. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 12(2), 145-156. https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500212

SEGOB. (2019). Acuerdo por el que se emiten los Lineamientos Generales para la operación del Fondo de Aportaciones para la Infraestructura Social. Diario Oficial De La Federacion. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565603&fecha=12/07/2019

SEGOB. (2020). Reglas de Operación del Programa de Mejoramiento Urbano, para el ejercicio fiscal 2021. Diario Oficial de la Federación. http://dof. gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609367&fecha=31/12/2020

SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de Calidad del Aire Visión 2017-2030. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf

SHCP. (s. f.). Analíticos del Presupuesto de Egresos de la Federación. Recuperado 10 de febrero de 2021, de https://www.pef.hacienda.gob.mx/es/PEF/Analiticos_PresupuestariosPEF

SIL. (s. f.). Presupuesto de Egresos de la Federación. Recuperado 10 de febrero de 2021, de http://sil.gobernacion.gob.mx/Glosario/definicionpop. php?ID=189

TNC México. (2018). Alianza México-REDD+. http://www.alianza-mredd. org/en/home/

UK PACT. (2020). Mexico-UK PACT. UK PACT. http://www.ukpact.co.uk/es/country-programme/mexico

UNEP. (2017, septiembre 15). Coalición Clima y Aire Limpio. ONU Programa Para El Medio Ambiente. http://www.unenvironment.org/es/explore-topics/climate-change/what-we-do/coalicion-clima-y-aire-limpio

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2021). Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-convention/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico

USAID. (s. f.). USAID in Mexico: Program Overview.

USAID. (2012). Mexico Low Emissions Development Program. https://usea.org/sites/default/files/event-/Mexico%20LEDS%20Presentation%20English.pdf

USAID. (2021). U.S. Agency for International Development. USAID. https://www.usaid.gov/

William and Flora Hewlett Foundation. (2003). Fundación México-Estados Unidos para la Ciencia—For the Air Quality Network. William and Flora Hewlett Foundation. https://hewlett.org/grants/fundacion-mexico-estados-unidos-para-la-ciencia-for-the-air-quality-network/

World Bank. (s. f.). Projects By Sector [Text/HTML]. World Bank. Recuperado 27 de febrero de 2021, de https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-sector

Capítulo 10. Fuentes de información

ADIP. (2020). *Presentación de la Agencia Digital de Innovación Pública*. https://adip.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/presentacion-de-la-agencia-digital-de-innovacion-publica.pdf

CGI. (2016). *U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Digitizing regulatory compliance*. https://www.cgi.com/sites/default/files/casestudies/cgi-case-study-epa-ocspp.pdf

Cordyon, B, Ganesan, V. & Lundqvist, M. (2016). *Transforming government through digitization. McKinsey & Company*.https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Public%20and%20Social%20Sector/Our%20Insights/Transforming%20government%20through%20digitization/Transforming-government-through-digitization.pdf

EY. (2020). *Situación actual del gobierno digital en Centroamérica, Panamá y República Dominicana*. https://www.ey.com/es_cr/government-public-sector/gobierno-digital-en-la-region

SEDEMA. (2021). *Estrategia local de acción climática 2021-2025. Programa de acción climática de la Ciudad de México 2021-2030.* https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/PACCM_y_ELAC.pdf

SEMARNAT. (2011). *Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/

SEMARNAT. (2014). *Guía de Seguimiento y Evaluación de los Programas de Gestión de la Calidad del Aire (ProAire) versión 1.0*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311686/Guia_de_SyE_de_ProAire.pdf

SEMARNATH. (2016). *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Hidalgo. ProAire 2016-2024*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249576/ProAire_Hidalgo.pdf

Ortegón, E., Pacheco, J. & Prieto, A. (2015). *Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5607/S057518_es.pdf

UAM. (2010). *Evaluación y seguimiento del programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010*. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/documentos/9-docs_evaluacion_documento_ejecutivo.pdf

Capítulo 11. Fuentes de información

Environmental Protection Agency, U. S. (2021). Managing Air Quality—Program Implementation. https://www.epa.gov/air-quality-management-process/managing-air-quality-program-implementation

ProAire ZMVM 2021-2030
Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (SEDEMA)
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM)
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo (SEMARNATH)
Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe)

Primera edición Diciembre, 2021