

LA CIUDAD DE MÉXICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

*Estudios realizados en el Centro Virtual de Cambio Climático en la Ciudad de
México*

Compiladores:

Jesús Efrén Ospina Noreña, Carlos Gay García, Cecilia Conde, María Amparo
Martínez

Centro de Ciencias de la Atmósfera
Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México
Universidad Nacional Autónoma de México

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
PREFACIO	3
CAPÍTULO I RECURSOS HÍDRICOS	6
<i>Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático</i>	
CAPÍTULO II RECURSOS HÍDRICOS	23
<i>Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México</i>	
CAPÍTULO III RECURSO AIRE, SECTOR SALUD	45
<i>Efecto de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias pediátricas en la Ciudad de México de 2000 a 2002</i>	
CAPÍTULO IV RECURSO AIRE, SECTOR SALUD	55
<i>Evaluación de la calidad del aire de la Ciudad de México y su efecto en la salud de la población expuesta a biopartículas aeroalergénicas (granos de polen) y su relación con el cambio climático</i>	

CAPÍTULO V 67
RECURSO SUELO

Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación. Estimación de carbono orgánico total en los edafosistemas del Suelo de Conservación del Distrito Federal

CAPÍTULO VI 85
RECURSO SUELO, SECTOR PLANEACIÓN

Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación

CAPÍTULO VII 97
RECURSO HÍDRICO, AIRE Y AGUA, SECTOR PLANEACIÓN Y SERVICIOS PÚBLICOS

Evaluación de los impactos de los residuos sólidos bajo cambio climático en la Ciudad de México

CAPÍTULO VIII 111
RECURSO AIRE, SECTOR TRANSPORTE PÚBLICO

Escenarios de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de pasajeros en la zona metropolitana del Valle de México

CAPÍTULO IX 124
Análisis y consideraciones

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

CAPÍTULO I. Recursos Hídricos

Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático

Tabla 1	10
Indicadores de vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento	
Tabla 2	10
Indicadores de vulnerabilidad seleccionados	
Tabla 3	14
Efecto de los cambios climáticos proyectados sobre la disponibilidad de agua, a partir de los cambios en la precipitación y evapotranspiración real	
Figura 1	13
Cambios de temperatura y precipitación proyectados al 2050	

CAPÍTULO II. Recursos Hídricos

Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Tabla 1	28
Capacidad de infiltración según el tipo de suelo en la ZMCM	
Tabla 2	31
Volumen de escurrimiento para la Zona Norte, volumen de recarga natural para la Zona Sur (escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085) y línea base	
Figura 1	30
Temperatura promedio mensual, escenario A1B y B1, periodo 2046-2085	
Figura 2	30
Anomalía de temperatura (°C), escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085	
Figura 3	30
Precipitación promedio mensual, escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085	

Figura 4	30
Porcentaje de cambio en el número de eventos extremos de precipitación, Escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085	
Figura 5	31
Porcentaje de cambio en la precipitación promedio anual, evaporación potencial y precipitación efectiva, escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085	
Figura 6	32
Comparación del consumo de agua (m^3s^{-1}) en años calurosos y no calurosos	
Figura 7	33
Patrones de consumo para los escenarios B1 y A1B	

CAPÍTULO III. Recurso Aire, Sector Salud

Efecto de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias pediátricas en la Ciudad de México de 2000 al 2002

Tabla 1	50
Ingresos hospitalarios diarios por todas las causas de enfermedad y enfermedades respiratorias, DF	
Tabla 2	50
Niveles diarios de contaminantes y variables meteorológicas, DF. Enero de 2000-diciembre de 2002	
Tabla 3	51
Porcentaje de cambio de admisiones hospitalarias pediátricas, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria, por época del año, Ciudad de México. Modelos ajustados por O ₃ , PM ₁₀ y HR	
Tabla 4	52
Porcentaje de cambio de admisiones hospitalarias pediátricas por causas respiratorias, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria, por época del año, Ciudad de México. Modelos ajustados por O ₃ , PM ₁₀ y HR	
Figura 1	48
Localización de hospitales pediátricos y estaciones de monitoreo	

Figura 2 52
Porcentaje de incremento de riesgo de admisiones hospitalarias por todas las causas de enfermedad en todas las edades pediátricas, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria

Figura 3 53
Porcentaje de incremento de riesgo de admisiones hospitalarias por causas respiratorias en todas las edades pediátricas, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria

CAPÍTULO IV. Recurso Aire, Sector Salud

Evaluación de la calidad del aire de la Ciudad de México y su efecto en la salud de la población expuesta a biopartículas aeroalérgicas (granos de polen) y su relación con el cambio climático.

Tabla 1 59
Polínicos colectados del aire de las delegaciones Coyoacán, Miguel Hidalgo e Iztapalapa

Figura 1 58
Zonas de monitoreo de la Red Mexicana de Aerobiología (ReMA) de la Ciudad de México

Figura 2 60
Calendario de los granos de polen de árboles colectados en la Delegación Miguel Hidalgo

Figura 3 60
Calendario de los granos de polen de malezas y pastos colectados en la Delegación Miguel Hidalgo

Figura 4 61
Calendario de los granos de polen de árboles colectados en la Delegación Iztapalapa

Figura 5 61
Calendario de los granos de polen de malezas y pastos colectados en la Delegación Iztapalapa

Figura 6 62
Calendario de los granos de polen de árboles colectados en la Delegación Coyoacán

Figura 7 63
Calendario de los granos de polen de malezas y pastos colectados en la Delegación Coyoacán

Figura 8	64
Alergenos identificados en pacientes con conjuntivitis alérgica	

Figura 9	65
a) Temperatura registrada durante el año de 2008 y las proyectadas para el año 2050	
b) Estimación del inicio de su floración para el 2050	

CAPÍTULO V. Recurso Suelo

Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación. Estimación de carbono orgánico total en los edafosistemas del Suelo de Conservación del Distrito Federal.

Figura 1	71
Localización del área de estudio sobre el mapa de relieve sombreado del Suelo de Conservación del Distrito Federal	

Figura 2	72
Sitios de muestreo de suelos y vegetación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal	

Figura 3	76
Diagrama metodológico	

Figura 4	79
Cantidad de carbono orgánico en suelo de las delegaciones que integran el Suelo de Conservación del Distrito Federal	

Figura 5	79
Niveles de COS en los suelos de conservación del Distrito Federal	

CAPÍTULO VI. Recurso Suelo, Sector Planeación

Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación.

Figura 1	89-91
Ejemplos de la plataforma para la integración de información	

CAPÍTULO VII. Recurso Hídrico, Aire y Agua, Sector Planeación Y Servicios Públicos

Evaluación de los impactos de los residuos sólidos bajo cambio climático en la Ciudad de México.

Figura 1	100
Disposición final de residuos sólidos urbanos en el Estado de México	
Figura 2	102
Tiraderos clandestinos y canales de desagüe	
Figura 3	102
Sitios de disposición final de los RSU e hidrología de la ZMVM	
Figura 4	104
Escenarios de generación de CO ₂ equivalente debidos a la disposición final de RSU en la ZMVM	

CAPÍTULO VIII. Recurso Aire, Sector Transporte Público

Escenarios de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de pasajeros en la zona metropolitana del valle de México.

Tabla 1	115
Fracción de carbono oxidado	
Tabla 2	115
Factores de emisión de CO ₂ , incluyendo fracción oxidable (tCO ₂ /TJ)	
Tabla 3	116
Factores de emisión de CH ₄ y N ₂ O para vehículos de gasolina	
Tabla 4	117
Factores de emisión de CH ₄ y N ₂ O para vehículos de combustibles distintos a gasolina	
Tabla 5	118
Consumo de combustible para transporte de pasajeros en la ZMVM, 2006 (PJ)	
Tabla 6	118
Estructura del consumo de combustibles por modo de transporte en la ZMVM (2006)	
Tabla 7	119
Escenarios base y de mitigación para el año 2020, ZMVM, Tg de CO ₂ equivalente	

CAPÍTULO IX. Análisis y Consideraciones

Tabla 1

125

Matriz de elementos o aspectos transversales o no en los diferentes estudios realizados en el CVCCCM

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
AE	Evaporación real
AMC	Análisis multicriterio
AWC	Valor medio de agua aprovechable
CA	Capacidad adaptativa
CC	Cambio climático
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
CH ₄	Metano
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CIE	Código Internacional de Enfermedades
CO	Carbono orgánico
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CORENA	Comisión de Recursos Naturales
COS	Carbono orgánico del suelo
CVCCCM	Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México
Da	Densidad aparente
DAP	Diámetro a altura del pecho
Dr	Densidad real
ELAC	Estrategia local de acción climática
ESCALA	Estudio de Contaminación Atmosférica en Latinoamérica
ET	Evaporación potencial
FAW	Agua de fácil acceso
GAM	Modelo aditivo generalizado
GEI	Gases de efecto invernadero
GPS	Sistema de posicionamiento global
gr/m ³	Granos por metro cúbico
HR	Humedad relativa
ILWIS	Integrated Land Water Information System
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INER	Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias

IOCV	Instituto Oftalmológico Conde de la Valenciana
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
KCL	Cloruro de potasio
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
MO	Materia orgánica
µg/m ³	Microgramos por metro cúbico
N ₂ O	Óxido nitroso
NaF	Fluoruro de sodio
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₃	Ozono
PAI	Plan de Acción Inmediata
PE	Evapotranspiración potencial
pH	Potencial de hidrógeno
PM ₁₀	Partículas menores a 10 micras
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
REMA	Red Mexicana de Aerobiología
RS	Residuos sólidos
RSU	Residuos sólidos urbanos
SACM	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SAEH	Sistema de Automatizado de Ingreso Hospitalario
SC-DF	Suelo de Conservación del Distrito Federal
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SSA	Secretaría de Salud y Asistencia
T _{max}	Temperatura máxima
T _{min}	Temperatura mínima
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
WCRP	World Climate Research Program
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

INTRODUCCIÓN

México tiene la intención de sumarse a los esfuerzos internacionales que pretenden enfrentar las causas y consecuencias del cambio climático.

Ha participado intensamente en las negociaciones que se desarrollan en el contexto de la Convención Marco sobre Cambio Climático, y a cumplido con prolijidad sus compromisos como país *No – Anexo 1*, al haber presentado cuatro Comunicaciones Nacionales que dan cuenta de las acciones que se han tomado, tanto en la reducción de emisiones como en la adaptación al calentamiento global. Por otra parte, ha promovido la realización de estudios que permiten adoptar de manera más estratégica estas medidas en diferentes estados de la República.

En particular la Ciudad de México, siendo una de las metrópolis más grandes del planeta ha desarrollado su estrategia de acción climática, que plantea una serie de acciones concretas que se están llevando a cabo y que repercutirán en reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero y fomentarán el fortalecimiento de su capacidad de adaptación al cambio climático. Sin embargo, la necesidad de planeación la obliga a crear escenarios futuros que le permitan desarrollar estrategias que van del mediano a largo plazo y que se concentren en aéreas, sectores y actividades de la sociedad más concretas.

El Centro de Ciencias de la Atmósfera, es la institución más importante de México dedicada desde hace muchas décadas al estudio de la atmósfera y del clima. Ha desarrollado métodos para liderar con problemas complejos que proveen soluciones de “principio a fin”. El Centro de Ciencias de la Atmósfera ha coordinado los estudios más importantes y pioneros para determinar la vulnerabilidad del país al cambio climático. Dentro de sus logros se cuenta el haber desarrollado el primer Inventario de Gases de Efecto Invernadero y primer Estudio de País que sentó las bases para estudios posteriores sobre vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Estos estudios requirieron de la conformación de equipos multi e inter disciplinarios. También ha participado en proyectos multinacionales y cuenta con siete autores en el cuarto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés).

A la luz de estos antecedentes, asertivamente el Gobierno de la Ciudad de México (GDF), a través del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyT) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), decidieron crear un espacio al que pudieran acceder funcionarios y académicos para discutir los problemas futuros de la ciudad.

Se decidió que serían funcionarios del gobierno que percibieran que sus sectores se verían afectados por el cambio climático y por otra parte, se convocaría a la academia no sólo de la UNAM, sino de toda la ciudad, incluso cuando fuera necesario convocaría a los expertos nacionales donde éstos se encontraran. Investigación que se realizaría y que se realiza en este

espacio, para dar a conocer e impulsar la necesidad de desarrollar políticas públicas. Por lo tanto, en este espacio se decidió que los esfuerzos acabarían usándose en la construcción de políticas públicas y fue llamado CENTRO VIRTUAL DE CAMBIO CLIMÁTICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO (CVCCCM).

Las metas del CVCCCM son:

- Construir una entidad (virtual) que concentra, organiza y coordina la información sobre los impactos del cambio climático en la ciudad de México.
- Impulsar el desarrollo de políticas públicas, que encuentran la capacidad de adaptación y reduce la vulnerabilidad de los sectores sociales.
- Crear un marco de política para la adaptación, vulnerabilidad y mitigación para la ciudad de México.
- Promover la creación de REDES de Investigación sobre cambio climático.

En su primera etapa el CVCCCM aportó:

1. Escenarios de cambio climático para ciudad para el 2020 y 2050.
2. Apoyó ocho proyectos de investigación cuyos resúmenes se presentan a continuación y que se centraron en la cuatro áreas de interés acordadas entre la Ciudad de México, a través del ICyT y el CCA de la UNAM. Las cuatro áreas son: Suelos de conservación, Energía y residuos sólidos, salud, agua y energía.

La Ciudad de México enfrenta retos muy importantes que amenazan su viabilidad futura, relacionados con el calentamiento del planeta que comprometen el desarrollo sustentable de la ciudad y la obligan a realizar un ejercicio de planeación que rebasa los términos de la diferentes administraciones.

La decisión de conformar el Centro Virtual de Cambio Climático, es una medida que fortalece la capacidad de la ciudad y muestra la inteligencia de la actual administración que a través el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Ciudad, apoya la existencia de este espacio de encuentro, donde concurren funcionarios y académicos preocupados por el futuro de nuestra ciudad.

PREFACIO

El Gobierno de la Ciudad de México (GDF), a través del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF) y en conjunción con el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), constituyeron el Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM) con la finalidad de contribuir al incremento y mejora del conocimiento disponible sobre el impacto del cambio climático en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) en tanto que afecta a la ciudad misma, así como para contribuir a la formulación y ejecución de políticas públicas innovadoras que generen mayor adaptación y calidad de vida, menor vulnerabilidad, disminución en los riesgos y amenazas a los habitantes de la ZMCM.

Las características y variaciones espaciales y temporales del clima constituyen un importante factor a tomar en cuenta en la planificación urbana, sobre todo tratándose de las megaciudades. El CVCCCM pretende establecer conceptual, metodológica y operativamente una forma dinámica de desarrollo de estrategias, políticas y medidas de adaptación, de disminución de la vulnerabilidad y de mitigación al cambio climático, mediante la actuación integrada de los sectores público, privado, social y científico. También pretende aprovechar las capacidades de investigación que se encuentran en las numerosas instituciones académicas con sede en el Distrito Federal, como sustento primario de una red de investigación que concentre y dé seguimiento a información sobre estudios, resultados e implementación de políticas.

A lo largo de su historia, la ciudad ha enfrentado numerosos eventos relacionados con el clima de la cuenca: lluvias torrenciales, inundaciones, ondas de calor, heladas, deslaves, tolvaneras, contaminación atmosférica, incendios forestales, entre otros. Al mismo tiempo, el propio desarrollo de la ciudad ha ido ejerciendo una influencia, tanto en la forma en que se presentan, como en el impacto que tienen estos eventos.

En un contexto de cambio climático, una megaciudad como lo es la Ciudad de México está obligada a utilizar todo el conocimiento disponible para evaluar y reducir la vulnerabilidad de los diferentes sectores sociales, generar políticas y acciones que aumenten su capacidad adaptativa y garanticen su desarrollo a mediano y largo plazo.

De lo anteriormente expuesto se desprende que el CVCCCM contempla entre sus objetivos primordiales los siguientes:

Construir una instancia que concentre, organice y coordine la información referente a la variabilidad y cambio climáticos en el Distrito Federal, con el fin de que articule las estrategias y políticas a desarrollar en el corto, mediano y largo plazos con la participación conjunta del sector público, académico, privado y social.

Sustentar el desarrollo de políticas que aumenten la *capacidad adaptativa*¹ y que reduzcan la vulnerabilidad de los diferentes sectores sociales en el Distrito Federal, tomando como base la variabilidad espacial y temporal del clima y de los eventos extremos en el corto plazo, como punto de partida para la reducción de la vulnerabilidad a largo plazo, las posibles adaptaciones a nivel local y su congruencia y viabilidad en los niveles regionales y nacional, que se enmarquen en las estrategias de desarrollo, conservación de la biodiversidad, combate a la pobreza y a la desertificación, la participación de actores involucrados como tomadores de decisiones y posibles afectados durante todo el proceso de elaboración de políticas para reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad adaptativa.

Diseñar un marco de políticas de adaptación, reducción de vulnerabilidad y mitigación ante el cambio climático para la Ciudad de México.

Dentro del contexto anteriormente planteado, el presente documento pretende dar un enfoque conjunto de los diferentes estudios que se han realizado en el CVCCCM en su primera etapa, los cuales han tenido como objetivo general observar las causas y efectos del cambio climático en la Ciudad de México, desde diferentes áreas o disciplinas del conocimiento como son los recursos hídricos, el aire, el suelo, la salud humana, el transporte y, los residuos sólidos.

El informe busca brindar un documento que sirva como punto de partida o dé lineamientos para continuar estudios tendientes a observar los efectos del cambio climático en las diferentes áreas y sub-áreas del conocimiento y desde una óptica interdisciplinaria, con el propósito de evitar la proliferación de investigaciones redundantes y optimizar los recursos humanos y económicos que dichos estudios demandan.

Se presenta la información teniendo en cuenta los objetivos propuestos en cada uno de los estudios, así como las metodologías empleadas y los principales resultados obtenidos en cada uno de ellos; los estudios realizados a la fecha en el CVCCCM y a los que se hace referencia en este informe son los siguientes: Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático (Escolero *et al.*, 2009), Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Soto *et al.*, 2009), Efecto de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias pediátricas en la Ciudad de México de 2000 al 2002 (Riojas *et al.*,

¹ Capacidad adaptativa es la habilidad de un sistema de ajustarse al cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos climáticos, a daños potenciales moderados, aprovechando oportunidades, o de sobrellevar sus consecuencias.

La capacidad adaptativa es dinámica y recibe la influencia de los recursos económicos y naturales, las redes sociales, los derechos, las instituciones y la gestión de los asuntos públicos, los recursos humanos y la tecnología (AR4-GWII del IPCC, 2007); el mismo informe menciona además que la capacidad adaptativa es desigual entre sociedades y dentro de éstas.

2009), Evaluación de la calidad del aire de la Ciudad de México y su efecto en la salud de la población expuesta a biopartículas aeroalergénicas (granos de polen) y su relación con el cambio climático (Calderón *et al.*, 2009), Evaluación de los impactos de los residuos sólidos bajo cambio climático en la Ciudad de México (Barreda *et al.*, 2009), Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación: Estimación de carbono orgánico total en los edafosistemas del suelo de conservación del Distrito Federal (Vela *et al.*, 2009), Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación (Ordóñez *et al.*, 2009), Escenarios de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de pasajeros en la Zona Metropolitana del Valle de México (Sheinbaum *et al.*, 2009).

Por otro lado se tratará de integrar, si es posible, elementos o aspectos relevantes que hayan realizado otras instituciones o entidades en la Ciudad de México, tendientes a cubrir objetivos transversales a los estudios anteriormente relacionados; igualmente se buscará realizar un análisis complementario con el propósito de encontrar puntos de convergencia o divergencia de los estudios anteriores, determinar o identificar algunas líneas prioritarias de investigación y brindar lineamientos para la elaboración y aplicación de políticas ambientales.

El informe será presentado por capítulos, con el propósito de facilitar la lectura, entendimiento y comprensión del mismo.

CAPÍTULO I

Recursos hídricos

Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático

Óscar A. Escolero Fuentes¹, Sandra E. Martínez¹, Stefanie Kralisch¹, María Perevochtchikova²

RESUMEN

El objetivo del proyecto es hacer un diagnóstico de la situación actual de las fuentes de abastecimiento de agua de la ZMCM, para determinar la vulnerabilidad actual de éstas y evaluar el impacto de los escenarios de cambio climático (CC) en el contexto de la vulnerabilidad de las fuentes de abasto. El impacto del proyecto consiste en la realización de un diagnóstico de los sistemas de abasto de agua a la ZMCM, que permite conocer el estado actual de cada una de las fuentes existentes. En una comparación por análisis multicriterio, se cuantificó la vulnerabilidad de cada fuente para identificar los factores ambientales, socio-administrativos y de infraestructura que inciden sobre esta vulnerabilidad para contar con elementos útiles que permitan estructurar políticas públicas dirigidas a asegurar la oferta de agua y a disminuir la demanda. Se estimó a futuro un impacto negativo moderado y en aumento como efecto del cambio climático en la disminución del agua disponible, que da una línea base para orientar políticas de adaptación. También se mostró la interacción de algunos factores antropogénicos con el clima local y el ciclo hidrológico como son la isla de calor, cambio de vegetación, glaciares, entre otros, que aumentan la vulnerabilidad y agravarán el impacto de un cambio climático en la región, pero que pueden mitigarse parcialmente, si se atacan desde ahora mediante políticas y acciones concretas. Se evaluaron los planes de desarrollo de infraestructura para mejorar la oferta en la ZMCM, proponiendo un esquema de evaluación integrada que incluye los efectos del CC, energía e impacto social, aparte del factor económico. Se mostró que con este tipo de valoración quedan descartados algunos de los proyectos oficiales. Se construyeron mapas de vulnerabilidad y demás cartografía.

INTRODUCCIÓN

La discusión acerca de los efectos negativos del cambio climático surgió a inicios de los años noventa. Inicialmente, la discusión estuvo enfocada en la aceptación de éste como fenómeno de origen antropogénico, es decir, por la actividad humana, así como en la validez de la base

¹ Instituto de Geología, UNAM

² Colegio de México, A.C.

científica y los modelos de cálculo, los cuales fueron incrementando su nivel de certidumbre y detalle espacial. Actualmente, los pronósticos de aumento de 1.4 °C a 6 °C en la temperatura global dentro de este siglo, reciben una amplia aceptación entre la comunidad científica.

Los efectos del cambio climático se han evidenciado de manera incremental y dramática alrededor del mundo. Debido al fracaso de los mecanismos de mitigación propuestos en el Protocolo de Kyoto, la agenda política se orienta a la disminución de la vulnerabilidad frente a los desastres frecuentes y los cambios a largo plazo, para lograr una mejor adaptación a un fenómeno que ya no es reversible. La evaluación y adaptación se enfoca en tres ejes claves en los cuales el agua juega un papel preponderante: la seguridad alimenticia, el riesgo de la población frente a fenómenos climáticos extremos y el impacto sobre la disponibilidad de agua.

El agua ha sido un tema crítico para la sustentabilidad de la ZMCM. La creciente demanda de agua ha impactado de manera negativa y creciente en el balance de las cuencas y acuíferos locales y vecinos, generando daños económicos y ambientales que ya se muestran dramáticos. Las tradicionales prácticas de importación de agua para satisfacer la demanda urbana aunada al déficit regional, ha llevado a crecientes conflictos sociales y políticos en torno a la distribución y gestión del recurso agua. Los problemas de abastecimiento de agua de la ZMCM van más allá de sus fuentes e incluyen un complejo sistema de captación y conducción que enfrenta fuertes limitaciones. El envejecimiento de la infraestructura, los costos de operación, la falta de inversión en mantenimiento y rehabilitación, así como el deterioro de las fuentes de agua en cantidad y calidad, ha llevado al sistema de abastecimiento al límite de la operatividad física y económica.

Frente al contexto de cambio climático, los efectos negativos en las fuentes de abastecimiento de la ZMCM pueden verse agravados. La cuestión en qué grado aumenta la vulnerabilidad en la disponibilidad de las fuentes frente a los diferentes escenarios de cambio climático es esencial para la toma de medidas preventivas de adaptación.

El Gobierno de la Ciudad de México desarrolló estrategias y planes para enfrentar el reto en materia de abastecimiento de agua a su población, las medidas emprendidas incluyen en el Plan Verde, la Estrategia Local de Acción Climática (ELAC) y el Plan de Acción Climática. A través del CVCCCM se ha puesto en marcha una serie de proyectos que consideran el agua como uno de los ejes prioritarios de investigación.

En este contexto, el presente proyecto se enfoca en determinar los factores que inciden en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de la ZMCM, cumpliendo así parte de la estrategia planteada por su Gobierno. El término “vulnerabilidad” dentro del proyecto se refiere a la propensión a que disminuya la disponibilidad de agua potable entregable al Distrito Federal por parte de estas fuentes de abastecimiento. Se determinan y evalúan tanto

factores que están directamente relacionados al cambio climático, como otros que son de relevante importancia para el sostenimiento de las fuentes.

OBJETIVOS

Los objetivos considerados en este estudio buscan diagnosticar la situación actual de las fuentes de abastecimiento, determinar la vulnerabilidad actual de las mismas, evaluar el impacto de los escenarios de cambio climático en dicha disponibilidad y revisar el impacto del cambio climático en el contexto de la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta con el propósito de alcanzar los objetivos planteados contempló los siguientes aspectos:

- Conceptualización e identificación de las fuentes de abastecimiento al Distrito Federal.
- Recopilación y revisión de bibliografía relacionada al cambio climático, vulnerabilidad y agua, en el contexto internacional, nacional y local.
- Revisión de metodologías para la determinación de vulnerabilidad (cualitativa y cuantitativa).
- Revisión de medidas locales de adaptación al cambio climático.
- Diagnóstico de las fuentes de abastecimiento enfocado principalmente a las áreas de captación e infraestructura y revisión de proyectos para el futuro abastecimiento de agua al Distrito Federal
- Revisión de indicadores existentes a nivel internacional, nacional y local para la temática agua.
- Determinación de indicadores que inciden en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento con base en el diagnóstico y un taller de expertos.
- Valoración de indicadores y determinación cualitativa de la vulnerabilidad de la infraestructura, ambiental y socio-administrativa.
- Evaluación del impacto de los escenarios de cambio climático en la disponibilidad de las fuentes de abastecimiento.
- Discusión del impacto del cambio climático en el contexto de la vulnerabilidad de las fuentes de abasteciendo actuales y futuras.

Resumiendo la metodología propuesta en este estudio, se realizó un extenso trabajo de revisión documental para caracterizar y diagnosticar los problemas actuales de las fuentes de abastecimiento de agua, incluyendo factores de infraestructura, así como socio-administrativos y ambientales de las áreas de captación; igualmente para determinar y validar la vulnerabilidad actual de las fuentes de abastecimiento se realizó un taller con especialistas del área y se utilizó un algoritmo simple de Análisis Multi-Criterio (AMC) para la interpretación

de sus resultados. Por otro lado los indicadores que se establecieron y se evaluaron en el desarrollo del proyecto, se obtuvieron combinando la visión académica, con la de un grupo de expertos técnicos que han actuado en el diseño, construcción y operación de las fuentes de abastecimiento de agua a la Ciudad de México.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los indicadores que reflejan la situación de las fuentes de abastecimiento y determinan su vulnerabilidad, se construyeron a partir del diagnóstico de las fuentes de abastecimiento enfocado principalmente a las áreas de captación e infraestructura y revisión de proyectos para el futuro abastecimiento de agua del Distrito Federal y un taller de expertos realizado con el propósito de ahondar en el conocimiento y determinación de los indicadores propuestos.

Es importante anotar que información detallada concerniente al diagnóstico de todas las fuentes de abastecimiento de agua de la Ciudad de México, se encuentra en el informe final, el cual se puede consultar en el CVCCCM.

Los indicadores definidos con base en el diagnóstico fueron ajustados con los resultados del taller de expertos. A partir de la información obtenida durante la primera parte del taller, se definió una lista de indicadores representativos, para lo cual se agruparon los factores y problemas mencionados por los invitados según se tratara de infraestructura, área de captación o situación socio-administrativa, y posteriormente se determinaron aquellos indicadores que mejor resumían lo expuesto. Los indicadores obtenidos se compararon con los resultantes del diagnóstico, algunos de los cuales coincidieron, mientras otros fueron agregados. Como resultado del análisis anterior se obtuvieron 15 indicadores que representan la situación actual de las fuentes de abastecimiento y que permiten evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura, ambiental y socio-administrativa (Tabla 1).

TABLA 1. Indicadores de vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento

Indicador de Vulnerabilidad	Factores que inciden	Cutzamala	Lerma	Pozos PAI	Pozos SACM	Chiconautia	Manant. R.Magd.	Importancia	Nivel de confianza
Edad	de pozos, presas, acueductos	4.0	5.6	4.4	5.0	5.6	-	26	4.5
Estado	fugas, mantenimiento, pozos azolvados	7.0	6.0	5.0	6.2	5.5	4.0	34	3.8
Exposición a daños por terceros	acueductos, acceso a pozos / plantas	6.9	6.1	4.8	4.8	3.0	4.8	30	5.2
Extr. clandestina	tomas irregulares de los acueductos	6.8	7.5	4.5	4.5	3.0	3.0	29	4.3
Riesgo por catástrofes	Afectación por terremotos, tormentas extremas,...	4.8	4.0	3.3	4.4	3.3	1.3	21	3.7
Conducción centralizada	se junta gran caudal, riesgo alto en caso de falla de planta/acueducto único,	4.8	4.2	4.7	6.5	4.0	-	24	2.8
Capacidad	a) Tendencia (ej. Azolve, niveles altas en presas) , b) Ocupación de la capacidad instalada	6.4	5.8	5.0	5.7	4.5	5.0	32	3.7
Disponibilidad	Tamaño del acuífero o de la cuenca de captación , variaciones estacionales? afectación por sequías?	5.3	4.4	3.7	4.5	3.3	5.0	26	4.2
Tendencia disponibilidad	abatimiento de niveles en acuíferos y presas, grado del desbalance	9.7	8.2	6.5	7.8	8.3	9.5	50	4.2
Limitantes para la extracción	p.e. hundimiento, grietas, uso ecológico, caudales comprometidos	3.5	6.8	6.3	6.2	5.8	-	29	4.5
Calidad	fuentes de contaminación, aportes de agua de mala calidad, salud humana	6.0	5.8	5.8	7.0	4.7	6.5	36	3.7
Degradación cuenca	Deforestación, erosión, urbanización --> azolve, calidad, recarga	4.7	4.0	4.8	5.4	4.3	8.0	31	4.0
Conflictos	Conflictos sociales locales, demanda local, conflictos entre estados	5.6	7.2	5.2	4.3	3.0	3.8	29	5.6
Costo – Energía	Costo/m3 (bombeo, operación, tratamiento), inversiones necesarias, consumo E-el	6.7	5.5	7.0	6.5	3.0	3.0	32	2.8
Situación administrativa	importación de otro estado, derechos de agua, problemas para reposiciones, coordinación	6.6	6.8	4.3	3.2	2.3	5.5	29	4.5
Vulnerabilidad		89	89	75	82	64	59		
Nivel de confianza		6.1	6.1	4.5	4.4	3.4	2.1		

Nota: este ejercicio consistió en asignar un valor de 1 a 10, entendiéndose el valor de 1 como el menor impacto de la variable sobre el indicador de vulnerabilidad de la fuente.

Finalmente, se reevaluaron y agruparon los parámetros y se ajustaron a nueve indicadores; tres indicadores permiten evaluar cada índice de vulnerabilidad: a la infraestructura, ambiental y socio-administrativa (Tabla 2).

TABLA 2. Indicadores de vulnerabilidad seleccionados

	Indicador	Cutzamala	Lerma	Pozos PAI	Pozos SACM	Chiconautia
Vulnerabilidad de la infraestructura	Estado	9	7	8	7	7
	Exposición a daños por terceros	7	7	4	2	4
	Capacidad	5	3	5	5	3
Vulnerabilidad ambiental	Disponibilidad	10	6	7	8	8
	Calidad del agua	8	nd	7	8	nd
	Degradación ambiental	10	8	7	8	8
Vulnerabilidad socio-administrativa	Conflictos por demanda del agua	9	7	6	6	6
	Eficiencia económica	9	7	5	5	5
	Situación administrativa	5	6	7	2	7
	Suma	8.00	6.38	6.22	5.67	6.00

Del análisis de las anteriores tablas y en relación a la importancia dada a los diferentes indicadores destaca la “tendencia de la disponibilidad”, que se refiere al abatimiento de los niveles del agua en acuíferos y al riesgo por el cambio climático en el caso del sistema Cutzamala; en segundo y tercer lugar, “la calidad del agua” y “el estado de la infraestructura” respectivamente.

En relación a los temas evaluados, la infraestructura fue extensamente discutida en lo relacionado al “estado” y “extracciones clandestinas”; en el tema ambiental, se hizo reiterada referencia al abatimiento de los acuíferos, la calidad del agua y los problemas de subsidencia y agrietamiento; los factores socio-administrativos, en general se juzgaron importantes para las fuentes externas.

En relación a cada fuente, para el Sistema Cutzamala fueron expuestos diferentes factores como: la falta de mantenimiento de la infraestructura, el azolve de las presas, la toma clandestina del recurso hídrico, el riesgo a daños por terceros, el impacto del cambio de la temperatura en las áreas de captación, así como los costos de funcionamiento del sistema y las demandas locales. El problema de degradación de las cuencas, ampliamente evaluado en el diagnóstico, no fue percibido por los asistentes como causa principales en relación a la calidad del agua y los conflictos sociales.

En el Sistema Lerma se dio especial atención al abatimiento de los acuíferos, los efectos asociados a la subsidencia del terreno, los conflictos por demanda local, extracción clandestina y la situación administrativa, así como la edad de los pozos; los aspectos discutidos coincidieron con los puntos relevantes del diagnóstico para este sistema.

En el Sistema de Pozos Plan de Acción Inmediata (PAI) se hizo especial referencia a los problemas de incrustaciones y reposiciones en pozos. El abatimiento del nivel del agua y hundimiento del terreno fueron los factores evaluados como más importantes, seguido del problema de costos, calidad y conflictos por demanda local.

Se evaluó el Sistema de Pozos que pertenece al Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) resultando ser más vulnerable que el Sistema PAI dado el estado en el que se encuentran los pozos, el abatimiento del acuífero de la ZMCM y el hundimiento asociado, la calidad del agua y en menor grado las limitaciones en la capacidad de extracción y la degradación de la cuenca.

Los resultados para el sistema Chiconautla indican una mayor vulnerabilidad dada por el abatimiento local del acuífero y el estado/edad de la infraestructura, en tanto los problemas de degradación del área y el desabasto del municipio de Ecatepec a los que hace referencia el diagnóstico no fueron percibidos como relevantes; ésta fuente recibió el valor más bajo en cuanto a problemas socio-administrativas a pesar de los conflictos por el agua detectados en la zona.

De los resultados obtenidos y como conclusión, destaca la percepción de los efectos en lugar de las causas, por ejemplo, mientras se consideran de alta importancia el azolve en las presas y el deterioro de la calidad del agua, se asignaron valores bajos al factor de degradación en las cuencas; de igual manera, las extracciones clandestinas y el riesgo al vandalismo se juzgaron más importantes que su causa, que es en gran medida la demanda local de agua. Asimismo, se observa que los factores con los cuales los asistentes no han estado directamente involucrados, son considerados como daños colaterales en lugar de causa de los problemas, lo anterior explica la falta de acuerdos para la resolución de conflictos y atención a las demandas locales, y la persistencia al enfoque de incrementar el abastecimiento con fuentes lejanas.

Teniendo en cuenta la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua del Distrito Federal y el actual estado crítico de las mismas, por la creciente demanda de agua y por la degradación del recurso, se evaluó el efecto adicional del cambio climático.

Para alcanzar el anterior objetivo, los cálculos realizados en este proyecto utilizaron corridas de los modelos HADGEM 1 y ECHAM 5, los cuales según información del Centro de Ciencias de la Atmósfera aportan resultados razonables para México.

En cuanto a los escenarios de emisión se eligieron A2 y A1B. El escenario A2 corresponde a un panorama pesimista con emisiones de gases de efecto de invernadero altas, donde existe un crecimiento poblacional constante, el desarrollo económico está regionalmente orientado y el cambio tecnológico es muy fragmentado y más lento que en otros escenarios; el escenario A1B es intermedio y contempla una estabilización de los niveles de CO₂ en la atmósfera entre 650/750 ppm; en éste escenario el crecimiento poblacional decrece después de un lapso, y el desarrollo económico es alto con la introducción de tecnologías nuevas y eficientes, existiendo un balance entre el uso de fuentes de energía fósil y no fósil.

La figura 1 ilustra los cambios mensuales proyectados de temperatura y precipitación en las áreas de captación de algunos sistemas, para los escenarios A2 y A1B de los modelos HADGEM y ECHAM, con relación a la línea base construida con los datos históricos del período 1950-2000.

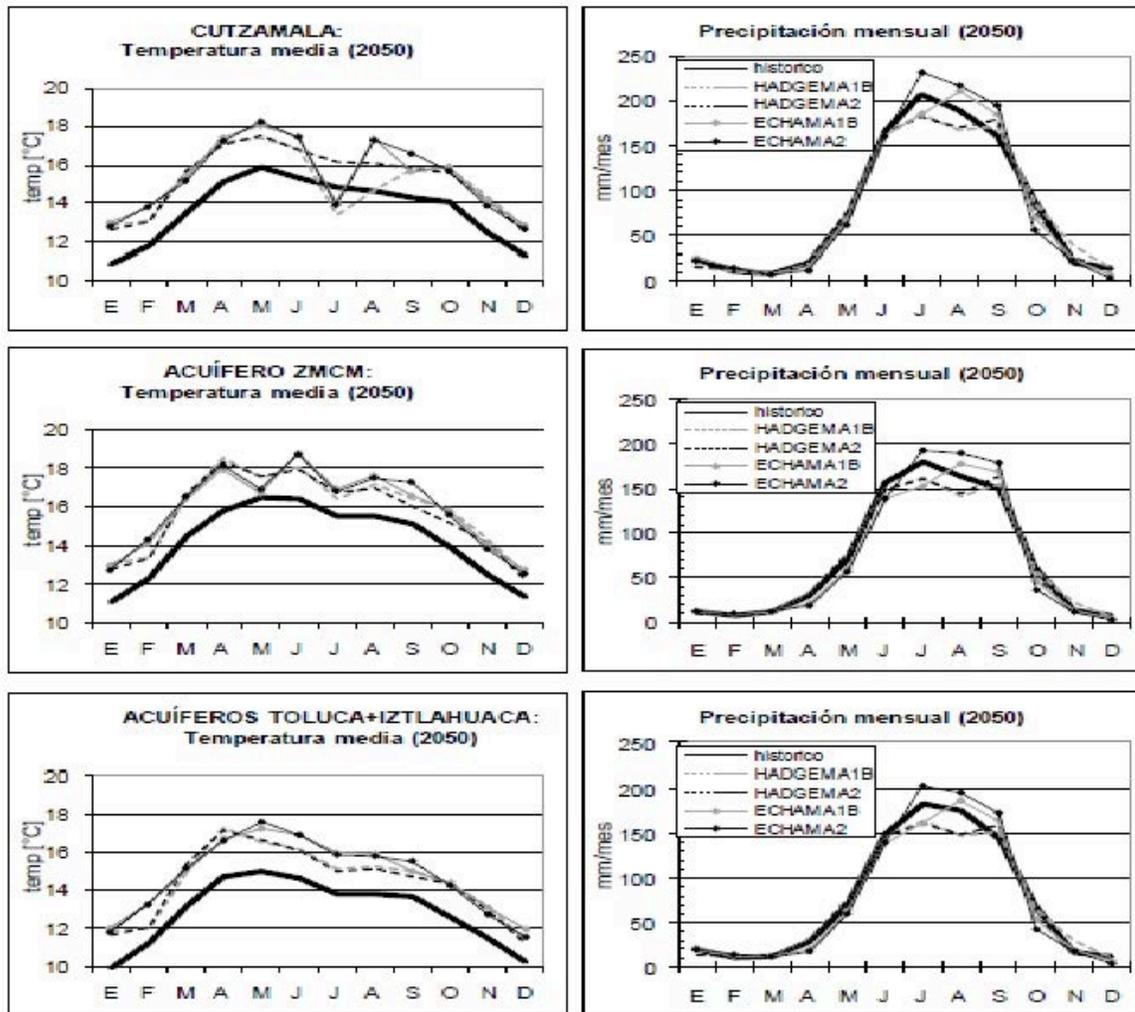


FIGURA 1. Cambios de temperatura y precipitación proyectados al 2050

El análisis de la precipitación promedio mensual del modelo HADGEM muestra una disminución de 2 a 5.5% en época de lluvia, y durante el estiaje un aumento entre 6.3 a 8.5% para el escenario moderado A1B y una disminución de 4 a 5.4% para el escenario de altas emisiones A2.

El modelo ECHAM 5 en cambio prevé un fuerte aumento de las lluvias en verano y mayores sequías en tiempos de estiaje. Este panorama adverso es especialmente pronunciado en el escenario ECHAM A2 con disminuciones de más de 20% en las lluvias de invierno y un aumento de hasta 11% en la precipitación en temporada de lluvia (caso Cutzamala). Es importante tomar en cuenta la estacionalidad de este efecto; si bien el escenario ECHAM A2 puede parecer el más favorable dado que el resultado indica un incremento neto en la precipitación anual, los efectos de la temporalidad resultan adversos.

La intensidad de la precipitación no se considera en ninguno de los modelos, pero es un factor clave en el funcionamiento del ciclo hidrológico. El exceso de lluvia en verano puede manifestarse con eventos torrenciales, reduciendo la capacidad de infiltración y aumentando el escurrimiento, lo anterior tiene un efecto directo en la recarga de acuíferos y en la degradación de cuencas superficiales con alto potencial de erosión; en tanto con relación a la infraestructura, los efectos negativos están relacionados con la capacidad de captación y conducción, y la seguridad de presas.

Con relación a la temperatura mensual, los resultados indican para el modelo HADGEM un incremento de 1.3 a 1.6 °C y de 1.7 a 1.9 °C para el modelo ECHAM; los aumentos más fuertes de hasta 2.2 °C se observan en época de verano en el área de captación del Sistema Cutzamala.

Posteriormente y de acuerdo a los cambios mensuales observados en temperatura y precipitación, se analizó el impacto de dichos cambios en el balance hidrológico y la disponibilidad natural de agua para las áreas de captación (Tabla 3).

TABLA 3. Efecto de los cambios climáticos proyectados sobre la disponibilidad de agua, a partir de los cambios en la precipitación y evapotranspiración real

Variable	Sistema Cutzamala					Acuífero ZMVM					Acuíferos Toluca+Iztlahuaca				
	Histórico	HADGEM		ECHAM		Histórico	HADGEM		ECHAM		Histórico	HADGEM		ECHAM	
		A1B	A2	A1B	A2		A1B	A2	A1B	A2		A1B	A2		
Prec anual [mm/a]	986.9					862.4					891.7				
dPrec (Junio-Sept)		-5.4%	-4.4%	2.6%	11.1%		-5.2%	-3.9%	-1.2%	6.7%		-2.4%	-1.9%	0.1%	3.3%
dPrec (Oct-Mayo)		6.7%	-5.4%	-12.1%	-20.7%		6.3%	-3.9%	-15.7%	-22.6%		8.5%	-4.7%	-13.5%	-21%
Temp media anual [°C]	13.6	+1.3	+1.6	+1.7	+1.7		+1.6	+1.5	+1.7	+1.7		+1.6	+1.5	+1.9	+1.9
EVT _R anual [mm/a]	627.5	+2.5%	+1.9%	+4.0%	+6.0%		+1.3%	+0.2%	+0.3%	+3.7%		+2.7%	+1.0%	+2.9%	+5.4%
área [km ²]	1539.0					1832.4					5030.8				
dPrec anual [hm ³]	1519.1	-33.4	-70.2	-19.8	+41.1	1580.3	-49.6	-71.0	-78.3	+6.4	4485.8	-111.0	-229.1	-155.7	+42.8
dEVT _R anual [hm ³]	965.9	+24.2	+17.8	+39.1	+58.4	1092.1	+14.1	+2.3	+2.8	+40.8	2945.8	+80.3	+29.8	+85.5	+159.0
Escurr+Rec anual [hm ³]	553.2	-57.6	-88.0	-58.8	-17.3	488.2	-63.6	-73.2	-81.1	-34.4	1540.0	-191.3	-258.9	-241.2	-116.2
Disponibilidad anual		-10.4%	-15.9%	-10.6%	-3.1%		-13.0%	-15.0%	-16.6%	-7.0%		-12.4%	-16.8%	-15.7%	-7.5%

*escenario ECHAM A2: El cambio será mucho más fuerte, ya que el aumento de la precipitación en verano y disminución en invierno causará una EVT_{real} mayor. Aumentan los picos de escurrimiento en verano y disminuye la infiltración.

Los efectos más directos del cambio climático se observarán en las fuentes de agua superficial debido a la rápida interacción con los elementos del ciclo hidrológico, mientras la reducción en la recarga puede tener efecto a muy largo plazo para acuíferos de extensión regional y a corto plazo en sistemas dependientes de recargas locales tal como los manantiales y flujo base en ríos. Asumiendo un aumento en el escurrimiento y disminución en la recarga, los efectos para los acuíferos a muy largo plazo también pueden ser drásticos.

CONCLUSIONES

Diagnóstico

En el diagnóstico se pudo observar claramente que la infraestructura y los factores socio-administrativos juegan un rol tan importante en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento, como los factores ambientales; igualmente se pudo determinar que los sistemas de abastecimiento operan al límite y no llegan a satisfacer la demanda de agua que presenta la ZMCM. A la situación de alta vulnerabilidad actual se debe agregar los efectos del cambio climático, así como los cambios por i) crecimiento en la demanda de agua, ii) aumento de la degradación en las áreas de captación, iii) reducción de la calidad de agua y recarga, entre otros.

Escenarios de Cambio Climático

Los escenarios climáticos evaluados indican una reducción significativa en la futura disponibilidad natural de agua, se observa además una clara diferencia entre escenarios de menor emisión y escenarios de “laissez faire” (A2), lo cual pone de manifiesto la importancia de los esfuerzos que México debe emprender para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI); es difícil distinguir en el análisis entre los efectos de cambio de cobertura de suelo, cambios locales del clima y los efectos de un cambio climático global, sin embargo, es evidente que todos estos efectos apuntan en la misma dirección: un clima más extremo con lluvias y sequías más intensas, añadido a una menor capacidad de resiliencia de las cuencas para amortiguar y regular estos efectos.

El proceso de degradación es complejo y está afectado de diferentes maneras por el fenómeno de cambio climático; los cambios de uso de suelo se reconocen como la causa principal de los cambios y pérdidas de la vegetación, sin embargo las variaciones del clima pueden afectarla de manera progresiva, la pérdida de vegetación y la ocurrencia de eventos extremos pueden agravar las tasas de erosión y consecuentemente incrementar la degradación, impactando en la cantidad y calidad del agua.

Si bien los indicadores usados para evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura no están relacionados directamente al cambio climático, es necesario tomar en cuenta que en el caso del Sistema Cutzamala la alta vulnerabilidad por el estado de la infraestructura puede aumentar frente a lluvias extremas que amenaza la seguridad de las presas.

En relación a la vulnerabilidad socio-administrativa, esta se incrementará con la mayor demanda de agua como consecuencia del aumento de la población y la actividad económica. En el pasado, las instituciones han ignorado los potenciales conflictos sociales, y los impactos ambientales y costos sociales que resultan de la transferencia de agua entre cuencas; incluso, la cuarta etapa del Sistema Cutzamala no considera ningún esquema de compensación a las poblaciones afectadas. Adicionalmente, algunos estiman que el aumento de la temperatura y la ocurrencia de temporadas secas más extremas provocarán una mayor demanda de agua, sin

embargo, esto es cuestionable dado los programas de restricción de uso de agua que ya se están implementando.

Los tomadores de decisión deben planear tomando en cuenta una disponibilidad futura de agua considerando todos estos efectos acumulados y posibles ciclos de retroalimentación positiva que amplifican los impactos.

Medidas de mitigación y adaptación

Las medidas para proteger el clima local a futuro, son en gran medida las mismas que son necesarias para disminuir la vulnerabilidad frente a otros factores, las cuales requieren ser tomadas de manera inmediata e intensa para enfrentar los actuales retos; en el presente, la baja capacidad de adaptación a cualquier cambio está dada por una mezcla de factores:

- Falta de mantenimiento y adaptación de la infraestructura.
- Degradación de cuencas, fuentes de agua y urbanización descontrolada.
- Falta de acuerdos y planeación entre las instituciones involucradas en la gestión y operación, alta resistencia al cambio.
- El marco hidropolítico (“agua ajena”, demanda local no-cubierta).

Opciones alternativas de abastecimiento

Frente a un contexto de alta vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua a la Ciudad de México, se promueven proyectos que apuntan principalmente a la importación de agua superficial de cuencas vecinas mediante grandes obras hidráulicas (Temascaltepec, Tecolutla, Amacuzac), los criterios para evaluar estos proyectos son usualmente los costos (inversión y precio de equilibrio del agua producida) y factibilidad técnica.

En el contexto del cambio climático, los requerimientos de energía de proyectos para el futuro abastecimiento de agua a la Ciudad de México pueden considerarse una limitante dado los compromisos asumidos por México para reducir las emisiones de gases de efecto de invernadero, en este sentido cabe destacar el proyecto del río Amacuzac con un requerimiento de energía que equivalente al 5% de la producción energética nacional anual, sin embargo, frente al panorama actual los requerimientos de energía, los costos y los potenciales conflictos sociales parecen no ser un obstáculo para las autoridades que deben buscar soluciones urgentes para el abastecimiento de agua; como ejemplo, la 4ta etapa del Sistema Cutzamala que contempla el aprovechamiento del río Temascaltepec que con un costo de \$15.00 por metro cúbico es considerado por la CONAGUA como un proyecto realizable a pesar de la fuerte oposición social, la elevada inversión y consumo de energía.

La alta vulnerabilidad al cambio climático que presentan las fuentes de abastecimiento de origen superficial obliga a reevaluar los proyectos de importación de agua desde el punto de vista de la disponibilidad y la degradación ambiental; los cambios en la disponibilidad de agua como efecto del cambio climático en la región, han sido estimados, estas variaciones no han

sido tomadas en cuenta en los proyectos para futura importación de agua superficial, por lo que requieren una reevaluación.

Mientras el nuevo paradigma de gestión de agua urbana promueve el aprovechamiento integral y descentralizado de los recursos de agua disponible, en la Ciudad de México aún prevalecen los enfoques tradicionales de gestión centralizada y aprovechamiento de agua de primer uso; la falta de planeación de los sistemas de agua obliga a medidas de emergencia que impactan en los costos y la sustentabilidad de los sistemas de agua urbana, un ejemplo es la descarga y disposición conjunta de agua pluvial y residual (con el emisor oriente) que inhibe el uso descentralizado e incrementa los costos de inversión y tratamiento, entre otros efectos negativos.

Igual que la importación de agua, el reuso del agua residual para potabilización presentará objeciones sociales, con la única diferencia que éstas se presentarían por los propios electores, lo cual aumenta el grado de dificultad en la realización política, sin embargo, con voluntad política y convenientes campañas de información, el reuso del agua tratada para agua potable puede constituir una solución viable que fomenta una cultura de agua orientada en las realidades y necesidades locales, en lugar de conceptos abstractos.

A su vez, los esfuerzos de separar las aguas pluviales de las residuales se han visto impedidos por la falta de opciones superficiales para almacenar el agua de lluvia dentro de la cuenca. Con los avances en la tecnología de manejo de recarga de acuíferos, utilizando estos como almacenamientos gigantes, este problema (y con esto los fuertes problemas de inundaciones y costos de exportación de agua) se pueden superar; sin embargo, el problema del tratamiento de agua y ubicación adecuada de las obras es complejo, no obstante que se han hecho avances tanto por el SACM como por parte del Gobierno Federal, en este punto sería importante conjuntar los esfuerzos de la CONAGUA y del SACM, así como de las instituciones académicas.

La protección de las partes altas de las cuencas debe ser considerada como uno de los temas prioritarios para la protección ambiental y civil, el cuidado de las zonas de recarga y la conservación del clima local, lo anterior requiere la declaración de las zonas de recarga como Áreas Naturales Protegidas (adicionales a las ya existentes) pero sobre todo la implementación práctica de estos decretos; es contradictoria una política en la que se propone la reforestación intensa, pero sin el control necesario para proteger los recursos forestales existentes.

En el contexto del cambio climático y la demanda creciente, las soluciones deben buscarse en el manejo descentralizado del ciclo de agua urbana para encontrar los usos y demandas locales, lo cual disminuye los costos de inversión y mantenimiento, reduce el consumo de energía y facilita el almacenamiento y la distribución.

Un análisis global de los impactos y beneficios que cada propuesta conlleva, así como de las opciones que el sistema actual presenta para incrementar la oferta, es necesario antes de tomar decisiones; soluciones socialmente aceptables y ambientalmente deseables, deberían considerar primero estrategias enfocadas a la demanda, antes de privilegiar los proyectos de importación de agua para aumentar la oferta.

REFERENCIAS

Ariel Consultores (2001) Estudio para actualizar los datos constructivos de los equipos instalados en los pozos de la Cuenca del Valle de México, pertenecientes al sistema hidráulico del D.F.

Ariel Consultores (2004) Estudio de modelación para determinar el comportamiento de Acuíferos del valle de México. Para: Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Gerencia Técnica. CONAGUA.

Asteroide SA de CV (2007) Estudio de los niveles estáticos y dinámicos de los acuíferos del Valle de Toluca para la interpretación del abatimiento que han presentado los acuíferos del Valle de Toluca, Ixtlahuaca-Atlacomulco en los últimos 50 años. Informe Final y Anexo Único. Para: Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Contrato N° 06-CD-03-3P-0302-07.

Breceda-Lapeyre, M.C. (2004): Agua y energía en la Ciudad de México (Visión en 2004). Seminario Internacional del Agua ¿Bien privado o bien común? Septiembre 22, 2004. Universidad de la Ciudad de México.

Carrera-Hernández JJ, Gaskin SJ (2007) Spatio-temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology* 336(3-4):231-249, DOI 10.1016/j.jhydrol.2006.12.021.

Chacón López, O.; Gutiérrez Cedillo J.G.; Cárdenas Boyasbek M.; Massiris Cabeza A. (2002) Programa de Ordenamiento de la cuenca Valle de Bravo - Amanalco, Edo. México; Gobierno del Estado de México, Secretaría de Ecología; Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía.

CNA (1997) Diagnóstico ambiental de las etapas I, II y III del Sistema Cutzamala. México. Comisión Nacional del Agua.

CNA (1997b) Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en los Valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México. México, D.F. Unitecna, 26 pp

CNA/IDECA Investigación y Desarrollo de Estudios de Calidad del Agua (1999). Estudio Limnológico de la Presa Valle de Bravo. Informe Final. Contrato GT-306-GAVM-98.

CNA/IMTA (2004). Identificación de los niveles de erosión hídrica de la cuenca Valle de Bravo. Memoria Técnica. 44 pp.

Conagua (2005) Determinación de la degradación hidroecológica y recuperación de microcuencas del Valle de México, estudio de gran visión. Realizó Instituto de Geografía, UNAM. Convenio N° GOA-01-GAVMSC- 05.

Conagua/IMTA, 2006. Diagnóstico de la cuenca Valle de Bravo. Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la Cuenca de Valle de Bravo, Estado de México. Convenio GAVMSC-GOA-MEX-05-404-RF-CC.

Conagua (2007a) Estadísticas del agua 2007 de la Región XIII. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua (2007b) Programa de obras y acciones para la preservación de la cuenca Villa Victoria, Estado de México. Realizó Colegio de Posgraduados, Convenio OCAVM-GOA-MEX-07-401-RF-CC.

Conagua (2007c) Sistema hidrológico del Valle de México. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua (2007d) Plan de Acción Inmediata. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua (2008) Cubos portátiles de información. CONAUGA, CD.

Consejo Nacional de Investigación (1995): El Agua y la Ciudad de México. Academia de la Investigación Científica, A.C., Academia Nacional de Ingeniería, A.C., Academia Nacional de Medicina, A.C., National Academy of Sciences, México.

Delgado-Granados, H. (2007): Investigador del Instituto de Geofísica, UNAM, en: El Universal (04-04-2007): Advierten sobre Riesgo de deshielo en el Iztaccíhuatl.

DGCOH (1997) Estudio de evolución de niveles piezométricos en la Cuenca del Alto Lerma para el periodo 1985-1997. Informe final. 47 pp.

Díez Pérez, J.A. (1998) Análisis de las zonas de recarga de acuíferos mediante la percepción remota: Aplicación a la cuenca de Almoloya del Río. Tesis de maestría. UAEM: CIRA. 142 pp.

Estrada-Porrúa, F. y Martínez-López, B. (2008) Métodos para la Generación de Escenarios de Cambio Climático. Segundo Taller del Centro Virtual de Cambio Climático, Centro de Ciencias de la Atmósfera, 6 de Febrero 2008.

Garfias, J. et al. (2002) Análisis de la vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero del curso alto del Río Lerma, Estado de México. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 2, 115-126.

Gobierno del Distrito Federal, Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal y Fundación Friedrich Ebert, 2004. *Hacia la agenda XXI de la Cd. de México*.

INE (2004) Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de la cuenca Lerma-Chapala. Instituto Nacional de Ecología, para Sub-Secretaria de Fomento y Normatividad Ambiental, Mayo 2004.

Jáuregui O. E. (1999): Las precipitaciones extremas en la Ciudad de México. *Boletín Informativo 26/27 del Colegio de Pilotos Aviadores*.

Jáuregui O. E. (2006) Are heat waves increasing their frequency in Mexico City?”, 6th Proceedings International Conference on Urban Climate (ICUC-6), 12-16 June, Goteborg, Suecia.

Jornada, La (2004) Ecatepec y Tecámac, paraíso de inmobiliarias. 26 de Marzo de 2004.

Labadie, J., Melgoza-Valdivia, J., Garay-Sánchez, A., Monroy-Hermosillo, O., Fresan-Orozco, M., Pérez-Llanas, C.V., y Moctezuma-Barragán, P. (2008): *Repensar la Cuenca - La Gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México*. Universidad Autónoma de México y Guardianes de los Volcanes a través de USAID y FMCN.

La Jornada (09-10-2007): Acelerada Deforestación en el Nevado de Toluca: ONG. En: <http://www.planetaazul.com.mx/www/2007/09/10/acelerada-deforestacion-en-el-nevado-de-toluca-ong/>

Legorreta, J., Contreras, M. C., Flores, M. A., Jiménez, N. (1997) Agua y más agua para la Ciudad, Red Mexicana de Eco-Turismo. Disponible en <http://www.planeta.com/ecotravel/mexico/ecologia/97/0897agua.html>

Legorreta, J., Contreras, MdC., Flores, MdA., Jimenez, N. (1997): *Ecológica – Agua*, publicación del Centro de Ecología y Desarrollo (Cecodes), suplemento de la Jornada.

Lesser y asociados, S.A. de C.V. (1992) Estudio para el diagnóstico del acuífero del Valle de Toluca, para implementar la reglamentación de la extracción del agua subterránea. Contrato No. DIA-92-21-C. Realizado para la Dirección de infraestructura Rural del Gobierno del Estado de México.

Multiestudios S.A. de S.V (2007): Estudio del funcionamiento hidráulico de acuafero del ramal sur del Lerma y de la reposición y rehabilitación de pozos en el Alto Lerma, para el

abastecimiento a la Delegación Iztapalapa. Realizado para el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Contrato No. 06-CD-03-1°-0334-07.

Pichardo Pagaza, I. (2007) Presa de Valle de Bravo en El agua: ciclo de un destino, Secretaría del Agua y Obra Pública del Gobierno del Estado de México, México.

PNUD. (2007) Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies. United Nations.

Reforma (22.03.2008): Se calienta el Nevado de Toluca. Toluca, Estado de México. En: <http://www.planetaazul.com.mx/www/2008/03/22/se-calienta-el-nevado-de-toluca/>

Ruiz-Rivera, N. (2006) Métodos para evaluar la transformación de las capacidades ambientales en los habitantes de una comunidad periurbana. El caso de Tultepec, México. Primera Conferencia Latinoamericana y del Caribe sobre el Enfoque de las Capacidades Humanas. Ciudad de México, Julio 2006.

SACM (2009): Estudio de la medición de niveles del agua subterránea en los Valles de Toluca e Ixtlahuaca en el Alto Lerma – Capítulo V Balance. Documento proporcionado por el SACM (Dep. Geohidrología), Marzo 2009.

Santoyo-Villa, E., Ovando-Shelley, E., Mooser, F., León-Plata, E. (2005): Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México. Ciudad de México, Feb 2005.

Sheinbaum, C. (2004): Proyecto de recarga del acuífero en el sur del Distrito Federal. Conferencia en el Colegio de Ingenieros Civiles de México, Febrero 18 de 2004 [en] Revista Tlálloc, Asociación Mexicana de Hidráulica, No. 30, Enero-Abril 2004 pp. 43-44.

SEMARNAT (2008) Indicadores básicos del desempeño ambiental de México. México, Edición 2008, CD.

Silva, R. (1999) Agua y subordinación en la cuenca del Río Lerma. Tesis Facultad de Arquitectura y Diseño. Toluca, Universidad Autónoma del Estado de México: 342.

Soto-Montes de Oca, G. (2009) Desigualdad en la distribución del servicio: Tarifas y Subsidios. Ponencia en el Foro Metropolitano: “El Reto: 1° el Agua”. Universidad Iberoamericana. 2009

Tortajada, C., 2006. Water Management in Mexico City Metropolitan Area, Water Resources Development, 22:2, 353-376.

UAEM (1993) Problemática ambiental de los recursos hídricos en la Cuenca Alta del Río Lerma. Seminario Internacional sobre el Ambiente. Vol. 1, p. 170-181, 1993.

UAM (2008) Aprovechamiento de los servicios hidrológicos como estrategia para aumentar la competitividad de la Zona Metropolitana de la Cuenca de México. Universidad Autónoma de México, Diciembre 2008.

Universal, El (2002) Contamina el plomo agua de Chiconautla. Almendra Vázquez Bravo, Edición del 30 de diciembre de 2002.

CAPÍTULO II

Recursos Hídricos

Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Gloria Soto Montes de Oca¹, Marina Herrera Pantoja², Araceli Soto Montes de Oca¹, María Eugenia Vilchis Carmona¹, Mario Archundia Silva¹

RESUMEN

El cambio climático es una de las amenazas más serias que actualmente enfrenta nuestro planeta, sus efectos han causado grandes pérdidas humanas y materiales en los últimos años, y de acuerdo a los modelos climáticos, esta situación se agravará para finales de siglo XXI, cuando se espera un aumento en la temperatura global del planeta de entre 1.1 y 6.4 °C. Los objetivos de este proyecto son: realizar una evaluación de las posibles implicaciones que el cambio climático puede tener sobre los recursos hídricos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) durante el presente siglo y evaluar los riesgos potenciales del cambio climático en la cantidad, calidad y gestión del agua en la ZMCM, además de contar con una herramienta adecuada para la toma de decisiones. Uno de los resultados es que hay muchas incertidumbres inherentes al uso de los modelos climáticos de circulación general (GCMs) y de los supuestos realizados en cada paso del proceso. A pesar de las incertidumbres, el estudio presenta evidencia que confirma que la ZMCM posee un nivel bajo de resiliencia. Esto significa un peligro latente de deterioro del servicio que puede poner en riesgo el acceso al agua aún sin considerar los impactos del cambio climático. A partir de los resultados que se obtuvieron de los modelos, se prevé, con un alto nivel de certidumbre, que aumentará la demanda de agua, derivado de mayores niveles de temperatura promedio en el valle de México. El aumento en la demanda puede generar una reducción en la oferta, que actualmente ya se presenta en diversas delegaciones, lo que llevaría a que los hogares enfrenten recortes sistemáticos y severos del servicio, sobre todo durante la época de estiaje. Con menor certidumbre y mayor discrepancia sobre los resultados, se resalta que el cambio de las precipitaciones afectaría de manera diferenciada en los tipos de suelo. En el suelo de conservación (SC) impactaría la cantidad de agua que se recarga en los acuíferos, y en el suelo urbano afectaría la cantidad de agua pluvial que recibe el sistema de drenaje. Uno de los escenarios presenta la posibilidad de riesgos de infraestructura de drenaje insuficiente, con el consecuente riesgo de inundaciones y problemas relacionados con la protección civil. Sin embargo, existe la alternativa de que las autoridades también puedan explotar los beneficios del cambio climático, sobre todo en términos del potencial de recarga de acuíferos y del uso de

¹ Universidad Iberoamericana, Ciudad de México

² Universidad de East Anglia, Inglaterra

sistemas de captación de agua pluvial, lo que enfatiza la recomendación de utilizar un enfoque de Gestión Integrada del Recurso del Agua, el cual considera un rango de procesos y acciones sobre la relación oferta-demanda, de manera que pueda obtenerse una perspectiva equilibrada de las estrategias a seguir.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las amenazas más serias que actualmente enfrenta nuestro planeta, sus efectos han causado grandes pérdidas humanas y materiales en los últimos años y de acuerdo a los modelos climáticos, esta situación se verá exacerbada para finales de siglo XXI cuando se espera un aumento en la temperatura global del planeta de entre 1.1 y 6.4 °C (Solomon *et al.*, 2007), es evidente que tal incremento en la temperatura tendrá profundas implicaciones en el ciclo hidrológico alterando la calidad y cantidad de los recursos hídricos, provocando cambios en la recarga de acuíferos, erosión e intrusión salina, cambios en los sistemas de flujo del agua subterránea y superficial y cambio en las corrientes oceánicas y marítimas (Hulme & Brown, 1998).

En México hay muchas presiones sobre los recursos hídricos de parte de los sectores agrícola, industrial, urbano y turístico; el continuo crecimiento de la población hace que la demanda de agua también se incremente haciendo más vulnerables aquellas comunidades y ciudades cuyo suministro de agua es limitado. Por otro lado, hechos recientes, como inundaciones y sequías, demuestran que los efectos del cambio climático están produciendo impactos sobre el sistema económico y la seguridad de la población.

Algunos países han empezado a hacer evaluaciones del impacto del cambio climático en los sistemas de abasto y en el manejo de inundaciones, en el caso particular de México es aun limitado el número de estudios que han abordado esta problemática específica, pero resulta urgente hacerlo para las zonas con mayor vulnerabilidad; con relación a lo anterior las autoridades han reconocido que la ZMCM es la región del país con los problemas más graves de sustentabilidad en el manejo del recurso.

La ZMCM es la segunda ciudad más grande del mundo, con 19.2 millones de habitantes (INEGI, 2005); en su conjunto consume 61 m³/s de agua y más del 80% del volumen distribuido en el Distrito Federal se destina para fines domésticos; el 67% del agua que consume la ZMCM proviene del acuífero local y el 33 % restante de importaciones principalmente del Estado de México. De acuerdo a estimaciones, dicho volumen excede entre el 40 % y el 80 % la capacidad de recarga natural, poniendo al agua subterránea como un recurso no renovable (Birkle *et al.*, 1998). La escasez de fuentes para cubrir la demanda de la población actual y las necesidades futuras, aunadas a las presiones potenciales que el cambio climático puede provocar que el servicio sufra un mayor deterioro en los próximos años poniendo en situación de crisis a la ZMCM, por lo tanto, es indispensable evaluar los posibles

efectos del cambio climático en los recursos hídricos que genere información para diseñar las diferentes acciones y estrategias de adaptación que permitan el manejo eficiente del recurso.

El problema de determinar los impactos del cambio climático en los sistemas de abasto de los países en desarrollo y particularmente de México es la falta de información apropiada para llevar a cabo los análisis, tanto desde la perspectiva de series de datos largas y confiables, hasta la desagregación de la información al nivel que se requiere; sin embargo, es importante que estudios de esta naturaleza se reproduzcan para buscar diferentes maneras de analizar el problema y con ello mejorar el tipo de información y conocimiento que se tenga disponible para la toma de decisiones.

OBJETIVOS

Los principales objetivos de esta investigación buscaban: Realizar una evaluación de las posibles implicaciones que el cambio climático puede tener sobre los recursos hídricos de la ZMCM durante el presente siglo y evaluar los riesgos potenciales del cambio climático en la cantidad, calidad y gestión del agua.

Los objetivos secundarios de su parte consideraban identificar el estado de los estudios del cambio climático relacionados con la cantidad, calidad y gestión del agua en la ZMCM, caracterizar el clima en la ZMCM en los últimos 30 años (temperatura, precipitación pluvial, eventos extremos y uso de suelo), producir escenarios futuros de disponibilidad de recursos hídricos para la ZMCM para diferentes escenarios de emisiones de gases invernadero, identificar los patrones de estacionalidad y los impactos de diferentes "eventos extremos" en el consumo, distribución y disponibilidad de agua, evaluar las principales afectaciones del abasto del servicio derivados de posibles escenarios y proponer políticas y acciones aplicables a la ZMCM.

METODOLOGÍA

Con el propósito de evaluar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos en la Ciudad de México, este estudio revisó la información histórica existente para tener una estimación de los rangos en que el clima de la ZMCM ha variado en las últimas décadas.

La investigación utilizó las salidas del modelo GFDLCM2, para el periodo 2046-2085 teniendo en cuenta los escenarios de emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI) A1B y B1, las bases de datos se obtuvieron del World Climate Research Programme (WCRP) Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) multi-model dataset (http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php), donde están disponibles los más recientes resultados de

diferentes AOGCMs de todo el mundo para diferentes escenarios de futuras emisiones de gases de invernadero.

La selección del modelo GFDL se basó en las recomendaciones hechas por el CVCCCM sobre los modelos que mejor reproducen las condiciones históricas para la Ciudad de México y en la disponibilidad de datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación.

Para estimar los impactos derivados de los escenarios de cambio climático en el sistema de abasto de agua de la ZMCM se identificaron las relaciones entre temperatura y precipitación en la gestión de los recursos hídricos de la ciudad. Esto llevó a discutir el tipo de políticas y acciones que pueden ser útiles para el caso de la ZMCM y se identificaron los costos de las medidas para reducir el nivel de resiliencia de la ciudad. La investigación buscó no sólo discutir los posibles riesgos asociados con el cambio climático sino también resaltar el potencial de aprovechar las posibles oportunidades del fenómeno.

Datos históricos

En México, el Servicio Meteorológico Nacional es el organismo encargado del acopio de la información climatológica a nivel nacional, dicha información ha sido concentrada, depurada y ordenada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en la base de datos denominada 'Eric'. La versión Eric III, 2006 ha sido utilizada en esta investigación para obtener los registros históricos espaciales y temporales diarios de variables climáticas de la ZMCM. Dado que no todas las estaciones contienen registros de todas las variables climatológicas y muchas carecen de información por diversos periodos de tiempo, sólo se seleccionaron aquellas estaciones cuyos registros históricos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación estaban lo más completo posible.

La Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) recomienda el uso del periodo 1961-1990 como periodo estándar contra el cual se deben comparar los efectos del cambio climático (WMO, 2002). Sin embargo, dado que la mayoría de las estaciones meteorológicas incluidas en la base de datos climatológica Eric III presenta datos hasta el año 1988 el periodo de 30 años utilizada en este estudio abarco de 1959-1988. Los datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima, y precipitación fueron utilizados para realizar cálculos promedios de la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real y de la recarga para la zona centro, norte y sur de la ZMCM. Para fines de este estudio se realizó un cálculo para la zona urbana y otro para la zona de conservación.

Cálculo de Evapotranspiración de la ZMCM

Una gran parte del agua que se precipita sobre la superficie de la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de la evaporación, la transpiración y la sublimación; las cuales son, en esencia, tres variantes de un único proceso debido a la acción de la energía solar. En el ámbito de la evaporación de las aguas subterráneas, se sabe que el

recurso no alcanza nunca la atmósfera mediante un proceso de evaporación directa, a no ser que el nivel freático de las formaciones acuíferas esté situado a muy pocos decímetros de la superficie del suelo.

Con la finalidad de poder reproducir los valores históricos de evapotranspiración reportados para la ZMCM, se consultaron estudios previos. Diversas ecuaciones empíricas y cuasi-empíricas para el cálculo de la evapotranspiración han sido empleadas; por ejemplo, el método de Turc el cual presentó subestimaciones del 15 al 20 % con respeto a los valores reales, en contraste, las ecuaciones de Morton, Blassey-Morin, Coutagne y Budyko fueron considerados como más cercanos al valor de la evapotranspiración real. De acuerdo a los resultados mostrados por el estudio de la DGCOH (1997), la evapotranspiración corresponde a un porcentaje del 60 % de la precipitación; en tanto, en el estudio de Birkle *et al.*, (1998), la relación entre evapotranspiración y precipitación fue de entre 55-65 %. SACM (2005) consideró, como un porcentaje representativo alrededor del 60 % de la precipitación estimada.

Para estimar la evapotranspiración potencial un gran número de métodos han sido propuestos: Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998, Hess, 1996), Priestley y Taylor (1972), Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1982), Thornthwaite (Thornthwaite y Mather, 1955), Penman-Grindley (1969), Mishra y Singh (2003). La ecuación de Penman-Monteith es considerada la más completa y confiable (Hess, 1996). Sin embargo, dada el gran número de parámetros que requiere para su aplicación, no fue posible utilizarla para los cálculos en la ZMVM.

En su lugar la ecuación de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) fue utilizada:

$$ET = 0.0023*(T_{\text{mean}} + 17.8) * (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) * 0.5Ra \quad (1)$$

Donde, ET es evapotranspiración (mm/día), T_{mean} temperatura promedio diaria (°C), T_{max} temperatura máxima diaria (°C), T_{min} temperatura mínima diaria (°C) y Ra radiación extraterrestre (mm/día).

Cálculo de la infiltración de la ZMCM

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra. La capacidad de infiltración de un suelo es la cantidad de lluvia que puede absorber en unidad de tiempo, por lo que ésta dependerá de la intensidad de lluvia, tipo de suelo, uso del suelo, cubierta vegetal y humedad inicial. Parte del agua suele quedar retenida en la capa no saturada y está disponible para ser transpirada por las plantas en la franja de penetración de las raíces o para ser evaporada por la acción de la energía solar sobre la superficie del terreno; otra fracción del agua que se infiltra puede alcanzar la zona saturada del sistema acuífero una vez superada la capacidad de campo del suelo (Ortiz-Ortiz, 1990; Mishra, 2003).

Para la determinación de la infiltración, se consideraron valores de infiltración mediante el uso de las cartas edafológicas del INEGI (1989) a escala 1:50000. La Tabla 1 muestra la

capacidad de infiltración de los diferentes suelos de la ZMCM de acuerdo a Ortiz y Ortiz (1990).

TABLA 1. Capacidad de infiltración según el tipo de suelo en la ZMVM

Tipo de Suelo	Capacidad de Infiltración (lámina de agua / hora) en cm	
	Andosol	Media
Cambisol	Lenta	0.25 a 1.75
Feozem	Media	1.75 a 2.5
Fluvisol	Rápida	> 2.5
Gleysol	Muy lenta	< 0.25
Histosol	Media	1.75 a 2.5
Litosol	Media	1.75 a 2.5
Luvisol	Lenta	0.25 a 1.75
Planosol	Lenta	0.25 a 1.75
Regosol	Media	1.75 a 2.5
Solonchak	Muy lenta	< 0.25
Vertisol	Muy lenta	< 0.25

Fuente: Ortiz y Ortiz, 1990

Cálculo de la precipitación efectiva en la ZMCM

En términos generales en la ZMCM la disponibilidad del agua depende de la precipitación que produce la recarga al acuífero y el escurrimiento superficial; en este estudio, un balance diario fue realizado para calcular la precipitación efectiva para cada tipo y uso de suelo observado en la ZMCM, la anterior definición de precipitación efectiva incluye tanto la precipitación que se infiltra, el interflujo y el escurrimiento; por lo tanto, se cree que el caudal a considerar como una posible recarga inducida al sistema acuífero, es del orden de los 5.20 m³ s⁻¹ provenientes de las redes de abastecimiento.

La recarga a un acuífero puede ocurrir en forma directa o indirecta (Lerner *et al.*, 1990). La recarga directa ocurre por infiltración de la precipitación; sin embargo, no toda el agua que se infiltra se convierte en recarga real ya que alguna cantidad se desvía como interflujo (Church, 2005). La recarga indirecta puede ocurrir por infiltración de agua superficial, interflujo y escurrimiento de áreas menos permeables (Bradbury y Rushton, 1998). Hay varios métodos para calcular la recarga a un acuífero, instrumentos de percolación, cambios en los niveles del agua subterráneos, modelos de balance del agua, entre otros.

El método convencional de balance de humedad del suelo de Penman-Grindley (Penman, 1948, 1950; Gindley, 1967, 1969, Howard y Lloyd, 1979) considera la recarga como una función de la precipitación efectiva; en este estudio, una versión modificada del método referenciado (Herrera-Pantoja y Hiscock, 2008) fue utilizada para calcular la recarga potencial o la precipitación efectiva (Hxr); en el cual los valores diario de agua aprovechable (AWC) y su porcentaje correspondiente de agua de fácil acceso (FAW) son utilizados para indicar la

velocidad a la cual el déficit de humedad de suelo, evapotranspiración real y recarga potencial ocurren. La pérdida del agua o la evapotranspiración real (AE) es simulada como una función del contenido de agua del suelo, las características de la vegetación y la evapotranspiración potencial (PE), de esta manera cuando la precipitación sobrepasa la evapotranspiración potencial el agua se infiltra y el déficit de humedad del suelo disminuye; la recarga potencial ocurre cuando no hay déficit de humedad en el suelo, de igual forma cuando la evapotranspiración potencial sobrepasa la precipitación, el déficit de humedad del suelo aumenta hasta el punto en que el FAW se agota y AE disminuye su velocidad ($AE/PE = 0.1$) hasta que el máximo valor de AWC es alcanzado, y después del cual no es posible que AE se produzca.

RESULTADOS OBTENIDOS

De acuerdo al modelo GFDLCM2 bajo el escenario A1B la temperatura promedio anual para el periodo 2046-2085 en la ZMCM se incrementará aproximadamente 1 °C, mientras que de acuerdo al escenario B1 el incremento promedio anual sería de alrededor de 0.3 °C; de acuerdo a este modelo podría ocurrir un decremento de temperatura durante la época de lluvias y un incremento durante la temporada invernal (Figura 1). El análisis anual indicó que para algunos años la anomalía de temperatura para el escenario A1B podría estar cerca de los 2 °C, además se observa un marcado incremento de la anomalía a partir del segundo periodo de 20 años simulado, es decir, a partir del año 2067 (Figura 2).

En el escenario A1B la precipitación promedio anual para el periodo simulado disminuiría 20 %, mientras que para el escenario B1 se predice un incremento del 23 % (Figura 3), el anterior incremento no sólo se daría en la cantidad, sino también en la intensidad; de otro lado los eventos con intensidades mayores a 60 mm en 24 h podrían incrementarse entre 150 y 200 % (Figura 4).

En general, los efectos del cambio climático simulados por el modelo GFDLCM2_A1B para el periodo 2046-2085 esbozan un panorama con una disminución en la precipitación promedio anual y un incremento en evaporación potencial que resulta en una disminución de la precipitación efectiva; mientras que para el escenario B1 se proyecta aumento de precipitación y disminución de evapotranspiración por lo que hay un incremento en la precipitación efectiva promedio anual, el anterior incremento se daría durante la época de lluvias cuando la temperatura promedio podría disminuir (Figura 5). Los resultados de estas simulaciones se traducirían en un volumen de agua escurrido de $15.54 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para el escenario A1B, o de $20.17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para el escenario B1 para la zona urbana de la ZMCM y en un volumen de recarga de $11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para la zona de conservación (Tabla 2).

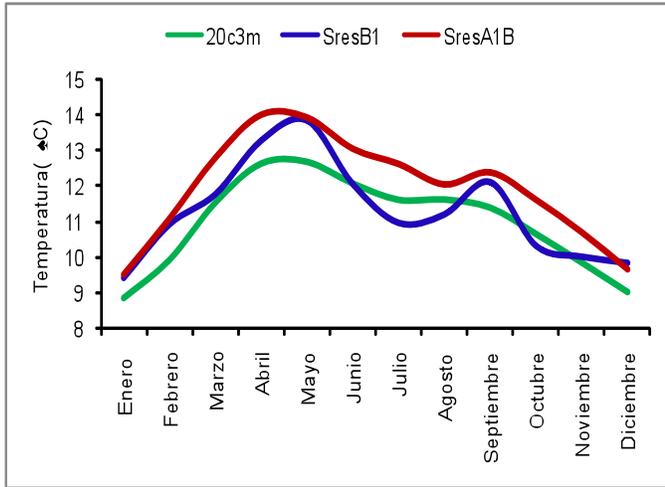


FIGURA 1. Temperatura promedio mensual, escenario A1B y B1, periodo 2046-2085

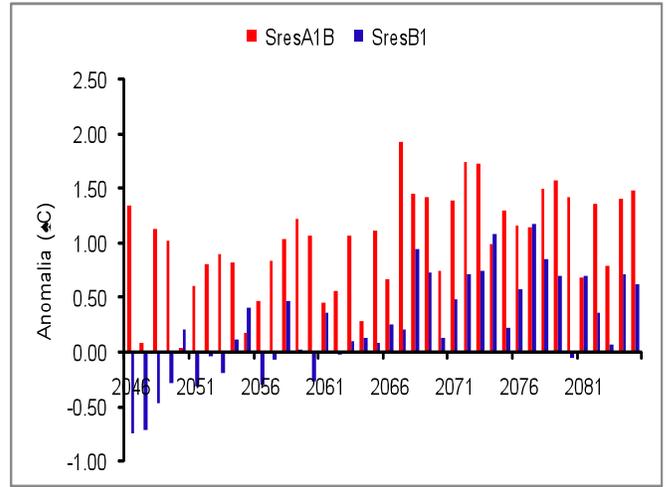


FIGURA 2. Anomalia de temperatura (°C), escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085

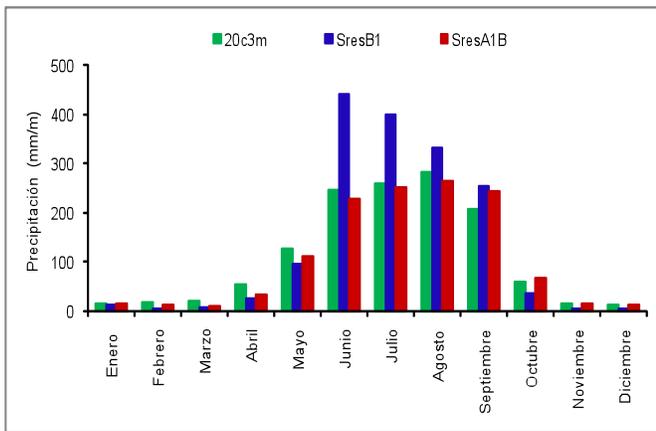


FIGURA 3. Precipitación promedio mensual, escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085

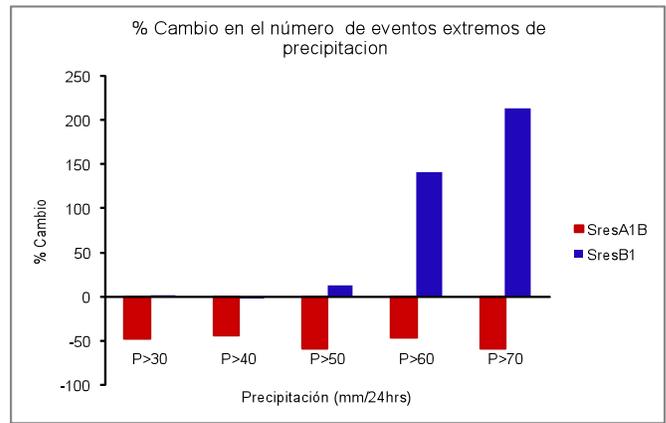


FIGURA 4. Porcentaje de cambio en el número de eventos extremos de precipitación, escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085

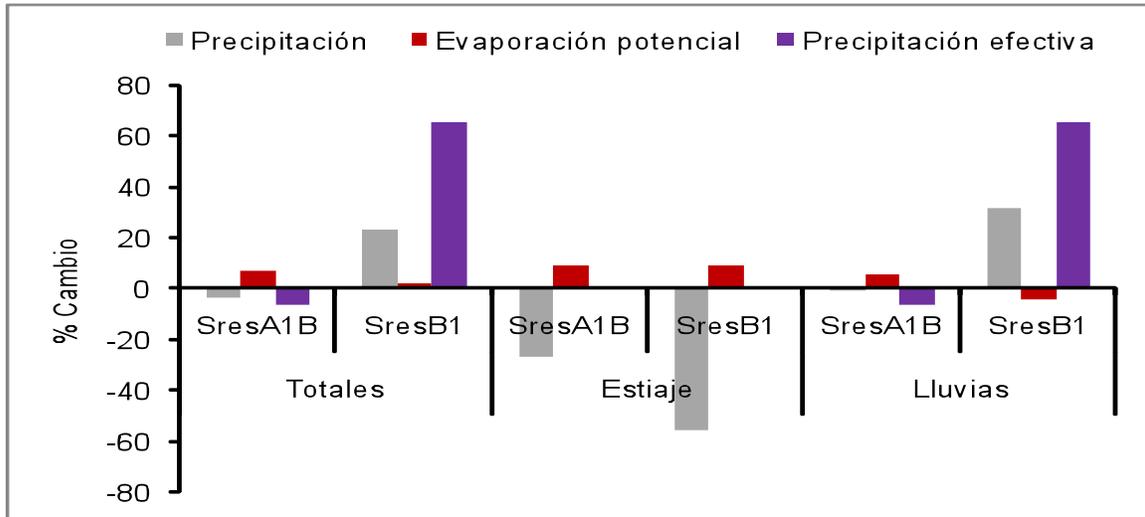


FIGURA 5. Porcentaje de cambio en la precipitación promedio anual, evaporación potencial y precipitación efectiva, escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085

TABLA 2. Volumen de escurrimiento para la Zona Norte, volumen de recarga natural para la Zona Sur (escenarios A1B y B1, periodo 2046-2085) y línea base

Escenario	Precipitación efectiva (m/año)	Volumen (m ³ /año)	Volumen (m ³ /s)
Zona Norte		Escurrecimiento	
Línea base	0.65	515,994,750	16.36
A1B	0.62	489,937,433	15.54
B1	0.80	636,151,050	20.17
Zona Sur		Recarga natural	
Línea base	0.36	210,630,000	6.68
A1B	0.34	197,992,200	6.28
B1	0.59	349,645,800	11.09

A partir de los resultados anteriormente presentados, se prevén dos consecuencias que pueden tener un impacto significativo en el sistema de abasto del servicio de agua y drenaje:

1. Aumento en la demanda de agua derivado de mayores niveles de temperatura promedio en el valle de México.

2. Cambio de las precipitaciones que afectarían de manera diferenciada en el suelo de conservación y en el de uso urbano; en el suelo de conservación impactaría la cantidad de agua que se recarga en el acuífero y en el suelo urbano afectaría la cantidad de agua pluvial que recibe el sistema de drenaje.

Para observar los patrones de aumento de consumo de agua relacionado con la temperatura, se analizó la información del consumo en las delegaciones que presentaron la tendencia esperada en la época de estiaje, de los cuales los casos más representativos y consistentes fueron Gustavo A. Madero (2006 y 2008), Miguel Hidalgo (2004, 2006, 2007 y 2008), Azcapotzalco (2005 y 2006) y Álvaro Obregón (2006, 2007 y 2008).

A partir de los promedios de consumo de las delegaciones seleccionadas, se observa una tendencia con aumento de 2.3 % en promedio durante años no calurosos y en un año caluroso de 8.3 % (Figura 6); sin embargo es importante mencionar que en la Delegación Gustavo A. Madero la demanda aumentó 19 % en 2006.

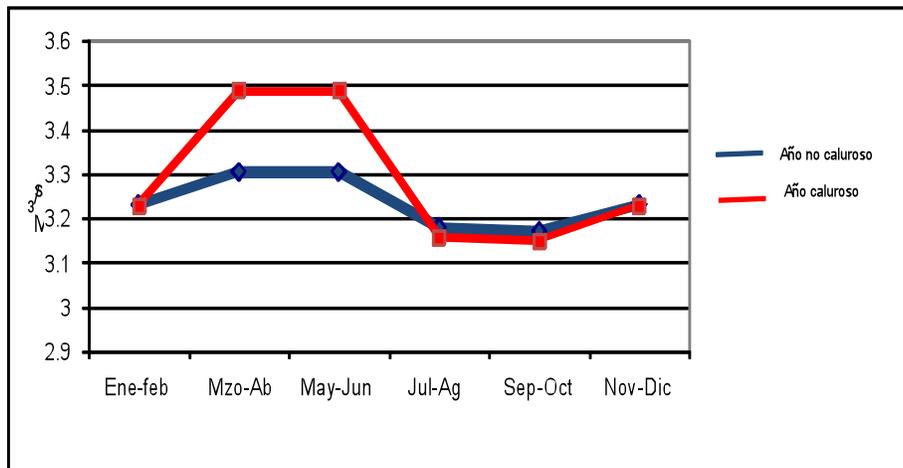


FIGURA 6. Comparación del consumo de agua (m^3s^{-1}) en años calurosos y no calurosos

De acuerdo a la tendencia anterior, en el escenario B1 se proyectaría un aumento probable de 30 millones de m^3 anuales (9.83 % adicional) en el consumo de agua, con los mayores impactos en el primer semestre del año; mientras que para el escenario A1B el incremento anual sería de 93 millones de m^3 (30.3 % adicional), con un incremento de la demanda sostenido a lo largo del año (Figura 7).

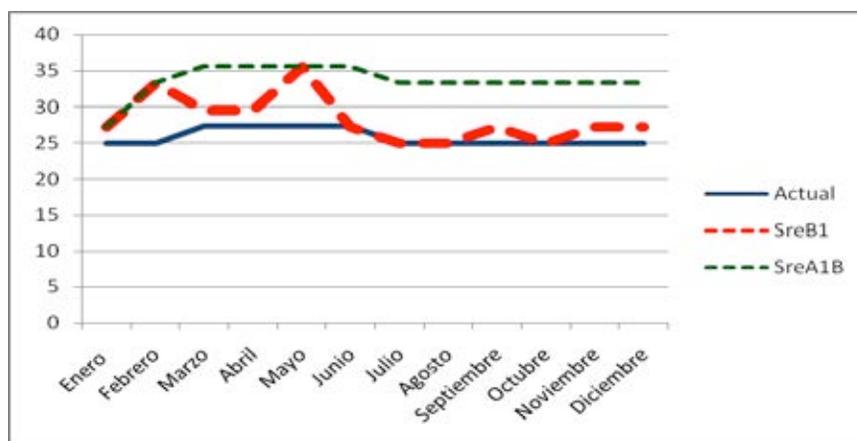


FIGURA 7. Patrones de consumo para los escenarios B1 y A1B

Con relación a la precipitación, en la Ciudad de México, el agua de lluvia tiene 2 destinos principales: la recarga de los acuífero en el suelo de conservación y el agua pluvial que se descarga al drenaje en el suelo urbano, lo anterior significa que para los cambios proyectados por el escenario A1B, el cual presenta condiciones más parecidas a las actuales, en la zona urbana se reduciría 5 % el agua pluvial hacia el drenaje, lo que reduciría moderadamente los problemas asociados a inundaciones; mientras que en el suelo conservación se reduciría 6 % el volumen de recarga natural.

Sin embargo, en el caso del escenario B1, donde los patrones de precipitación se modifican sustancialmente; por un lado, aumentaría la cantidad de agua que sería posible capturar en el suelo de conservación en el cual actualmente se estima que se recargan 6.68 m³/s, bajo este escenario sería posible aumentar la recarga a 11.09 m³/s, lo que representa un incremento del 66 %. A partir del aumento en la infiltración, las autoridades podrían decidir no extraer este excedente para aliviar la situación de sobreexplotación del acuífero o bien contar con 4.4 m³/s adicionales para canalizarlos al sistema de abasto de agua.

Por el lado del agua pluvial en la zona urbana, el aumento de agua descargada por el drenaje actualmente es de 16.33 m³/s, bajo este escenario la cantidad de agua que se descargaría aumentaría a 20.17 m³/s; esto representa un incremento de 23% de las descargas de agua pluvial hacia el drenaje, con el consecuente riesgo de inundaciones y problemas relacionados.

CONCLUSIONES

En la ZMCM dado el deterioro del servicio de agua es de gran importancia conocer el riesgo adicional que se impondrá debido a cambios en los patrones de precipitación y temperatura;

por lo tanto, es de vital importancia generar diferentes escenarios futuros de cambio climático que permitan conocer la vulnerabilidad a condiciones anómalas en el clima y proponer estrategias para enfrentar dichas situaciones adversas.

En general los efectos del cambio climático simulados por el modelo GFDLCM2 para el periodo 2046-2085 para el escenario A1B indican un escenario con una disminución en la precipitación promedio anual y un incremento en evaporación potencial que resulta en una disminución de la precipitación efectiva. La simulación para el escenario B1 presenta un escenario en el que hay aumento de precipitación y disminución de evapotranspiración por lo que hay un incremento en la precipitación efectiva promedio anual.

Si bien uno de los principales objetivos de este estudio es contar con una herramienta adecuada para la toma de decisiones, es muy importante considerar que hay muchas incertidumbres inherentes al uso de los GCMs y de los supuestos realizados en cada paso del proceso.

A pesar de las incertidumbres, el estudio presenta evidencia que confirma que la ZMCM es una ciudad con un nivel bajo de resiliencia, lo anterior representa un peligro latente de deterioro del servicio que puede poner en riesgo el acceso al agua aún sin considerar los impactos del cambio climático.

A partir de los resultados que se obtuvieron de los modelos se prevé, con un nivel de certidumbre alto, que aumentará la demanda de agua, derivado de mayores niveles de temperatura promedio en el Valle de México; el aumento en la demanda puede generar una reducción en la oferta, que actualmente ya se presenta en diversas delegaciones, lo que llevaría a que los hogares enfrenten recortes sistemáticos y severos del servicio, sobre todo durante la época de estiaje.

Con menor certidumbre y mayor discrepancia sobre los resultados, se resalta que el cambio de las precipitaciones afectaría de manera diferenciada en el suelo de conservación y en el de uso urbano. Como se mencionó anteriormente, en el suelo de conservación impactaría la cantidad de agua que se recarga en el acuífero y en el suelo urbano afectaría la cantidad de agua pluvial que recibe el sistema de drenaje. Uno de los escenarios presenta la posibilidad de riesgos de infraestructura de drenaje insuficiente, con el consecuente riesgo de inundaciones y problemas relacionados con la protección civil.

En la discusión sobre medidas de adaptación, se resalta la importancia de llevar a cabo las acciones necesarias para reducir las deficiencias del sistema actual, a través de una serie de políticas que ya han sido presupuestadas, lo anterior llevaría a una adaptación autónoma, es decir, se aumentaría el nivel de resiliencia de la ciudad; una vez implementadas medidas propuestas, se debe contemplar que el cambio climático impondrá otros costos derivados del aumento en la demanda de agua y posibles costos asociados a la infraestructura de drenaje y

de esquemas de protección civil; sin embargo, existe la alternativa de que las autoridades también puedan explotar los beneficios del cambio climático, sobre todo en términos del potencial de recarga del acuífero y del uso de sistemas de captación de agua pluvial, en este punto se enfatiza la recomendación de utilizar un enfoque de Gestión Integrada del Recurso del Agua, el cual considera un rango de procesos y acciones de oferta y la demanda, de manera que pueda obtenerse una perspectiva equilibrada de las estrategias a seguir.

REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. Rep. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Arnell, N. W., 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, (14), 31-52.

Arredondo, J. C., 2007. Adapting to impacts of climate change on water supply in Mexico City. *Fighting climate change: Human solidarity in a divided world. Human Development Report 2007/2008.*

Bateman, I. J., Carson, R. T., Day, B., Hanemann, W.M., Hanley, N. T., Hett, M. J., Loomes, G., Mourato, S., Özdemiroglu, E., Pearce, D.W., Sugden, R. & Swanson, J., 2002. *Economic valuation with stated preference techniques: A manual.* Cheltenham: Edward Elgar Publishing.

Baumann, D. D., Hanemann, W. M. & Boland, J. J., 1998. *Urban water demand management and planning.* New York: McGraw-Hill.

Birkle, P., Rodriguez, V. T. & Partida, E. G., 1998. The water balance for the basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*, 6(4), 500-517.

Both, C. & Visser, M. E., 2001. Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. *Nature*, (411), 296-298.

Boorman, D. & Sefton, C. 1997. Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climatic Change*. 35(4), 15-434.

Bradbury, C. G. & Rushton, K. R., 1998. Estimating runoff-recharge in the Southern Lincolnshire limestone catchment. UK. *Journal of Hydrology*, (211), 86-99.

Burrough, W. J., 2001. *Climate change. A multidisciplinary approach.* Cambridge: University Press.

Castelán, E., 2002. Water management in the Mexico City metropolitan area: The hard way to learn. Third World Centre for Water Management. Research Report 7.

Church, R., 2005. A groundwater recharge methodology for water framework directive initial characterization in Scotland. *Scottish Journal of Geology*, (41), 31-37.

Climatic research unit. 2007. Global temperature record. [En línea]. Disponible <http://www.cru.uea.ac.uk>

CONAGUA., 2008. Programa de sustentabilidad hídrica de la Cuenca del Valle de México [Presentación de PowerPoint]. [En línea]. Disponible http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Programa_sustentabilidad_hidrica.pdf

CONAGUA-SEMARNAT., 2008. Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco de Tula, Estado de Hidalgo: Memoria del proyecto. México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento y Coordinación de Proyectos de Saneamiento del Valle de México.

CONAPO., 2000. Proyecciones de la población por municipios y por localidad 2000-2030. [En línea]. Disponible. <http://www.conapo.gob.mx/micros/proymunloc/index.html>.

Consejo Consultivo de Cambio Climático., 2007. Estrategia nacional de cambio climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, SEMARNAT, México.

Crick, H. Q. P., Dudley, C., Glue, D. E. & Thomson, D. L., 1999. Climate change related to egg-laying trends. *Nature*, (399), 423-424.

DEFRA., 1998. REGIS- Regional climate change impact and response studies in East Anglia and North West England. London: Department for Environment, Food & Rural Affairs.

De Vries, G. E., 2000. Climate changes leads to unstable agriculture. *Trends in Plant Science*, (5), 367.

DGCOH, 1997. Plan Maestro de Agua Potable del Distrito Federal, 1997-2010, México: Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Departamento del D.F.

Dinar, A. 2000., The political economy of water pricing reforms. Washington, D.C: World Bank by Oxford University Press.

Durazo, J., 1996. Ciudad de México. Acuitardo superficial y contaminación acuífera. *Ingeniería Hidráulica en México*, XI (2), 5-14.

Ericson, J. P., Vorosmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L.G. & Meybeck, M., 2006. Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, (50), 63-82.

Esteller, M. V. & Diaz, C., 2002. Environmental effects of aquifer overexploitation: A case study in the highlands of Mexico. *Environmental Management*, 29(2), 266-278.

GDF., 2004. Resolución de carácter general mediante la cual se determina y se dan a conocer las zonas en las que los contribuyentes de los derechos por el suministro de agua en sistema medido, de uso doméstico o mixto, reciben el servicio por tandeo. *Gaceta Oficial del Distrito Federal* 7 de julio del 2004. Gobierno del Distrito Federal. [En línea]. Disponible http://www.consejeria.df.gob.mx/gaceta/pdf/julio04_7_64.pdf

GDF., 2007. Resolución de carácter general mediante la cual se determinan y se dan a conocer las zonas en las que los contribuyentes de los derechos por el suministro de agua en sistema medido, de uso doméstico o mixto, reciben el servicio por tandeo. *Gaceta Oficial del Distrito Federal* 2 de agosto del 2007. Gobierno del Distrito Federal. [En línea]. Disponible. http://www.consejeria.df.gob.mx/gaceta/pdf/Agosto07_02_139.pdf

GDF., 2008. Resolución de carácter general mediante la cual se determinan y se dan a conocer las zonas en las que los contribuyentes de los derechos por el suministro de agua en sistema medido, de uso doméstico o mixto, reciben el servicio por tandeo. *Gaceta Oficial del Distrito Federal* 24 de marzo del 2008. Gobierno del Distrito Federal. [En línea]. Disponible http://www.consejeria.df.gob.mx/gaceta/pdf/MARZO2408_298.pdf

GDF, SMA, SOS y SACM., 2007. Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México. [En línea]. Disponible http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/pdf/ProgAgua_Cd.pdf

Gómez J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J. & Martínez, M., 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*, (21), 35-56

González, T., Rodríguez, R. & Cortes, S. A., 1999. The basin of Mexico and its metropolitan area: water abstraction and related environmental problems. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6), 607-613.

Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B. & Wood, R. A., 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, (16), 147-168.

Grindley, J., 1967. The estimation of soil moisture deficits. *Met.O.785, The Meteorological Magazine*.

- Grindley J., 1969. The calculation of actual evaporation and soil moisture deficits over specified catchment areas. Memoir No. 38. Meteorological Office, Bracknell.
- Hall, D., 1996. Marginal cost rate design and wholesale water markets. In *Advances in the economics of environmental resources* Greenwich I, Connecticut: Jai Press.
- Hanley, N., 2001. Cost - benefit analysis and environmental policymaking. *Environment and Planning C*, 19(1), 103-118.
- Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A., 1982. Estimation of potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, (108), 223-230.
- Herrera-Pantoja M., & Hiscock, K. M., 2008. The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain. *Hydrological Processes*, (22), 73-86.
- Hess, T., 1996. Evapotranspiration estimates for water balance scheduling in the UK. *Irrigation New*, (25), 31-36.
- Hirshleifer, J., Milliman, J. W. & De Haven, J. C. 1960. *Water supply: economics, technology and policy*. Chicago, London: University of Chicago Press.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. J. & Ephraums, J. J. 1990. *Climate change: The IPCC scientific assessment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Howard, K.W.F. and Lloyd, J.W. 1979 The sensitivity of parameters in the Penman evaporation equation and direct recharge balance. *Journal of Hydrology* (41), 329-344.
- Hughes, L., 2003. Climate change and Australia: trends, projections and impacts. *Austral Ecology*, (28), 423-443.
- Hulme, M. & Brown, O., 1998. Portraying climate scenario uncertainties in relation to tolerable regional climate change. *Climate Research*, (10), 1-14.
- Hulme, M., Jenkins, G.J., Lu, X., Turnpenny, J.R., Mitchell, T.D., Jones, R.G., Lowe, J., Murphy, J.M., Hassell, D. & Boorman, P., 2002. *Climate change scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 scientific report*. Norwich: UKCIP02, Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia.
- INEGI., 1988. *Atlas Nacional del Medio Físico, México*.
- INEGI, 1981. *X Censo de Población. Resultados Definitivos, México*.
- INEGI., 1989. *Cartas edafológicas, escala 1: 50 000, México*.
- INEGI, 1991. *X Censo de Población. Resultados Definitivos, México*.

- INEGI., 2000. SCINSE por colonia 2000. XII Censo de Población y Vivienda.
- INEGI., 2000. Carta edafológica, escala 1: 250 000. México.
- INEGI., 2001. X Censo de Población. Resultados Definitivos, México.
- INEGI., 2002. Estadísticas del medio ambiente del D.F. y ZMVM 2002. [En línea]. Disponible
http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/so_ciodemografico/medioambdf/2002/archivo1.pdf
- INEGI., 2003. Cartografía geoestadística urbana. México.
- IPCC., 2001. Climate change 2001: Impacts adaptation and vulnerability. Summary for policymakers. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC., 2007. Climate change 2007: synthesis report summary for policymakers. Assessment of Working groups I, II and III to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jauregui, E., 2000. El clima de la ciudad de México. Mexico: Plaza y Valdes editores.
- Johnstone. N., 1997. Economic inequality and the urban environment: the case of water and sanitation. London: International Institute for Environment and Development.
- Jones, P. D. & Moberg, A., 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, (16), 206-223.
- Jones, P. D., New, M., Parker, D. E., Martin, S. & Rigor, I. G. 1999. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, (37), 173-199.
- Landa, R., Magaña, V. & Neri, C., 2008. Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México: Servicios y Publicaciones Grande, S.A. de C.V.
- Lecocq, F. & Shalizi, Z., 2007. Balancing expenditures on mitigation of and adaptation to climate change: An exploration of issues relevant to developing countries. Washington, DC: The World Bank, Development Research Group- Sustainable Rural and Urban Development Team.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. and Simmers, I., 1990. Groundwater Recharge. A guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. Heise, Hannover. International Association of Hydrogeologists.

- Loaiciga, H. A., 2003. Climate change and ground water. *Annals of the Association of American Geographers*, (93), 30-41.
- López, R. R., 1988. Geomorfología. Atlas de la Ciudad de México, Fascículo 2 “Características físico-geográficas y primeros pobladores de la Cuenca de México. Departamento del Distrito Federal y El Colegio de México.
- Lugo, H. J., 1984. Geomorfología del sur de la Cuenca de México, Instituto de Geografía, UNAM, Serie Varia 1, núm. 9
- Lugo, H. J., Mooser F., Pérez V. A. y Zamorano O. J., 1994. Geomorfología de la sierra de Santa Catarina, D.F., México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (11), 43-52.
- Manabe, S. & Bryan, K., 1985. CO₂-induced change in a coupled ocean-atmosphere model and its paleoclimatic implications. *Journal of Geophysical Research*, (90), 689-707.
- Martínez, L., 2005. Propuesta de reestructuración tarifaria. Manuscrito no publicado.
- Martínez, P., Aguilar, A., 2008. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, II.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. & White, K. S., 2001. Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Mearns, L. O., 1999. Comparative response of EPIC and CERES crop models to high and low resolution climate change scenarios. *Journal of Geophysical Research*, (104), 6623-6646.
- Mendoza, V. Villanueva, E., Maderey, L. in Martínez, J. Fernandez, A. 2002. Cambio climático: una visión desde México. México: SEMARNAT-INE.
- Mendoza, V. M., Villanueva, E. E. , Adem, J., 1997. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research*, (9),139-145.
- Miller, K. & Yates, D.. 2005. Climate change and water resources: A primer for municipal water providers. USA: National Center for Atmospheric Research and Awwa Research Foundation.
- Mishra, S. K. & Singh, V. P. , 2003. Soil conservation service curve number (SCS -CN). Methodology Water Science and Technology Library, Washington. Nicholls, N., Gruza, G.V., Jouzel, J., Karl, T.R., Ogallo, L. A. 1996. Observed climate variability and change. In J. T. Houghton et al. (eds), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge: University Press.

Mooser, H. F., 1988. Geología de la Cuenca de México. Atlas de la Ciudad de México, (2), 23-26.

Mooser, H. F. y Molina, C., 1993. Nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca de México, Revista del Centro de la Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra A. C., 3, (1).

National Drought Mitigation Center. [En línea]. Disponible <http://www.drought.unl.edu/index.htm>

Nicholls, N., Gruza, G. V., Jouzel, J., Karl, T. R. & Ogallo, L. A., 1996. Observed climate variability and change. In J. T. Houghton (Ed.). Climate change 1995: The science of climate change. Cambridge: Cambridge University Press.

Noll, R. G., 2002. The economics of urban water systems. Thirsting for efficiency: the economics and politics of urban water system reform. (M. M. Shirley, Ed.). Oxford: Pergamon.

OMS y UNICEF., 2000. Evaluación mundial del abastecimiento de agua y saneamiento en 2000. [En línea]. Disponible http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/2000globals1.pdf

ONU., 2003. Agua para todos, agua para la vida: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. ONU. NY: UNESCO, Berghahn Books.

Oversas Project Management Consultants (OPMAC) y Eco-fin Consultores, 2000. Estudio para la recarga del acuífero en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, Banco Interamericano de Desarrollo-GDF.

Ortega-Guerrero, A., Cherry, J. A. & Rudolph D. L., 1993. Large-scale aquitard consolidation near Mexico city. Ground Water, 31(5), 708.

Ortiz, V. B. y Ortiz, S. C. A., 1990. Edafología. México: Universidad Autónoma Chapingo, 7ª edición, 394.

Parrilla, G., Lavin, A., Bryden, H., Garcia, M. & Millard, R., 1994. Rising temperatures in the subtropical North Atlantic Ocean over the past 35 years. Nature, (369), 48-51.

Pearce, D. W., 1998. Cost-benefit analysis and environmental policy. Review of Economic Policy, (14), 84-100.

Pearce, D. W., 1998a. Environmental appraisal and environmental policy in the European Union. Environmental and Resource Economics, (11), 489-501.

- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society, Series A*, (193), 120-145.
- Penman, H. L., 1950. The water balance of the Stour catchment area. *Journal of the Institution of Water Engineering*, (4), 457-469.
- Penuelas, J. & Boada, M., 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, (9), 131-140.
- Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R. & Stratton, R. A., 2000. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model -- HadAM3. *Climate Dynamics*, (16), 123-146.
- Priestley, C. H. B. & Taylor, R. J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, (100), 81-92.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento territorial del Distrito Federal., 2009. Mapa de Eventos de Inundación en 2008. [En línea]. Disponible <http://www.paot.org.mx/>
- Renzetti, S. 2002. *The economics of water demand*. Boston: Kluwer Academic Publisher.
- Russell, C. S. 2000. *Applying economics to the environment*. New York: Oxford University Press.
- SACM-IMTA. 2006 (a). Estudio para obtener la disponibilidad del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, GDF.
- SACM-IMTA. 2006 (b). Modelo hidrodinámico del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal.
- SACM-IMTA. 2006 (c). Medición de los niveles estáticos de pozos piloto en el valle de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, GDF.
- Sánchez, L. F. & Gutiérrez, C., 1997. Overexploitation effects of the aquifer system of Mexico City. *Problems, processes and management*, 1.
- SEMARNAT., 2003 (31 de enero). Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., & Chen, Z., 2007. Technical summary. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: University Press.

Soto Montes de Oca, G., 2007. Agua: Tarifas, escasez y sustentabilidad en las megaciudades ¿Cuánto están dispuestos a pagar los habitantes de la Ciudad de México, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Universidad Iberoamericana, Centro de Estudios Jurídicos y Ambientales y Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F.; México D.F.

Soto Montes de Oca, G., 2008. “Diagnóstico sobre la situación del riesgo y vulnerabilidad de los habitantes del Distrito Federal al no contar con el servicio de agua potable, como base para el análisis del Derecho Humano al Agua y los derechos colectivos de los habitantes”. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT)

Stern, N. (2006). Stern review: The economics of climate change. HM Treasury, London. [En línea]. Disponible http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm

Stouffer, R. J., Manabe, S. & Vinnikov, K. Y., 1994. Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. *Nature*, (367), 634-636.

Stratus Consulting, Inc., 2004. Adaptación al cambio climático: Hermosillo, Sonora, un caso de estudio. México: Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de Sonora.

Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R., 1955. The water balance. New Jersey: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology.

Tortajada, C., 2006. Who has access to water? Case study of Mexico City metropolitan area. Background paper for the Human Development Report 2006. [En línea]. Disponible http://hdr.undp.org/hdr2006/background_docs.cfm

Turner, R. K., 1993. Sustainable environmental economics and management: principles and practice. London, New York: Belhaven Press Co-published in the Americas by Halsted Press.

Vázquez, S. E. y Jaimes P. R., 1989. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, (28), 133-190.

Viner, D., 2006. Tourism and its Interactions with climate change. *Journal of Sustainable Tourism*, (14), 317-322.

Vitousek, P. M., 1994. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, (75), 1861-1876.

Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O. & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, (416), 389-395.

Warren, C. J. & Rudolph, D. L., 1997. Clay minerals in basin of Mexico lacustrine sediments and their influence on ion mobility in groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 27(3-4), 177-198.

Wegelin-Schuringa, M., 2001. Water demand management and the urban poor. Netherlands: International Water and Sanitation Centre.

Whittington, D. & Swarna, V., 1994. The economic benefits of potable water supply projects to households in developing countries. Manila: Asian Development Bank.

Wilby, R. L., 1998. Statistical downscaling of daily precipitation using daily airflow and seasonal teleconnection indices. *Climate Research*, (10), 163-178.

WMO. 2002. World Meteorological Organization statement on the status of global climate in 2002. Geneva: World Meteorological Organization.

WB. 2008. Climate resilient cities: A primer on reducing vulnerabilities to climate change impacts and strengthening disaster risk management in East Asian cities. [En línea]. Disponible www.worldbank.org/eap/climatecities

Yusoff, I., Hiscock, K.M. and Conway, D. 2002. Simulation of the impacts of climate change on groundwater resources in eastern England. In: *Sustainable Groundwater Development*. (eds K.M. Hiscock, M.O. Rivett and R.M. Davison). Geological Society Special Publication 193, Geological Society, London.

Zerah, M. H., 1998. How to assess the quality dimension of urban infrastructure: The case of water supply in Delhi. *Cities*, 15(4), 285-290.

CAPÍTULO III

Recurso Aire, Sector Salud

Efecto de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias pediátricas en la Ciudad de México de 2000 a 2002

Horacio Riojas Rodríguez¹, Magali Hurtado Díaz¹, Alhelí Brito Hernández¹, José Luis Texcalac Sangrador¹

RESUMEN

Uno de los contaminantes particularmente sensible a cambios en el clima es el ozono (O₃), debido a que las reacciones químicas dependen de varios factores, entre ellos, la temperatura, y por ello, la variabilidad en los niveles de ozono está relacionada a las condiciones climáticas calurosas. El incremento en las concentraciones de ozono se ha asociado con niveles más altos de admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, en las personas de 65 años y más. Igualmente, estudios realizados en la ZMCM, han asociado los niveles elevados de ozono con el incremento en el número de consultas por asma. Además, existe evidencia científica de la asociación del ozono con la temperatura y la salud humana. El objetivo general de este estudio fue evaluar la asociación de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias pediátricas (menores de 15 años) en la Ciudad de México durante el periodo 2000 - 2002, así como los factores adicionales que afectan esta relación. Específicamente el estudio examinó con detalle el impacto de la exposición al O₃ en el total de las admisiones hospitalarias como en el ingreso por causas respiratorias; además se buscó estimar el impacto del incremento de la temperatura sobre la salud humana ajustando esta asociación por los niveles de O₃, PM₁₀ y humedad relativa. El impacto de la investigación fue la recopilación y sistematización de una importante base estadística, que sigue siendo limitada y requiere ser completada para poder evaluar correctamente las relaciones entre cambio climático y salud humana. A pesar de esta limitación, se pudieron medir los niveles de riesgo a la salud humana por efectos climáticos (cambios en la temperatura, la humedad y la concentración de ozono). También se logró un avance en el análisis de la relación que existe entre la temperatura con el ozono y los ingresos hospitalarios por tipo de enfermedad respiratoria en el Distrito Federal y se desarrollaron modelos que permitieron determinar las variables más significativas y las que restringen la obtención de resultados significativos.

¹ Instituto Nacional de Salud Pública

INTRODUCCIÓN

El problema de la calidad del aire en la ZMCM ha alcanzado grandes dimensiones. El crecimiento de la población y la demanda de servicios han incrementado las necesidades de energía y transporte, siendo la contaminación industrial por combustión la principal fuente de contaminación atmosférica. La concentración de los contaminantes atmosféricos depende entre otros factores de diversos aspectos climatológicos como son la temperatura, la velocidad del viento, el movimiento de los sistemas de altas y bajas presiones y la topografía local.

La ZMCM se localiza dentro de una zona de montañas y valles y por su ubicación geográfica se ve impactada por sistemas anticiclónicos (ubicados en el Golfo de México y en el Océano Pacífico) que ocasionan estabilidad atmosférica inhibiendo el movimiento ascendente de aire y la formación de nubosidad, provocando que una gran cantidad de radiación solar incida sobre la superficie terrestre haciendo que la atmósfera reaccione altamente ante la presencia de la luz; de esta manera, la radiación solar constituye un primer elemento básico para que los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno reaccionen y se lleve a cabo la formación de ozono (O_3), una de las principales fuentes de contaminación fotoquímica que afecta a la población de la ZMCM.

Existen evidencias de los daños en la salud por la exposición al O_3 en niños y adultos mayores, pero dada la alta estacionalidad anual de este contaminante con valores más altos en los meses cálidos y su patrón diario con picos importantes durante las horas de irradiación solar, es probable que el incremento de la temperatura aumente su producción y por ende sus efectos en la salud. Para analizar el riesgo sobre la salud de este contaminante asociado al incremento de la temperatura, es necesario tener resultados cuantitativos a partir de estudios epidemiológicos que puedan tomarse como referencia para proponer medidas de adaptación para controlar y minimizar el posible impacto de la contaminación atmosférica y el cambio climático sobre la salud humana.

Por ello en este estudio se evaluaron los efectos de los cambios en el clima, los cambios en los niveles de contaminación por ozono y sus consecuencias en la salud de la población de la ZMCM con datos de las admisiones hospitalarias de 2000 al 2002.

OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio fue evaluar la asociación de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias pediátricas (menores de 15 años) en la Ciudad de México durante el periodo 2000 al 2002, así como los factores adicionales que afectan esta relación.

Específicamente el estudio examinó con detalle el impacto de la exposición al O_3 en el total de las admisiones hospitalarias como en el ingreso por causas respiratorias; además se

buscó estimar el impacto del incremento de la temperatura sobre la salud humana ajustando esta asociación por los niveles de O₃, PM₁₀ y humedad relativa.

METODOLOGÍA

En la presente investigación se realizó un estudio ecológico a través del análisis de series de tiempo de datos de salud y ambiente en un periodo comprendido entre enero de 2000 a diciembre de 2002. La metodología de este estudio contempló las siguientes fases.

Fase 1. Datos de hospitalizaciones

Los datos provienen del sistema automatizado de ingresos hospitalarios (SAEH) que es una base de datos de los ingresos hospitalarios de todos los hospitales de la Secretaría de Salud tanto a nivel federal como a nivel estatal, en la cual se registran los motivos de atención de pacientes hospitalizados, clasificadas de acuerdo al Código Internacional de Enfermedades (CIE). Se estima que en el sistema se registran más del 90 % de las hospitalizaciones de la Secretaría de Salud (SSA).

Se obtuvieron, a través de la Dirección de Informática y Geografía Médica del Instituto Nacional de Salud Pública, los registros diarios de 11 hospitales pediátricos (Hospital Pediátrico Azcapotzalco, Hospital Pediátrico Coyoacan, Hospital Pediátrico San Juan De Aragon, Hospital Pediátrico Villa, Hospital Pediátrico Iztacalco, Hospital Pediátrico Iztapalapa, Hospital Pediátrico Xochimilco, Hospital Pediátrico Peralvillo, Hospital Pediátrico Tacubaya, Hospital Pediátrico Legaria, Hospital Pediátrico Moctezuma) considerando la fecha que el paciente tiene su ingreso en el hospital (Figura 1).

Fase 2. Datos de salud y ambientales

La segunda fase de este estudio consistió en el análisis descriptivo de los datos de salud, que se relacionaron anteriormente.

Para ozono y temperatura, se obtuvieron los datos horarios de las estaciones de la red automática del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) del Gobierno del Distrito Federal. La selección de las estaciones de monitoreo utilizadas en este estudio se realizó siguiendo el protocolo para definir unidades geográficas basándose en los niveles de contaminación por ozono del “Estudio de Contaminación Atmosférica en Latinoamérica” (ESCALA, 2007), en este protocolo se evaluó que las estaciones de monitoreo con mediciones de ozono, tuviera concentraciones similares, de acuerdo con los valores del rango intercuartil, la mediana y la distribución de las concentraciones, considerando las estaciones de monitoreo que cumplan con un criterio de suficiencia de información de al menos 75 % de los datos diarios durante el periodo de estudio. Se consideraron solo las estaciones de monitoreo que se ubican dentro de las delegaciones de la ZMCM (Figura 1).

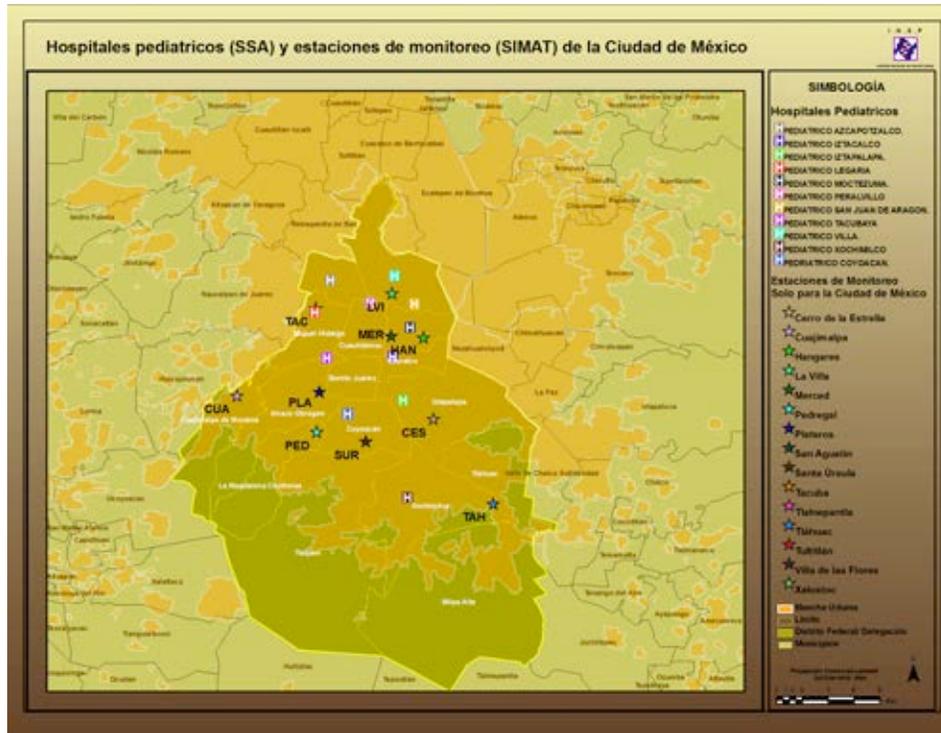


FIGURA 1. Localización de hospitales pediátricos y estaciones de monitoreo

Fase 3. Plan de análisis

Se evaluaron todas las causas de enfermedad, excepto externas, y respiratorias, agrupadas en base a la Clasificación Internacional de Enfermedades en su décima revisión (CIE-10), esta fueron: enfermedades por todas las causas, (A00-T98, Z00-Z99) y enfermedades del sistema respiratorio: Infecciones respiratorias agudas (J00-J06, J20-J22), enfermedad pulmonar obstructiva crónica (J40-J44, J46-J47), influenza y neumonía (J090-J19) y asma bronquial (J45).

En cuanto a la asignación de la exposición, de un total de 20 monitores de O_3 , 16 de PM_{10} y 15 de temperatura que registran sus niveles en todo la CM se seleccionaron, 15, 13 y 11 respectivamente, en base a la representatividad de sus datos. Se agruparon los monitores en base a su variable de medición y se obtuvieron los niveles diarios de los mismos. Para el O_3 se obtuvo el máximo de promedios móviles de 8 h y máximo de 1 h, para las PM_{10} el promedio de 24 h y para la temperatura el promedio, mínimo y máximo. Estos niveles diarios se asignaron al total de conteos ocurridos en el mismo día en la CM.

Se realizó un estudio ecológico con un análisis retrospectivo de series de tiempo mediante Modelos Aditivos Generalizados (GAM) con regresión Poisson. Los GAM permiten el ajuste de potenciales confusores que guardan una asociación lineal o de otro tipo, con la variable de interés, mediante el suavizamiento no paramétrico de los mismos a través de la aplicación de *splines* naturales. Las variables de ajuste fueron: la estacionalidad (tiempo), la

humedad, los días feriados, el ozono y las PM10. Para cada una de las covariables: tiempo, humedad, ozono y PM10, se probaron distintos grados de los suavizadores con el fin de remover la estacionalidad y tendencias a largo plazo de las variables. Así se establecieron 4 grados de libertad por año para el ozono, y 2 grados de libertad por año, para material particulado y humedad relativa. El *spline* aplicado a la variable tiempo se probó con 3, 6, 9 y 12 grados de libertad por año.

La ecuación de ajuste quedó de la siguiente forma:

$$y_t \sim \text{Poisson}(E_t)$$

$$\log E_i = \beta_1 \text{Temperatura}_{i-\ell} + \beta_2 \text{Feriados}_{i-\ell} + \beta_2 \text{Temp}_{i-\ell} + ns(\text{tiempo}_{i-\ell}) + ns(\text{Ozono}_{i-\ell}) + ns(\text{pm}_{10}_{i-\ell}) + ns(\text{Hum}_{i-\ell})$$

Se aplicaron dos modelos distintos de riesgo: riesgo simple (SLM) y riesgo acumulado (DLM). El primero calculó el porcentaje de cambio en el riesgo para el día de presentarse el evento, asociado a un sólo día de exposición el cual puede ser el mismo día (lag 0) o días anteriores al mismo (Lag1-Lag ℓ), el estudio analiza los días 1 a 5 anteriores al evento. El segundo modelo calculó el porcentaje de cambio en el riesgo para un periodo de tiempo dado, pues su propósito es evaluar si el efecto de la exposición en un día específico tiene consecuencias en el número de eventos en días a futuro (efecto acumulado). Para realizar tal estimación el modelo se incluyeron datos de la exposición de días anteriores (lags) al evento. Así, estos resultados se traducen como el porcentaje de cambio del riesgo por 2, 3, 4, y 5 días asociado al incremento de 1 °C de la temperatura en días anteriores al evento; ambos modelos se ajustaron por O₃, PM₁₀ y humedad relativa.

Por otro lado, con el objetivo de controlar la estacionalidad de los ingresos durante el periodo de estudio se analizaron los datos en tres estaciones: seca caliente que comprende los meses de marzo a mayo, húmeda que comprende los meses de junio a octubre y seca fría, de noviembre a febrero.

RESULTADOS OBTENIDOS

Del total de 37,018 datos de egresos hospitalarios para todas las enfermedades, solo 9,067 correspondieron a enfermedades respiratorias (incluidas asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, infecciones respiratorias agudas e influenza y neumonía) (Tabla 1).

TABLA 1. Ingresos hospitalarios diarios por todas las causas de enfermedad y enfermedades respiratorias, D.F.

	Total de ingresos	Media	DE
Todas las enfermedades	37,018	33.78	11.13
Enfermedades respiratorias	9,067	8.27	5.31

Durante el periodo de estudio se registro un promedio de la temperatura de 16.3 °C, el cual vario por época del año, con un valor promedio de 14.2 °C en la época fría, 16.8 °C en época húmeda y 18.1 °C en época cálida.

El nivel promedio de los valores máximos de 1 hora de ozono fue de 156.62 ppb, mismo que presento una concentración mayor en la época cálida, de 166.11 ppb, seguida de las épocas húmeda, 156.78 ppb y fría, 149.15 (Ver Tabla 2).

Respecto a la tendencia anual de los niveles de ozono se tiene que de los 1096 días del periodo bajo estudio el 84 % rebaso el indicador máximo horario de 110 ppb. De los niveles de PM₁₀ se detectó que los promedios anuales del 2000 y 2001 rebasaron el límite permisible, de 50 µg/m³.

TABLA 2. Niveles diarios de contaminantes y variables meteorológicas, D.F. Enero de 2000 - diciembre de 2002

Variable	Media	DE	Min	Max
Temperatura promedio (°C)	16.29	2.34	8.28	22.82
Temperatura mínima (°C)	7.43	3.24	-2.60	14.90
Temperatura máxima (°C)	26.65	2.97	13.30	35.20
Ozono, máximo 8 hr (ppb)	103.97	32.26	18.38	198.38
Ozono, máximo 1 hr (ppb)	156.62	46.78	22.00	284.00
PM ₁₀ , promedio 24 hr (µg/m ³)	51.50	20.67	13.54	125.22
PM ₁₀ , máxima 24 hr (µg/m ³)	242.26	126.18	58	998
Humedad, promedio (%)	49.53	13.62	16.57	82.69

En relación al efecto de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias a lo largo de todo el periodo de estudio se obtuvieron resultados inconsistentes al aplicar ambos modelos de

análisis. Al estratificar el análisis por época del año, se encontraron resultados heterogéneos. En general, cuando se evaluó el efecto de la temperatura máxima diaria durante la época cálida se encontraron asociaciones positivas y significativas, resultados que fueron aun más consistentes cuando se aplicó el DLM a diferencia del SLM. Así, al aplicar el SLM se encontró un incremento del 1.91 % (IC 95 %, 0.68, 3.15) de las admisiones hospitalarias por todas las causas de enfermedad por cada incremento de 1 °C de la temperatura del mismo día (Tabla 3, Figura 2), el cual fue mayor al aplicar el rezago 1 de tal variable, 2.38 % (IC 95 %, 0.74, 4.05). Al aplicar el DLM, el mayor riesgo se obtuvo después de 4 días de la exposición, 2.94 % (IC 95 %, 2.06, 3.82).

En la época fría se obtuvieron resultados inconsistentes, al aplicar los dos modelos de ajuste, y para la época húmeda se observaron riesgos negativos al aplicar el DLM.

Al examinar el efecto sobre las enfermedades respiratorias en la época cálida, se encontró un incremento del riesgo de admisiones hospitalarias en el grupo de todas las edades de 5.13 % (IC 95% 2.17, 8.18) para el lag 0, al aplicar el SLM. Tales incrementos de riesgo fueron mayores al evaluar el DLM, detectando el máximo riesgo en el lag 4, 6.39% (IC 95% 4.34, 8.48).

TABLA 3. Porcentaje de cambio de admisiones hospitalarias pediátricas, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria, por época del año, Ciudad de México. Modelos ajustados por O₃, PM₁₀ y HR

Lag	Húmeda		Cálida		Fría	
	SLM	DLM	SLM	DLM	SLM	DLM
0	-0.72 (-1.52,0.09)		1.91 (0.68,3.15)		0.44 (-0.39,1.27)	
1	-0.22 (-1.24,0.81)		2.38 (0.74,4.05)		-0.2 (-1.23,0.83)	
2	-0.61 (-1.41,0.20)	-1.08 (-1.91,-0.23)	0.01 (-1.16,1.19)	2.9 (1.59,4.22)	-0.01 (-0.82,0.8)	0.19 (-0.68,1.06)
3	-0.15 (-0.90,0.60)	-1.11 (-1.73,-0.48)	-0.17 (-1.21,0.89)	2.65 (1.64,3.67)	-0.44 (-1.19,0.3)	0.04 (-0.59,0.67)
4	0.41 (-0.34,1.16)	-0.78 (-1.31,-0.25)	0.26 (-0.8, 1.33)	2.94 (2.06,3.82)	-0.34 (-1.07,0.4)	-0.01 (-0.54,0.52)
5	0.54 (-0.23,1.32)	-0.54 (-1.01,-0.07)	-0.52 (-1.55, 0.52)	1.78 (1.01,2.56)	-0.5 (-1.25,0.25)	-0.41 (-0.87,0.06)

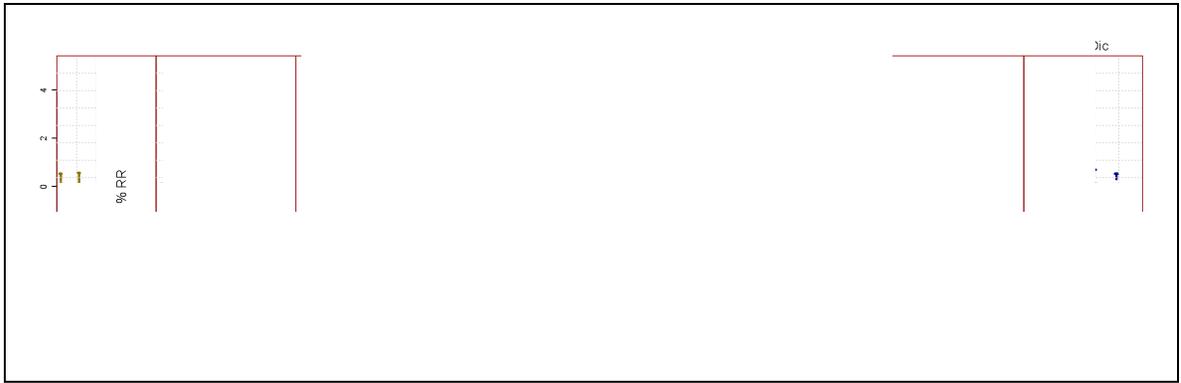


FIGURA 2. Porcentaje de incremento de riesgo de admisiones hospitalarias por todas las causas de enfermedad en todas las edades pediátricas, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria.

Por otro lado, al evaluar el efecto de la temperatura máxima sobre la incidencia de enfermedades respiratorias en época fría, se encontró una asociación positiva al aplicar el DLM, con el máximo incremento al lag 2, de 2.6% (IC 95% 0.97, 4.25). Al aplicar el SLM los resultados fueron inconsistentes. En la época húmeda, los resultados fueron inconsistentes en ambos modelos (Tabla 4, Figura 3).

TABLA 4. Porcentaje de cambio de admisiones hospitalarias pediátricas por causas respiratorias, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria, por época del año, Ciudad de México. Modelos ajustados por O₃, PM₁₀ y HR

Lag	Húmeda		Cálida		Fría	
	SLM	DLM	SLM	DLM	SLM	DLM
0	-2.12 (-3.82,-0.39)		5.13 (2.17,8.18)		1.90 (0.36,3.47)	
1	1.70 (-0.55,4.00)		1.49 (-2.14,5.26)		1.57 (-0.43,3.61)	
2	-0.40 (-2.09,1.31)	-0.95 (-2.74,0.86)	0.58 (-2.13,3.37)	4.96 (1.89,8.11)	0.22 (-1.29,1.75)	2.60 (0.98,4.25)
3	-0.13 (-1.70,1.47)	-1.37 (-2.72,0.01)	1.17 (-1.26,3.65)	5.83 (3.45,8.26)	-0.21 (-1.60,1.20)	2.49 (1.29,3.70)
4	1.12 (-0.49,2.75)	-0.46 (-1.63,0.72)	1.22 (-1.16,3.66)	6.39 (4.34,8.48)	-0.58 (-1.93,0.79)	2.16 (1.16,3.18)
5	1.29 (-0.45,3.06)	-0.15 (-1.22,0.94)	0.40 (-1.93,2.79)	5.73 (3.92,7.57)	-0.68 (-2.05,0.71)	1.66 (0.76,2.56)

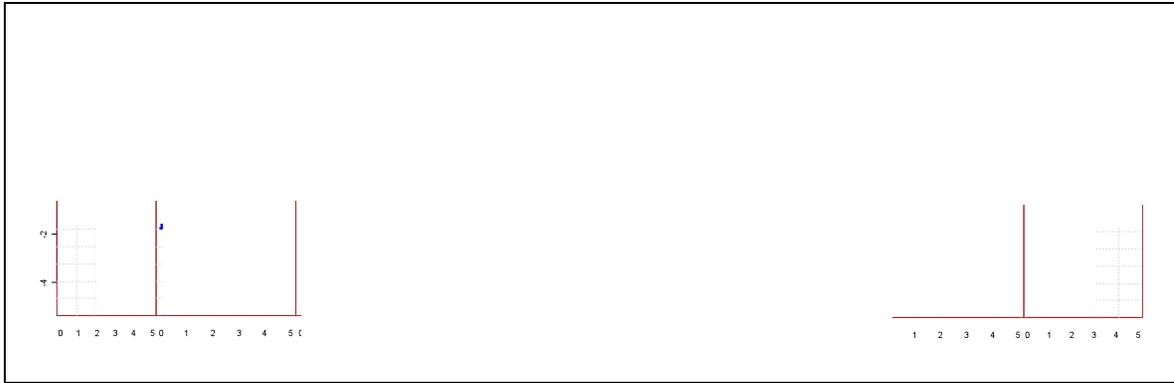


FIGURA 3. Porcentaje de incremento de riesgo de admisiones hospitalarias por causas respiratorias en todas las edades pediátricas, por el aumento de 1 °C de la temperatura máxima diaria

CONCLUSIONES Y ACTIVIDADES FUTURAS

Los resultados del presente estudio revelan que si existe un efecto positivo del incremento de la temperatura máxima diaria en la época de calor y en menor grado en la época fría, sobre las admisiones hospitalarias en población infantil de la ZMCM utilizando los modelos de riesgo distribuido.

Específicamente el estudio muestra un incremento de las admisiones hospitalarias por todas las causas de enfermedad y por enfermedades respiratorias en época cálida seca (verano), por el aumento de la temperatura máxima diaria, el cual persiste al controlar por el efecto del ozono y las PM₁₀. Lo anterior concuerda con los hallazgos de otros estudios que han encontrado un aumento de tales eventos por el incremento de la temperatura en época cálida.

En relación al ajuste de los datos mediante los modelos SLM y DLM, los resultados más consistentes se obtuvieron al aplicar el segundo modelo, debido a que permite una mejor evaluación del periodo de latencia en este caso entre la exposición a la temperatura y la ocurrencia del evento en salud al aplicar el DLM los mayores riesgos se obtuvieron al lag 4 y descendieron al aumentar los rezagos, y al evaluar el SLM, el mayor incremento de riesgo se observó al lag 1 de la exposición.

Por otro lado, es importante tomar en cuenta las posibles limitantes del presente análisis al extrapolar los resultados a la población de estudio, tales como el error de asignación de la exposición, que ocurre en este caso al obtener un solo valor diario del índice máximo de la temperatura a partir de todos los monitores y asignarlo al conteo diario de eventos en salud de la ciudad. Además es importante considerar el tamaño muestral y la representatividad de los datos en cuanto a su ubicación espacial.

En relación a las fortalezas del estudio es importante destacar el ajuste del efecto del ozono y del material particulado sobre la temperatura al incluir ambas variables en el modelo de ajuste.

Este estudio es el primero en la ZMCM en evaluar el efecto del incremento de la temperatura ordinaria enfocándose además en su efecto sobre eventos de morbilidad, evaluando tal asociación a través de las distintas épocas del año.

REFERENCIAS

Anderson HR, Spix C, Medina S, Schouten JP, Castellsague J, Rossi G et al. Air pollution and daily admissions for chronic obstructive pulmonary disease in 6 European cities: results from the APHEA project. *Eur Respir J* 1997; 10:1064-1071.

Castillejos 1995, *Am J Respir Crit Care Med*

Burnett RT, Smith-Doiron M, Stieb D, Raizenne ME, Brook JR, Dales RE et al. Association between ozone and hospitalization for acute respiratory diseases in children less than 2 years of age. *Am J Epidemiol* 2001; 153:444-452.

Gouveia N, Maisonet M. Health effects of air pollution. En: Organización Mundial de la Salud. WHO Air Quality Guidelines: 2005 update. Holanda, 2006.

Linn W, Szlachic Y, Gong H, Kinney P, Berhane K. Air pollution and daily hospital admissions in metropolitan Los Angeles. *Environ Health Perspect* 2000;108 (5):427-434.

Organización Mundial de la Salud (OMS). Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution. Organización Mundial de la Salud: Holanda, 2000.

Romieu, I., *et al.* Effects of intermittent ozone exposure on peak expiratory flow and respiratory symptoms among asthmatic children in Mexico City. *Archives of environmental health* 52:5 Sep/Oct 1997. 368-375.

Romieu 1995, *American journal of epidemiology*

Schwartz, J. PM10, ozone and hospital admissions for the elderly in Minneapolis-St. Paul, Minnesota. 49:5 366-374, 1994.

Sánchez-García S. *et al.* Ingresos hospitalarios por cáncer bucal en el IMSS (1991-2000), *Rev Med Inst Mex Seguro Soc* 2008; 46 (1): 101-108.

CAPÍTULO IV

Recurso Aire, Sector Salud

Evaluación de la calidad del aire de la Ciudad de México y su efecto en la salud de la población expuesta a biopartículas aeroalérgicas (granos de polen) y su relación con el cambio climático

Responsable

María del Carmen Calderón E.¹

Alumnos Participantes

Tania Robledo Retana², Marisol Olivé Arrijoja², Virginia Patricia Andrade Zavala²,
Anavianey Rivera Santamaría², Fidel Fuentes Rojas³

Académicos Participantes

María del Mar Trigo⁴, María del Carmen Jiménez⁵, Julio Ayala Balboa⁵, Francisco Estrada¹,
Agustín Fernández¹

RESUMEN

Las partículas en el ambiente de las ciudades industrializadas impactan significativamente en la salud, más del 20% de la población puede desarrollar cuadros alérgicos por la cantidad de polen en el aire, la cual depende del tipo de vegetación, factores meteorológicos, así como de las variaciones en el clima que repercuten en los tiempos de floración de las plantas. Por tal motivo, el objetivo de este proyecto es monitorear y detectar granos de polen en el aire de la Ciudad de México, generar estimaciones de los efectos de cambio climático en la concentración de polínicos y de sus impactos potenciales en la salud humana para compartir e incrementar esta información a través de la Red de Monitoreo Aeropolen (ReMA) de la Ciudad de México. Uno de los resultados del proyecto fue la instalación de una red de monitoreo de aeropartículas a través de estaciones que permitieron la actualización de información que permite identificar a los principales aeroalérgenos presentes, entre ellos diversos tipos polínicos causantes de enfermedades respiratorias como alergias y/o asma. Asimismo, la información generada por la ReMA permite elaborar estudios de diversidad vegetal del Valle de México. Se hicieron las primeras determinaciones de la relación entre aeroalérgenos presentes en la atmósfera y la proporción de pacientes con reacción alérgica positiva. La información obtenida fue de utilidad

¹ Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

² Universidad Nacional Autónoma de México

³ Universidad Simón Bolívar y UNAM

⁴ Universidad de Málaga, España

⁵ Hospital Oftalmológico Conde de la Valenciana

para evaluar la calidad del aire, utilizando la concentración del polen como indicador, para diversas zonas de la ZMCM y para la elaboración del atlas sobre biopartículas aeroalergénicas. El proyecto permitió vinculaciones con instituciones gubernamentales de salud (Instituto Oftalmológico Conde de Valencia, Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias y Centro Médico Siglo XXI) y académicas (Instituto de Biología de la UNAM, Universidad Simón Bolívar y Universidad de Málaga, España), y se inició la relación con empresas farmacéuticas. Otro logro del proyecto fue la capacitación de alumnos, contribuyendo así, con la formación de recurso humano en este campo de especialización.

INTRODUCCIÓN

En las ciudades industrializadas, la incidencia y exposición a aeroalergenos impactan significativamente la salud de más del 20 % de la población, dicho porcentaje corresponde a individuos susceptibles de desarrollar cuadros alérgicos al interactuar con el ambiente.

Los granos de polen, suspendidos en la atmósfera, constituyen el tipo de aeroalergeno principal en exteriores y se conoce ampliamente el efecto de algunos tipos polínicos sobre la salud. Su presencia y concentración dependen del tipo de vegetación, factores meteorológicos y variaciones en el clima que repercuten en los tiempos de floración de las plantas.

El polen atmosférico puede utilizarse como modelo experimental para evaluar el efecto de la variación climática sobre la salud; mediante técnicas sencillas y de bajo costo puede determinarse la calidad del aire, valorando tanto la presencia y concentración de alergenios polínicos en la atmósfera, como su relación con padecimientos alérgicos de vías respiratorias y asma.

Para obtener información sobre tales efectos en la Ciudad de México, el presente estudio inició el monitoreo y detección de alergenios polínicos (granos de polen), a través de la creación de la Red Mexicana de Aerobiología (ReMA), la cual permitirá establecer la variación espacio-temporal de tales biopartículas, además se lleva a cabo la identificación y cuantificación de los granos de polen para la elaboración de calendarios polínicos.

La información generada por la ReMA se integrará a los datos obtenidos de pacientes alérgicos tratados en el Hospital Oftalmológico Conde de Valenciana y el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER), para determinar el impacto que generan los niveles atmosféricos de granos de polen sobre la salud de la población sensibilizada y el efecto del cambio climático sobre ambos.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio busca monitorear y detectar alergenios polínicos (granos de polen) dispersos en la atmósfera de la Ciudad de México, mediante la creación de

una Red Mexicana de Aerobiología (ReMA), con el fin de generar estimaciones de los efectos de cambio climático en la distribución y concentración de polen atmosférico y de sus impactos potenciales en la salud humana.

Con el propósito de alcanzar dicho objetivo se tienen en cuenta las siguientes actividades y aspectos metodológicos:

- Conformar la Red de Monitoreo Aerobiológico (ReMA) de la Ciudad de México.
- Determinar la variación en tiempo y espacio de los principales alérgenos polínicos (pastos, malezas y árboles) presentes en la atmósfera de la Ciudad de México.
- Establecer la relación entre los aeroalérgenos determinados y los padecimientos de sujetos sensibilizados que son tratados en el Hospital Oftalmológico Conde de la Valenciana y en el Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER).
- Integrar un atlas de granos de polen del aire de la Ciudad de México.
- Elaborar un calendario aeropolínico de la Ciudad de México.
- Generar estimaciones a futuro de los efectos de cambio climático en la distribución y concentración de polen atmosférico y otros alérgenos y de sus impactos potenciales en la salud humana.
- Crear mapas a futuro que muestren la distribución potencial de polen atmosférico bajo condiciones de cambio climático.
- Identificar zonas con mayor propensión a mostrar impactos negativos por cambio climático en la salud humana.

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se resumen algunos de los principales resultados encontrados en la presente investigación.

Se inician los trámites para el registro de la ReMA y de su logo ante el Departamento Jurídico de la UNAM, obteniéndose el dictamen positivo para poder nombrar a la red como Red Mexicana de Aerobiología, actualmente se espera la Reserva de derechos al uso exclusivo del título.

Se da inicio al monitoreo de granos de polen dispersos en el aire utilizando las trampas de esporas *Hirst* en diversas zonas de la Ciudad de México, de la forma como se describe a continuación y se ilustra en la gráfica 1.

- Delegación Coyoacán: ubicación Ciudad Universitaria, inició del monitoreo en agosto de 2008, símbolo en la figura 1. ●
- Delegación Miguel Hidalgo: ubicación Museo de Historia Natural, Chapultepec, inició del monitoreo en octubre de 2008, símbolo en figura. ●
- Delegación Iztapalapa, inició del monitoreo en enero de 2009 símbolo en figura. ●

- Con recursos externos al proyecto se adquirió otra trampa de esporas Hirst la cual fue colocada en la Delegación Cuajimalpa de la Ciudad de México para iniciar el monitoreo en el 2010, símbolo en figura. ●

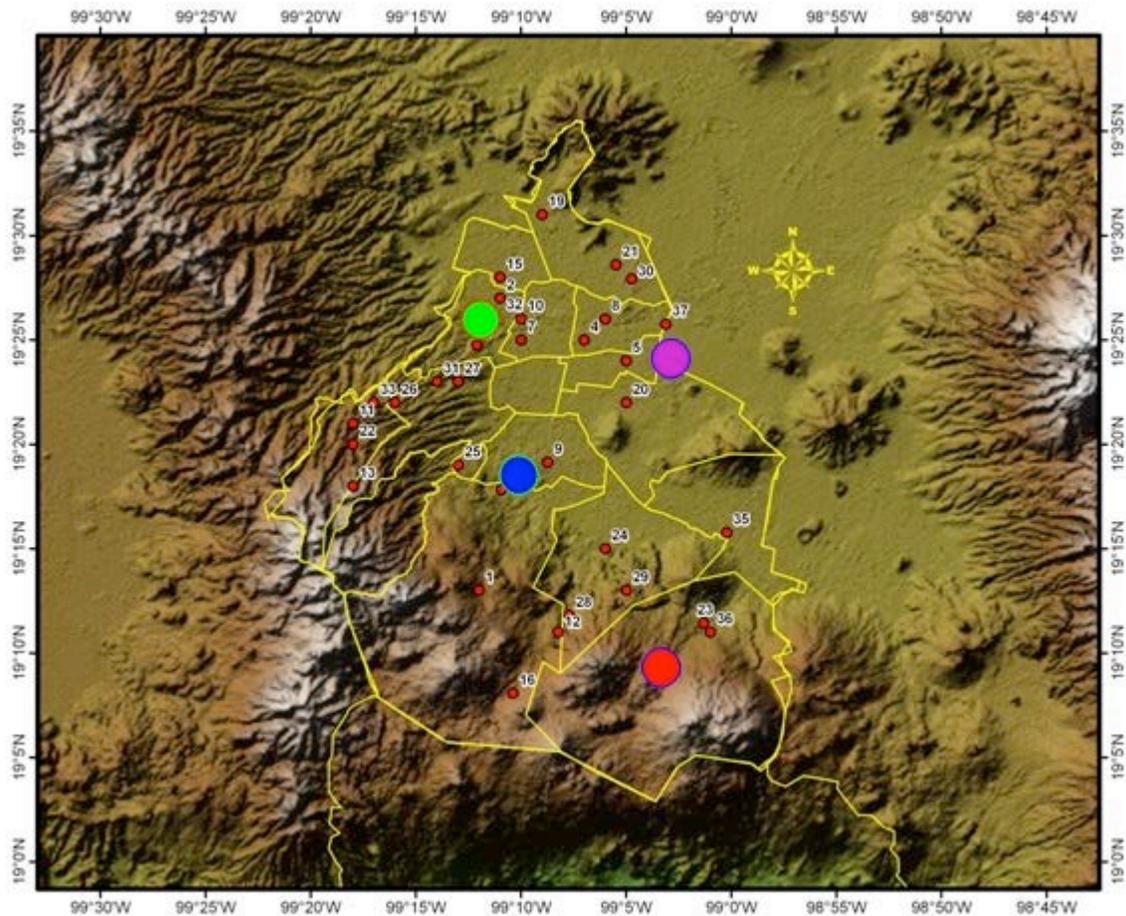


FIGURA 1. Zonas de monitoreo de la Red Mexicana de Aerobiología (ReMA) de la Ciudad de México

Determinación de la variación en tiempo y espacio de los principales alérgenos polínicos presentes en el aire de la Ciudad de México

En la tabla 1 se presentan algunos de los tipos polínicos colectados en la atmósfera de las delegaciones Coyoacán, Miguel Hidalgo e Iztapalapa, discriminados según su fuente: pastos, malezas y árboles.

TABLA 1. Polínicos colectados del aire de las delegaciones Coyoacán, Miguel Hidalgo e Iztapalapa

Árboles	Malezas	Pastos
Aceraceae	Ambrosia	Gramíneas
Alnus	Artemisia	Poaceae
Betula	Canabis Compuestas: Helianthus,	
Buddleia	Senecio	
Casuarina	Lactuceae	
Carpinus	Corydalis	
Carya tipo	Chenopodaceae-Amaranthaceae	
Cedrus	Cyperaceae	
Citrus	Lilaceae	
Cupressaceae	Menta tipo	
Eucalyptus	Parietaria	
Fraxinus	Plantago	
Ginkgo biloba	Potamogeton	
Larix	Ranunculus tipo	
Ligustrum	Ricinus	
Liquidambar	Rumex	
Morus	Solenaceae	
Palmae	Uricaceae	
Pinus		
Platanus		
Populus		
Quercus		
Salix		
Schinus		
Ulmus		

En las figuras 2 a 7 se ilustran los calendarios de los tipos polínicos más frecuentes y abundantes colectados en las delegaciones Miguel Hidalgo, Iztapalapa y Coyoacán.

En el calendario se indica la variación anual de granos de polen de árboles colectados del aire de la delegación Miguel Hidalgo (Chapultepec) (Fig. 2), se observa que los tipos polínicos con mayor concentración total de polen/m³ de aire la presentaron *Fraxinus* y especies del tipo *Cupresaceae* hasta con 4000 gr/m³ de aire, ambos registraron sus máximas concentraciones durante el mes de enero. Los granos de polen de diversas especies de malezas (Fig.3) alcanzaron concentraciones hasta de 80 gr/m³ de aire, mientras que las gramíneas (pastos) registraron hasta 250 granos de polen/m³ de aire, con picos en enero, aunque este tipo de polen estuvo presente en el aire durante todo el año.

El calendario de los tipos polínicos colectados en la delegación Iztapalapa (Fig. 4) se observa que los pólenes de árboles presentaron como máximas concentraciones 1100 gr/m³ de aire, como el tipo polínico *Cupresaceae*, seguidos por el tipo *Pinus* y *Fraxinus* con picos en mayo, marzo y abril, respectivamente. Las concentraciones más altas de malezas correspondieron a tipos polínicos *Urticaceae* con picos de 75 gr/m³ de aire en el mes de mayo. Los pastos que han

sidio registrados en las lecturas realizadas hasta el mes de junio de 2009, mostraron que éstos están presentes todo el tiempo y sus máximas concentraciones alcanzan los 80 gr/m³ de aire (Fig. 5).

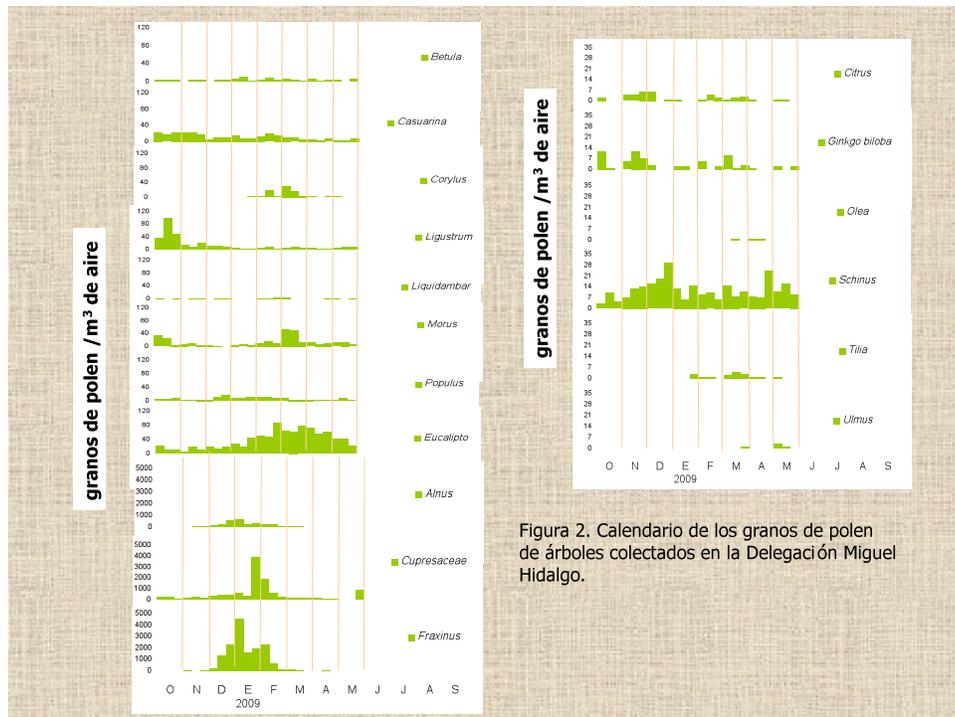


Figura 2. Calendario de los granos de polen de árboles colectados en la Delegación Miguel Hidalgo.

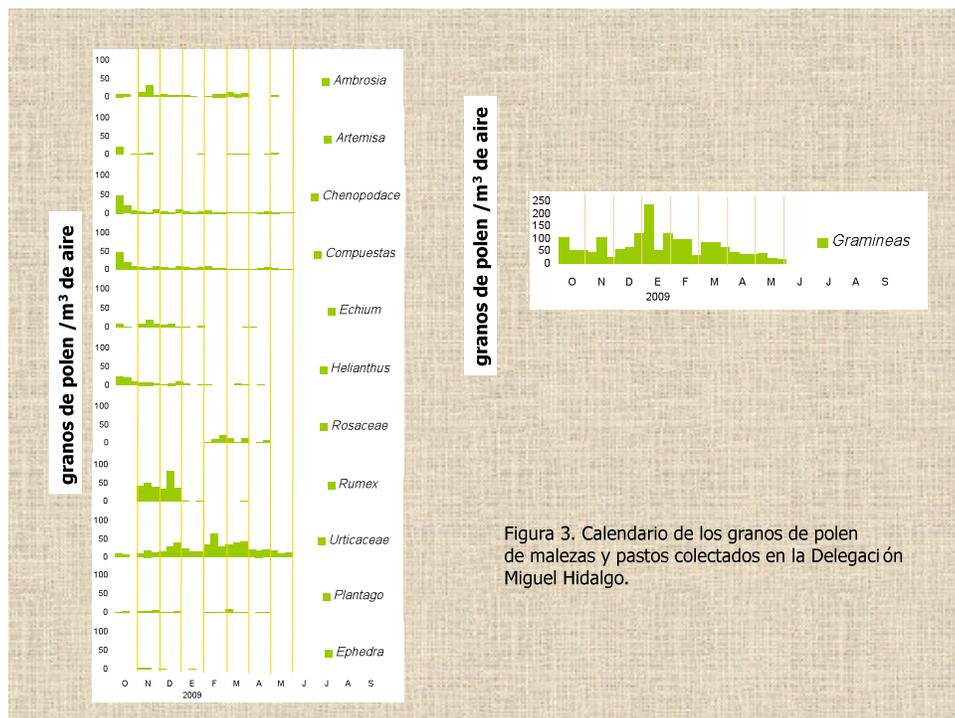


Figura 3. Calendario de los granos de polen de malezas y pastos colectados en la Delegación Miguel Hidalgo.

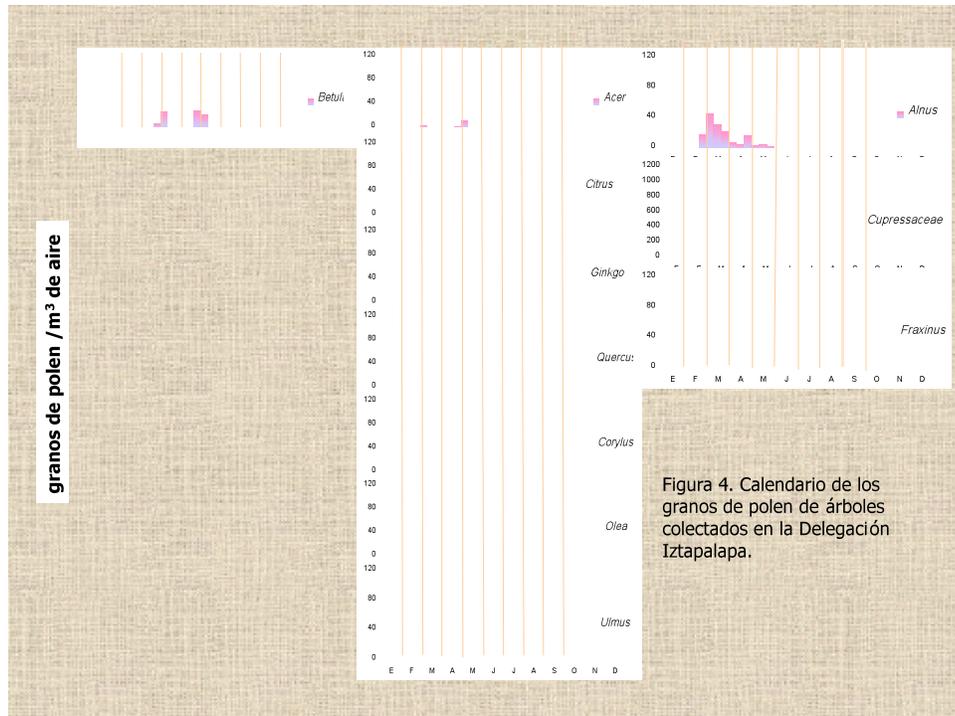


Figura 4. Calendario de los granos de polen de árboles colectados en la Delegación Iztapalapa.

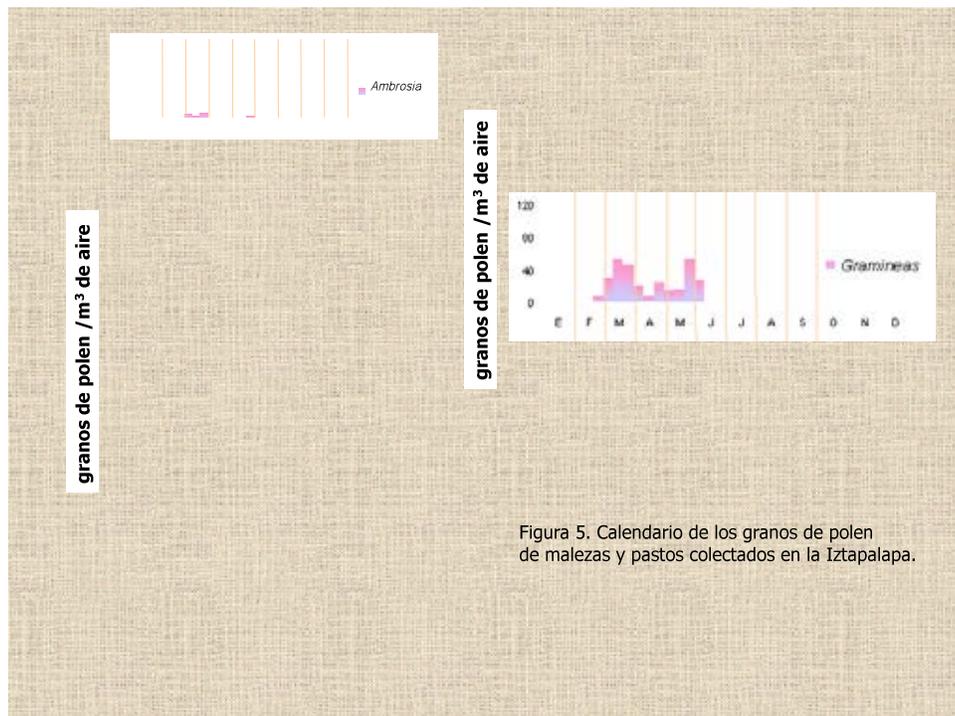


Figura 5. Calendario de los granos de polen de malezas y pastos colectados en la Iztapalapa.

En el calendario de los tipos polínicos colectados en la delegación Coyoacán (Fig. 6) se observa que los pólenes de árboles más abundantes también correspondieron a los tipos polínicos de *Fraxinus* y *Cupresaceae*, como en la delegación Miguel Hidalgo, aunque el primero alcanzó concentraciones hasta de 6000 gr/m³ de aire, ambos con picos en enero; seguidos por polen de *Alnus* con máximos de 1000 gr/polen por m³ de aire, con máximos en diciembre; mientras que el polen de *Pinus* sólo alcanzó concentraciones de 50 gr/m³ de aire.

Los tipos polínicos *Urticaceae* y *Chenopodiacea-Amarantaceae* registraron 55 granos de polen/m³ de aire como sus concentraciones más altas, aunque estos pólenes se registraron durante todos los meses evaluados. Por otra parte, las gramíneas o pastos como *Poaceae* alcanzaron 579 gr/m³ de aire durante el mes de diciembre (Fig. 7).

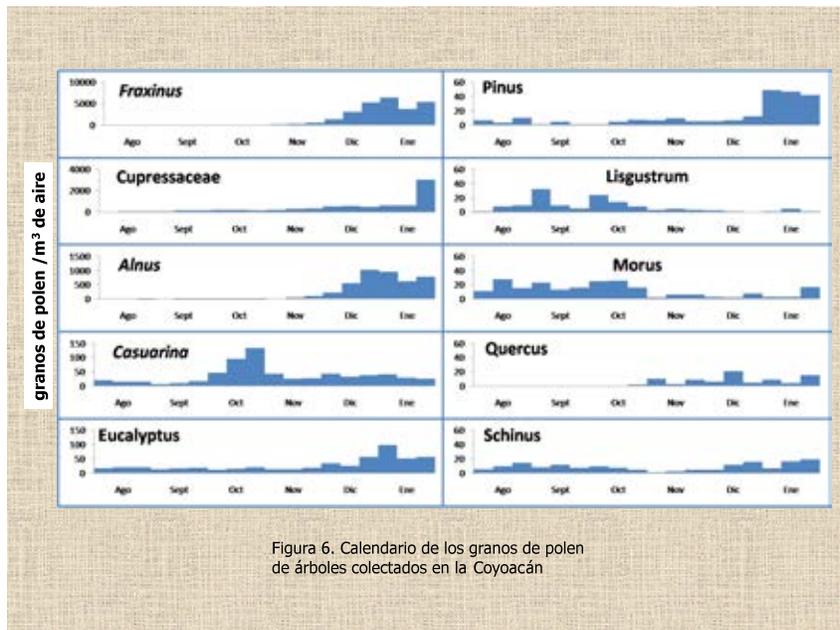


Figura 6. Calendario de los granos de polen de árboles colectados en la Coyoacán

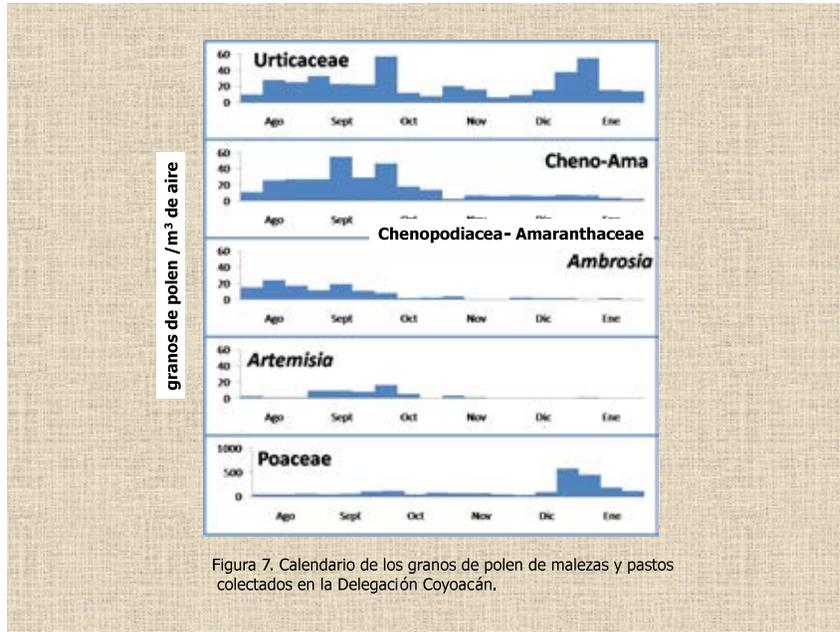


Figura 7. Calendario de los granos de polen de malezas y pastos colectados en la Delegación Coyoacán.

Relacionando lo anteriormente encontrado en los diferentes sitios muestreados de la Ciudad, con la información proporcionada por el Instituto Oftalmológico Conde de Valenciana (IOCV) donde se evaluaron 250 pacientes con conjuntivitis alérgica, se pudo determinar que de éstos, 163 fueron niños, de los cuales 138 presentaron reacción alérgica a polen mediante la prueba de punción; asimismo, de 59 pacientes adultos participantes en el estudio, 49 presentaron reacciones positivas a polen, además algunos pacientes presentaron reacción cruzada con diversos aeroalergenos.

En la Figura 8 se indica el número de pacientes que fueron positivos a pruebas cutáneas a diversos alergenos, presentando respuestas principalmente a pastos (*Poaceae*), al quelite (*Chenopodiaceae-Amarantaceae*), al mezquite (*Prosopis juliflora*), al encino (*Quercus ilex*) y al olivo (*Olea europaea*), entre otros.



FIGURA 8. Alergenos identificados en pacientes con conjuntivitis alérgica

Por otro lado se observaron y analizaron las fenofases de la especie *Fraxinus* y la relación específicamente de su floración con la temperatura, por lo que en la figura 9a se ilustran las temperaturas registradas durante el año de 2008 y las proyectadas para el año 2050; además con base en los datos registrados del inicio de la floración de *Fraxinus* en el 2008, se llevó a cabo la estimación del inicio de su floración para el 2050 siguiendo el método planteado por Van Vliet *et al.* (2002) (Fig 9b). A pesar de que esta estimación se realizó con solo 10 meses de monitoreo, se calculó que para el año 2050 el inicio de la floración para la especie mencionada se adelantará 36 días.

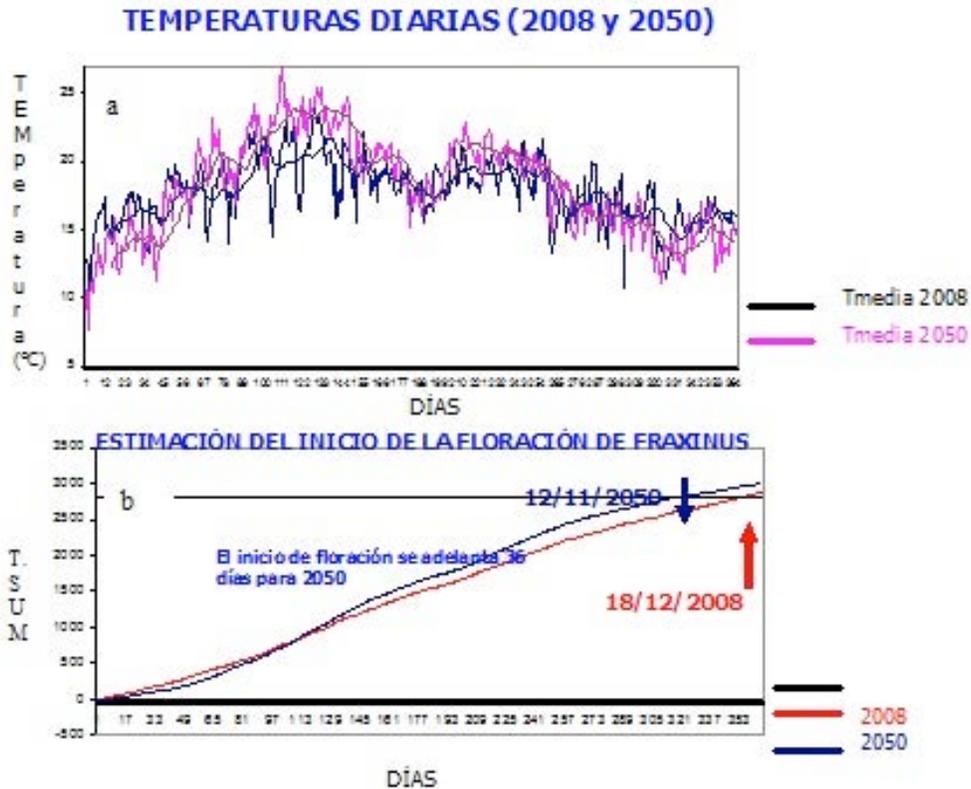


FIGURA 9 a) temperatura registrada durante el año de 2008 y las proyectadas para el año 2050; b) estimación del inicio de su floración para el 2050

CONCLUSIONES

El funcionamiento de la Red de Monitoreo Aerobiológico (ReMA) aporta información sobre la microbiota dispersa en la atmósfera de la Ciudad de México.

La determinación de partículas biológicas del aire permite identificar los principales aeroalergenos presentes, entre ellos diversos tipos polínicos causantes de enfermedades respiratorias como alergias y/o asma. Asimismo, la información generada por la ReMA permite elaborar estudios fenológicos y de diversidad vegetal del Valle de México.

Con la generación continua de esta información a lo largo del tiempo, se obtendrán bases de datos suficientes para estimar los posibles efectos del cambio climático sobre la vegetación y salud de la población. Así como, la elaboración de posibles proyecciones sobre la presencia de aeroalergenos polínicos según los diferentes escenarios de temperatura para 2030 y 2050.

Cuando se tenga el registro polínico de al menos cinco años continuos de monitoreo del aire de la Ciudad de México, será posible iniciar la estimación de la distribución de los tipos

polínicos de interés, con base en los escenarios de temperatura y precipitación disponibles para la Ciudad de México.

El estudio de granos de polen permite evaluar la calidad del aire al ser utilizados como indicadores de contaminación ambiental, ya que presentan aeropartículas adheridas a su exina con las que es posible caracterizar el tipo de contaminantes que predominan en cada zona.

REFERENCIAS

Van Vliet H.J.A., Overeem A., De Groot S.R., Jacobs F. G. A., y Spiekma T.M.F. 2002. The influence of temperature and climate change on the timing of pollen release in the Netherlands.

CAPÍTULO V

Recurso Suelo

Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación. Estimación de carbono orgánico total en los edafosistemas del Suelo de Conservación del Distrito Federal

Responsable

Gilberto Vela Correa¹

Co-Responsable

Jorge López Blanco²

Participantes

María de Lourdes Rodríguez Gamiño², Aurora Chimal Hernández³, Armando Navarrete Segueda¹, Juan Carlos Cruz Chona¹, Valeria Bello Tellez¹

RESUMEN

La cantidad de carbono puede ser un indicador del crecimiento y desarrollo de la vegetación en las áreas reforestadas. Los objetivos de este proyecto son estimar el carbono orgánico (CO) total en suelos con vegetación natural y áreas reforestadas, así como en zonas agrícolas que están presentes en el Suelo de Conservación del Distrito Federal (SC-DF), con el fin de obtener indicadores que permitan conocer la viabilidad, vulnerabilidad y capacidad de adaptación de las políticas públicas en materia ambiental ante el cambio climático. Los impactos del proyecto son la sistematización y análisis de información documental, cartas temáticas a escala y fotografías aéreas pancromáticas en blanco y negro a escala, elaboradas por el Gobierno del Distrito Federal en el año 2000. Se obtuvo información sobre la distribución del carbono orgánico total por tipo de unidad geomorfológica en las 9 delegaciones estudiadas, así como por tipo de vegetación y se transcribió en su distribución espacial en un mapa a escala 1:50,000. Se puede cuantificar y evaluar en los programas de reforestación, desde el año 2004, la capacidad de almacenamiento del carbono orgánico según la cobertura vegetal o uso de suelo que se encuentra en el SC-DF. Se cuenta ahora con una base de datos y una cartografía base que permiten incluir a futuro los diversos escenarios de cambio climático, de tal forma

¹ Laboratorio de Edafología, Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

² Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, UNAM

³ Laboratorio de Botánica y Fisiología Vegetal, Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

que puedan proporcionar información sobre el potencial de los diferentes y abundantes servicios ambientales asociados al SC de la ciudad, además se tienen herramientas de evaluación de los programas y políticas públicas que se han establecido para tratar de mitigar el efecto del cambio climático mediante el control de las emisiones de GEI en el suelo de conservación.

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2004 la estrategia de reforestación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal (SC-DF) se reorientó en dos vertientes: la conservación de las zonas boscosas mediante el Programa de Reforestación Rural, desarrollando acciones puntuales de reposición y mantenimiento de plantaciones ya establecidas; y el incremento de la superficie forestal, mediante el Programa de Reconversión Productiva de terrenos agrícolas o a través de cortinas rompevientos.

A través del programa de reconversión productiva, desde 2002 se han incorporado al uso forestal 1 mil 5 hectáreas de terrenos en propiedad de 16 núcleos agrarios, reconvirtiéndose en el último año el 35 % de esa superficie (352 hectáreas) con plantaciones de árbol de navidad y especies maderables y frutícolas. Las 653 que se reconvirtieron en el periodo 2002 al 2004, se reforestan con 3.7 millones de plantas, de las cuales 0.8 millones son reposición en áreas de baja supervivencia, plantando diez especies entre las que destacan *Pinus ayacahuite* (*Pino vikingo* 70 %), *Pinus hartwegii* (*Pino de altura* 14 %) y *Golden deliceus* (*Manzana* 6 %); el 76.6 % corresponden a plantaciones de árboles de navidad, 16.5 % a plantaciones maderables, el 5.9 % de plantaciones frutícolas y 0.9 % otras. Dichas plantaciones se encuentran establecidas en las delegaciones de Tlalpan (85 %), Milpa Alta (12 %), Magdalena Contreras (2 %) y Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Xochimilco y Tláhuac (1 %); beneficiando a 302 productores rurales del sur del Distrito Federal.

A partir de la revolución industrial, debido al empleo de combustibles fósiles; han aumentado las concentraciones de CO₂, de 280 ppm (partes por millón) en la era preindustrial a 368 ppm en el año 2000 (Leblanc *et al.*, 2006). Éste gas es el principal responsable del aumento del efecto invernadero, lo que ha provocado un incremento en la temperatura. En el caso de la temperatura media global que promedia temperaturas terrestres y oceánicas, en el año 2004 fue 0.54 °C superior al promedio de los 123 años previos (1880-2003), siendo el cuarto año más caluroso en la historia (Smith *et al.*, 2005).

Los gases de efecto invernadero podrían reducirse a través de dos procesos: reducción de emisiones antropogénicas (de origen humano) de CO₂ o creación y mejoramiento de los sumideros de carbono en la biosfera. La forestería puede contribuir a la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, el secuestro y el almacenamiento y la concentración de carbono atmosférico (Andrade, 2003). De igual manera, los sistemas

agroforestales podrían remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas pueden retener el carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera. Sin embargo la cantidad de investigación realizada en agroforestería es poca en comparación con la de otros usos de la tierra, como los bosques y plantación forestal y aún falta conocer mejor el potencial de estos sistemas para secuestrar carbono (Andrade, 2003).

Uno de los servicios ecosistémicos que proporciona el suelo es el secuestro de carbono; la capacidad para llevarlo a cabo varía de acuerdo con el tipo de suelo y sus características, historial de manejo y factores ambientales (Vergara *et al.*, 2004). La transferencia de carbono estabilizado de la vegetación al suelo es un proceso importante para abatir las concentraciones elevadas de CO₂ atmosférico (Vergara *et al.*, 2004). El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente importante del ciclo global del carbono, ocupando un 69.8 % del C orgánico de la biosfera. El suelo puede actuar como fuente o reservorio de carbono dependiendo de su uso y manejo (FAO, 2001).

La vegetación actúa como sumidero de CO₂, al extraer este gas de la atmósfera mediante la fotosíntesis y acumular en sus tejidos el carbono fijado. Parte del carbono presente en la biomasa vegetal se libera a la atmósfera en los procesos de respiración y de descomposición, mientras que el resto del carbono se acumula en la madera y en la materia orgánica del suelo. En ecosistemas terrestres naturales este proceso de acumulación de carbono alcanza con el tiempo un valor de stock de carbono orgánico estable o en equilibrio que depende entre otros factores de la especie vegetal, el clima, la topografía, la litología, y el tipo de suelo. Las perturbaciones que se producen, como laboreo, talas masivas, incendios, erosión, afectan la dinámica del carbono de los ecosistemas terrestres que a menudo han pasado a actuar como fuente de carbono.

La Ciudad de México, es considerada como una de las más extensas y densamente pobladas del mundo. Al sur de la gran masa urbana existen 87,204 ha, aproximadamente el 59 % de la entidad, con características climáticas, topográficas y edafológicas que hacen posible la existencia de bosques, matorrales y pastizales en distintos estados de conservación, además de campos agrícolas, todos de vital importancia para los habitantes de esta ciudad por los Servicios Ambientales que aportan. Este sitio corresponde al llamado Suelo de Conservación del Distrito Federal (SC-DF).

El SC representa una parte sustancial del ciclo de carbono, por su riqueza forestal, tiene una alta capacidad de retención por unidad de superficie, para concentrar este elemento en la vegetación y en los suelos con respecto a otros. Se estima que el reservorio de carbono varía por los cambios de uso de suelo. Es importante mencionar que el cambio de uso de suelo que se presenta en el Suelo de Conservación, principalmente el agrícola se caracteriza por un elevado uso de agroquímicos y prácticas de labranza mecanizada, este último aspecto contribuye en la erosión acelerada del suelo. En cuanto a la ganadería extensiva, las prácticas

comunes son la quema de residuos agrícolas e incendios no controlados para el rebrote de pastos, los cuales emiten gases tipo invernadero hacia la atmósfera.

El Suelo de Conservación es igualmente fundamental para el mantenimiento del ciclo hidrológico de la Cuenca de México, ya que abarca las zonas más importantes para la recarga del acuífero, además de brindar otros servicios ambientales. Sin embargo, en el espacio del SC-DF se presenta una pérdida importante de superficie con efectos negativos en recursos y procesos naturales vitales, además de emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, la restauración, el cuidado y la ampliación de la superficie del Suelo de Conservación mediante la recuperación de zonas, se convierten en acciones que contribuyen a mitigar las emisiones de GEI al ampliar la captura de carbono, además de reducir la vulnerabilidad del Distrito Federal a eventos climáticos extremos.

Con la realización de este trabajo, se contará con información sobre la dimensión del carbono orgánico total en el suelo y su distribución espacial en un mapa a escala 1:50,000 considerando las áreas con vegetación natural, las zonas de reforestación, así como las que se encuentran con uso agrícola y pecuario. Lo anterior es de suma importancia ya que al contar con datos sobre la capacidad de almacenamiento de carbono según la cobertura de uso de suelo, se podrán evaluar a partir de parámetros cuantitativos la viabilidad de los programas de reforestación que se han implementado desde el año 2004, como una forma de mitigar el cambio climático en el Suelo de Conservación, considerado como el principal reservorio de carbono del Distrito Federal.

Con la obtención de datos sobre el carbono orgánico en los suelos, se contará con un parámetro de medición en los sitios reforestados, ya que la cantidad de carbono puede ser un indicador de crecimiento y desarrollo de la vegetación en las áreas reforestadas.

OBJETIVOS

Los objetivos propuestos en este trabajo contemplaron los siguientes aspectos: 1) Evaluar el carbono orgánico total en suelos con vegetación natural, áreas reforestadas y agrícolas en el Suelo de Conservación del Distrito Federal; y 2) Contar con indicadores que permitan conocer la viabilidad, vulnerabilidad y capacidad adaptativa de las políticas públicas aplicada ante el cambio climático en materia ambiental considerando los programas de reforestación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo se restringe específicamente al Suelo de Conservación, el cual está distribuido en nueve delegaciones políticas, Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Gustavo

A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco, abarca una superficie de 87,310 ha. El 59% del territorio del Distrito Federal se ha establecido como Suelo de Conservación (Figura 1). Por su riqueza natural y por la importancia de los servicios ecosistémicos que presta a los habitantes del área urbana, es de fundamental importancia para su atención, cuidado y conservación ambiental biofísica.

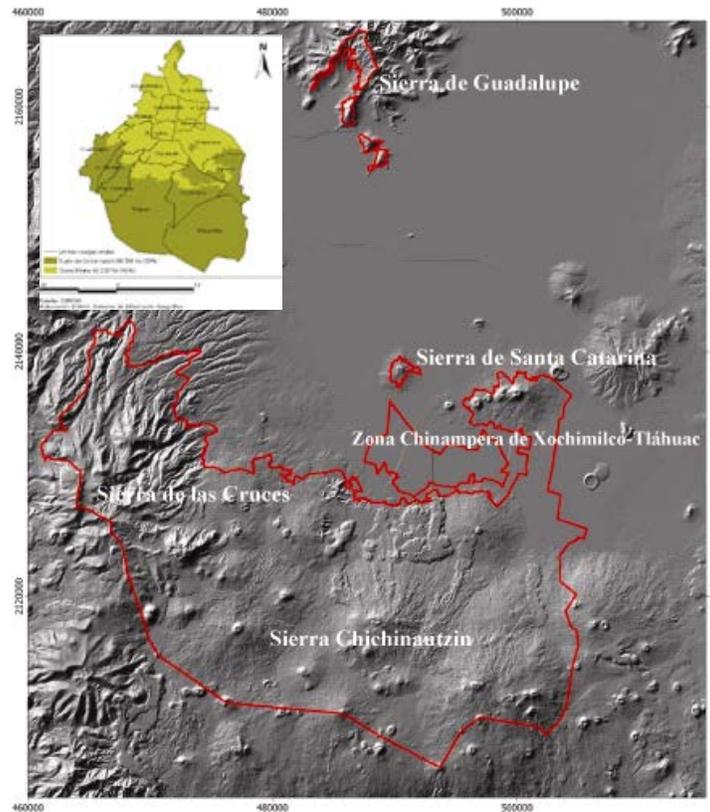


FIGURA 1. Localización del área de estudio sobre el mapa de relieve sombreado del Suelo de Conservación del Distrito Federal

Revisión y recopilación de información

Se realizó un análisis de la información documental existente, así como de las cartas temáticas en escala 1:50,000 y se adquirieron fotografías aéreas a escala 1:75,000 de un vuelo realizado por el INEGI (1994) donde se delimitaron por medio de fotointerpretación, las unidades geomorfológicas morfogenéticas de acuerdo al sistema ITC de levantamientos geomorfológicos (Verstappen y van Zuidam, 1991). Posteriormente se definieron los sitios de muestreo de suelos, procurando que cada sitio sea representativo y apoyándose para ello con diversos recorridos por la zona para su verificación y validación.

Las fotografías aéreas fueron georreferidas y se les aplicó una corrección fotogramétrica, posteriormente se digitalizaron las unidades geomorfológicas con apoyo de un Sistema de

Información Geográfica, utilizando el programa de ILWIS (por sus siglas en inglés Integrated Land Water Information System).

En total, se trabajaron 50 sitios de muestreo de suelos y vegetación reforestada (Figura 2) en el área considerada como SC. Esos sitios se eligieron de acuerdo con la información de sitios reforestados de la Comisión de Recursos Naturales (CORENA).

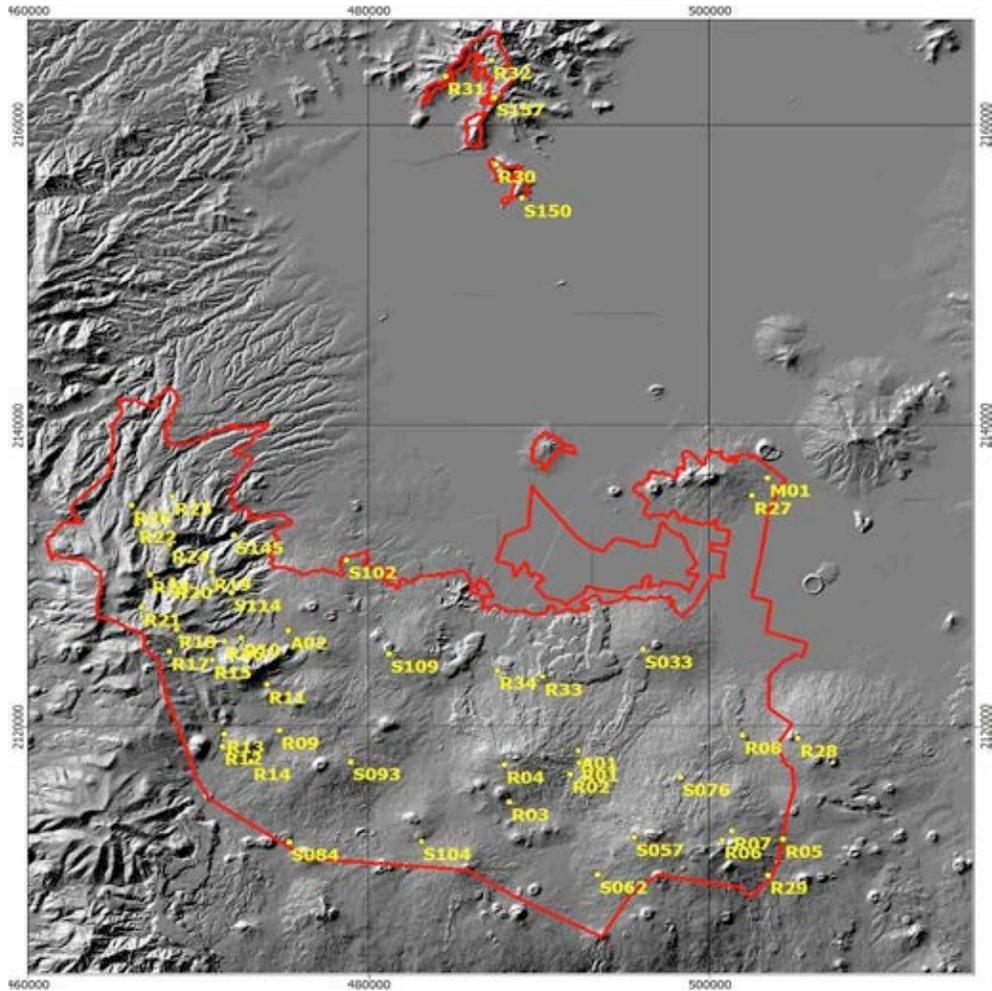


FIGURA 2. Sitios de muestreo de suelos y vegetación en el Suelo de Conservación del Distrito Federal

Trabajo en campo

Las mediciones de los árboles se tomaron en áreas con vegetación natural, reforestadas y en terrenos de uso agropecuario. En cada sitio, se determinó la cobertura del suelo, y se tomaron muestras de suelo utilizando una barrena tipo “holandés” a una profundidad de 0-30 cm., cada muestra se guardó en bolsas de polietileno, etiquetadas, para su posterior procesamiento en laboratorio. Cabe mencionar que los contenidos de carbono en el suelo dependen de los

factores relacionados con la formación del suelo, pero pueden ser fuertemente modificados, degradados o mejorados por los cambios en el uso y el manejo de la tierra.

Para contar con datos sobre la vegetación se establecieron círculos de muestreo. Cada círculo se trazó con apoyo de cintas métricas midiendo un radio de 8.9 m., considerando un árbol como centro. Con apoyo de banderines se estableció el perímetro del círculo y se midió la altura y el diámetro a altura de pecho (DAP) de los árboles. La vegetación que quedaba dentro del círculo se marco con etiquetas de colores para su posterior medición.

El DAP se midió con apoyo de un Caliper y con una cinta diamétrica. Para medir la altura de los árboles se utilizó el método indirecto propuesto por Philip (1994), que consiste en el uso de la trigonometría, midiendo la distancia al árbol con una cinta métrica y los ángulos (oblicuángulos) de la parte superior y el ángulo a la altura de los ojos de la persona que está junto al árbol con un Clinómetro. De igual forma, cada uno de los círculos se georeferenció con apoyo del Global Position System (GPS) para la elaboración de los mapas en un Sistema de Información Geográfica.

Trabajo en laboratorio

Entre las pruebas que se realizaron en el laboratorio se encuentran las siguientes:

Humedad del suelo: se determinó por el método propuesto por Jackson (1982), donde recomienda pesar una muestra de suelo en un crisol previamente tarado y secar hasta peso constante a 105°C., durante 24 a 48 horas dependiendo del estado de humedad del suelo y por diferencia de peso determinar el porcentaje de humedad.

Densidad aparente (D_a): se estimó a partir de una muestra de suelo sin alterar, la cual se sujeta con un hilo de cáñamo, posteriormente se pesa y se sumerge en parafina líquida a 60 °C, sin que se formen burbujas, se deja enfriar y posteriormente se pesa, luego se vuelve a pesar pero suspendido en agua (SEMARNAT, 2002).

Densidad real (D_r): se determinó de acuerdo con SEMARNAT (2002), empleando el método del picnómetro que consiste en pesar 5 g de suelo seco a 105 °C, introducirlo en un picnómetro seco, previamente pesado, adicionar agua destilada hasta un tercio del volumen y someter a succión por vacío durante 2 horas, retirar y completar volumen hasta dos tercios y nuevamente someter a vacío por 1 hora, completar volumen totalmente y pesar. Pesar el picnómetro lleno solo con agua destilada y realizar los cálculos correspondientes.

Porosidad total (P_t): se estimó con base en los resultados obtenidos de D_a y D_r de acuerdo con la ecuación propuesta en Gavande (1981).

El pH del suelo: se determinó en una relación 1:2.5 en H₂O y suelo y en solución salina de KCl y NaF por medio del potenciómetro marca ORION 3 Star., con electrodo de vidrio y sensor en AgCl₂

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): es la suma de los cationes intercambiables de un suelo, expresada en Cmol(+) Kg⁻¹ de suelo seco a 105 °C. Para realizar esta determinación se pesa 1g de suelo y se coloca en un tubo de centrifuga; posteriormente se agregan 5 ml de CaCl₂ 1N; pH 7 y mezcla con un agitador de vidrio; luego se agregan otros 5 ml de cloruro de calcio y se centrifuga durante 5 minutos a 3,000 rpm., desechando el sobrenadante. Este procedimiento se realiza 5 veces. Posteriormente la muestra de suelo se centrifuga con metanol (CH₃OH), para eliminar el exceso de CaCl₂ y por último se centrifuga otras 5 veces pero utilizando una solución de NaCl 1N; pH 7., la cual se guarda para titular por el método del Versenato (EDTA 0.02 N).

Carbono orgánico total (CO): la determinación de materia orgánica del suelo se evalúo a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black (1947). Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₄) y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄). Después de un cierto tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe³⁺ y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso (FeSO₄ 1N. pH 7). Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84 % del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. En los suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 ó (1/0.77).

Los elementos principales que constituyen la MO son C (52-58 %), O (34-39 %), H (3.3-4.8 %) y N (3.7-4.1 %), siendo su composición similar en suelos muy diversos. P y S también son elementos prominentes. La estimación del carbono orgánico total se determinó a partir de la siguiente ecuación.

$$CO = MO/1.298 \tag{1}$$

Donde:

CO = Carbono orgánico total (%)

MO = Materia orgánica (%)

Posteriormente, el contenido de carbono orgánico en suelos se calculó con base en la ecuación siguiente:

$$COS = CO (Da)(Ps)(Sup) \tag{2}$$

Donde: COS = Carbono orgánico de suelos ($t\ ha^{-1}$); CO = Carbono orgánico total (%); Da = Densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$); Ps = Profundidad del suelo (m); Sup = Superficie (m^2)

Cabe mencionar que el contenido de materia orgánica (MO) del suelo, es considerado un buen indicador de su fertilidad, principalmente por su capacidad potencial para proporcionar nutrientes a los cultivos como nitrógeno, fósforo, azufre. Además, tal contenido indica la capacidad relativa del suelo para retener nutrientes contra pérdidas por lixiviación; la estabilidad de su estructura y susceptibilidad a la erosión; el movimiento de agua y aireación; la capacidad amortiguadora del suelo para resistir variaciones de pH o salinidad, y las condiciones de laboreo y manejo del suelo. El contenido de materia orgánica del suelo, está en función, entre otros factores, del clima, la vegetación original del suelo, de los cultivos, del drenaje y del manejo.

En la Figura 3 se presenta el esquema metodológico empleado para la realización de este trabajo.

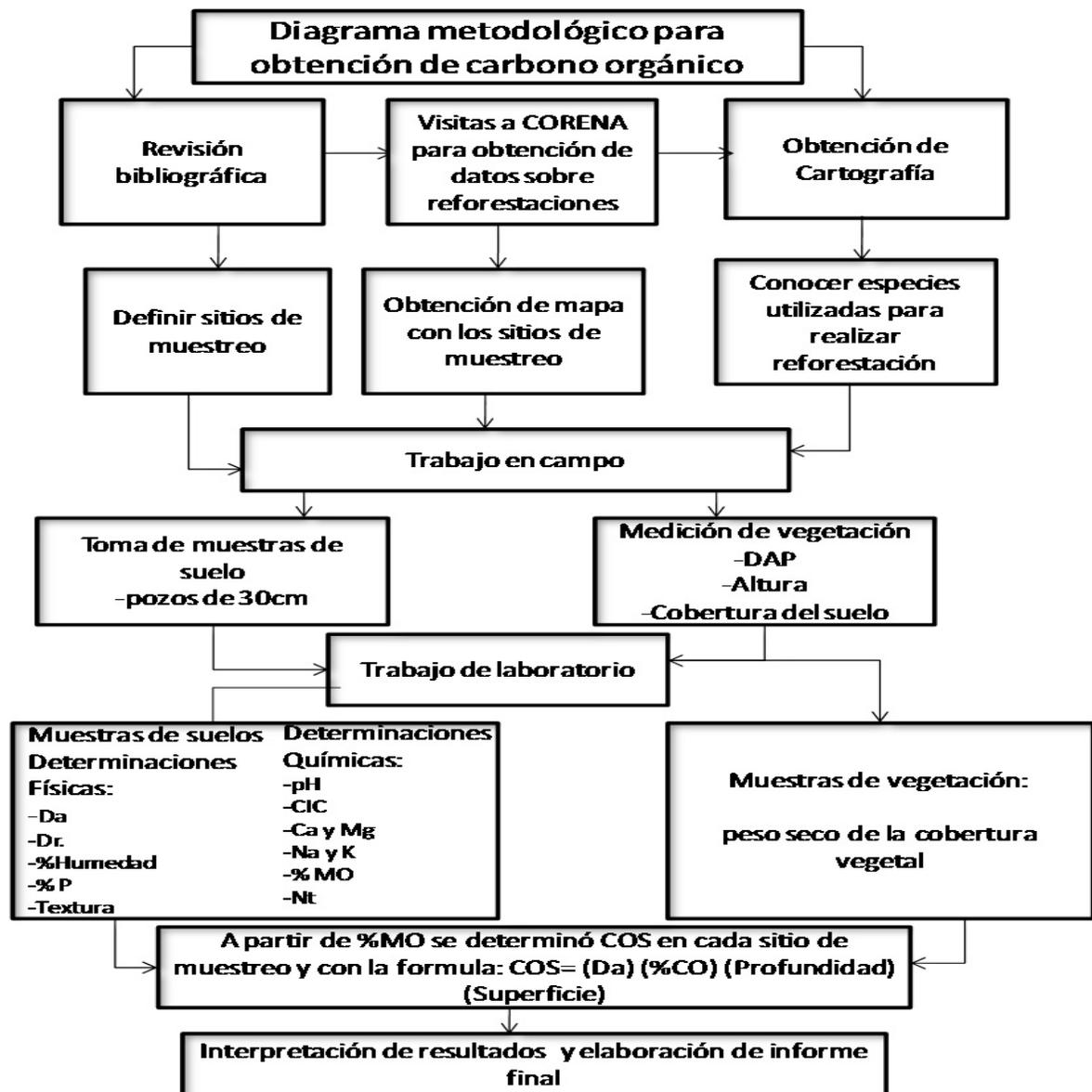


FIGURA 3. Diagrama metodológico

RESULTADOS OBTENIDOS

Niveles de COS por tipos de vegetación, uso de suelo, y áreas reforestadas.

A continuación se resumen algunos de los resultados obtenidos sobre los niveles de carbono que se obtuvieron en las áreas forestales naturales, de reforestación, con matorral, pastizales y en áreas agrícolas.

Áreas forestales naturales. En total se obtuvieron datos de ocho sitios de muestreo, que se caracterizan por presentar bosques de *Abies religiosa*, *Pinus spp* y *Quercus spp*. El bosque de *Abies religiosa* presentó el nivel más alto de carbono en suelo con 155.01 ton/ha, el bosque de *Pinus*

spp con 127.75 ton/ha de carbono y el bosque de *Quercus spp* con 124.84 ton/ha, lo anterior se debe a que son bosques que se encuentran bien conservados y donde sus hojas y acículas aportan cantidades importantes de materia orgánica a los suelos en estos sitios. Salomón *et al* (2007), señalan que la tendencia de acumulación de COS es influenciada por la edad de los árboles y que en general, las reforestaciones menores de 5 años tienen cambios negativos de COS.

Áreas de reforestación. Las especies más utilizadas en los sitios de muestreo son *Abies religiosa*, *Pinus spp*, *Cupressus lindleyi*, *Quercus spp*, en la Sierra de Guadalupe y Santa Catarina donde existe vegetación de matorral se utilizan en la reforestación la *Dodonaea viscosa*, *Quercus spp*, *Nolina parviflora*, y la parte de Xochimilco se emplean especies como el *Eucalyptus camandulensis*.

Los sitios con mayor cantidad de COS se presentan donde se han realizado reforestaciones con la especie *Abies religiosa* y *Pinus spp* con 155.2 ton/ha. Otro sitio donde el valor de COS es de 153.4 ton/ha es donde se ha reforestado con *Eucalyptos camandulensis* que se encuentra en la Sierra de Guadalupe; los promedios más bajos de COS se localizaron donde se ha reforestado con *Cupressus lindleyi* con 56.6 ton/ha y en donde existe una mezcla de especies el valor de COS es también de 85.9, los anteriores sitios se encuentran más cerca de las áreas urbanas que influyen en la sobrevivencia de las especies.

Áreas con matorral. Este tipo de vegetación se encuentra principalmente en la Sierra de Santa Catarina y en la Sierra de Guadalupe, que por sus características de clima más seco, permite el crecimiento de especies arbustivas como el *Opuntia spp*, *Senecio praecox*, *Calliandra grandifolia*, *Prunus serotina*, *Ensenhartia polystachia*, *Nolina parviflora*, *Acacia farnesiana*, *Prosopis glandulosa*, entre otros. Se estima que en general el COS con este tipo de vegetación es de 104.33 ton/ha, lo que se atribuye a que el estrato herbáceo es abundante, favoreciendo un mayor acceso a la luz (Salomón *et al.*, 2007).

Áreas agrícolas. Los suelos agrícolas se caracterizan por contener menores cantidades de materia orgánica que los suelos forestales, debido a que las prácticas agrícolas tienen una gran influencia en el almacenaje de carbono en el suelo o su liberación a la atmósfera como CO₂ (Sandoval *et al.*, 2003).

Los contenidos de carbono orgánico en suelos cultivados con maíz es de 32.9 ton/ha y para la avena forrajera de 42.6 ton/ha. Cabe mencionar que el carbono de las plantas entra a ser parte del almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) como plantas “litter”, raíces, exudado de raíces o excretas de animales. El incremento del COS dependerá de la cantidad y calidad de los residuos, pero también del tipo de clima (Sandoval *et al.*, 2003).

Los residuos de cultivos aplicados en la superficie se descomponen más lentamente que aquellos incorporados por la labranza ya que tienen menor contacto con los microorganismos

y el agua del suelo. Angers *et al.*, (1995) informaron que la conversión del carbono de los residuos de maíz en materia orgánica del suelo en la primera capa de 0-24 cm fue de cerca de 30% del total del ingreso de carbono. Evidentemente, hay diferencias cualitativas entre los residuos: el contenido de lignina del residuo tiene un efecto altamente positivo en su acumulación, en particular, las raíces son fácilmente transformadas en materia orgánica estable.

Áreas con pastizal. Los pastizales en el área de estudio se encuentran en asociación principalmente con los bosque de pino, donde predominan las especies de *Festuca toluensis* y *Muhlenbergia macroura*, que son pastos amacollados, y que en el área de estudio forman un cobertura permanente en el suelo, por lo cual contribuyen en gran medida a la formación de materia orgánica y por lo tanto a la acumulación de carbono orgánico en el suelo donde se estima en promedio 90 ton/ha, cifra que es casi el doble del agrícola y de matorral fue de 104.33 ton/ha.

Salomón *et al.* (2007), mencionan que la incorporación de nuevo carbono al suelo se atribuye principalmente a los aportes que hace la reforestación a través de la hojarasca e indican que a los 20 años el porcentaje de COS proveniente de reforestaciones con pinos es de 39.2 % a una profundidad de 0-10 cm., mientras que en los cultivos de maíz el incremento fue de un 27 % en 23 años.

Niveles de COS en sitios reforestados por delegación

Los resultados mostraron que la delegación Madalena Contreras es la que presenta una mayor concentración de COS en el suelo con 182.5 ton/ha, debido a que presenta una cobertura vegetal de *Abies religiosa* y a la humedad que influyen en la concentración de COS; las delegaciones de Milpa Alta, Tlalpan, Cuajimalpa y Gustavo A. Madero oscilan entre los 104.8 a 146.4 ton/ha de COS, los valores más bajos se presentaron en las delegaciones Tláhuac con 98.6 ton/ha y Xochimilco con 77.8 ton/ha donde predomina la vegetación de matorral (Figura 4).

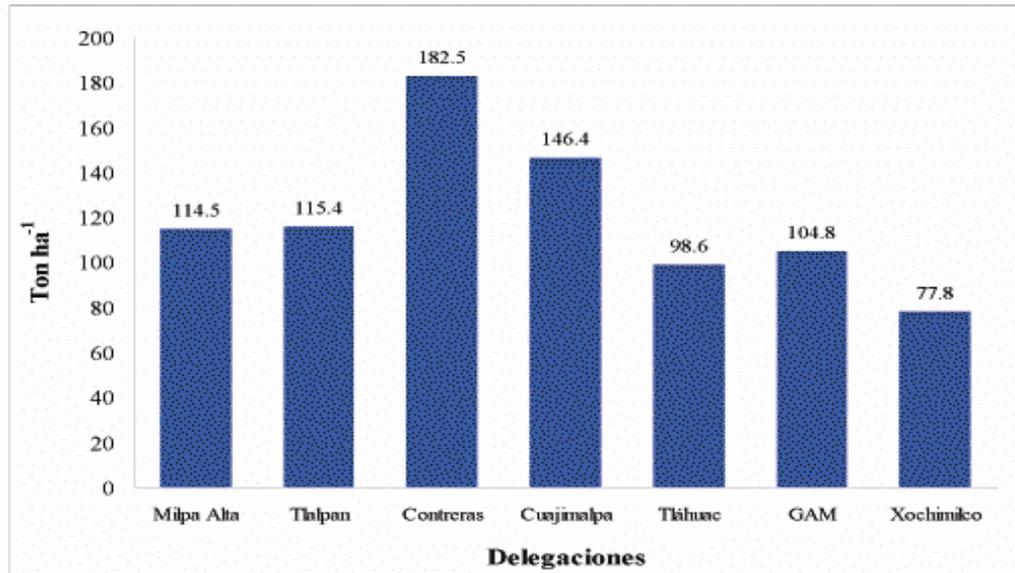


FIGURA 4. Cantidad de carbono orgánico en suelo de las delegaciones que integran el Suelo de Conservación del Distrito Federal

En la Figura 5, se ilustra y resumen los niveles de concentración de carbono en el suelo, en el área determinada como Suelo de Conservación SC-DF; el nivel muy alto corresponde a valores mayores a 150 ton/ha, alto de 100-150 ton/ha, medio de 50-100 ton/ha y bajo de <50 ton/ha.

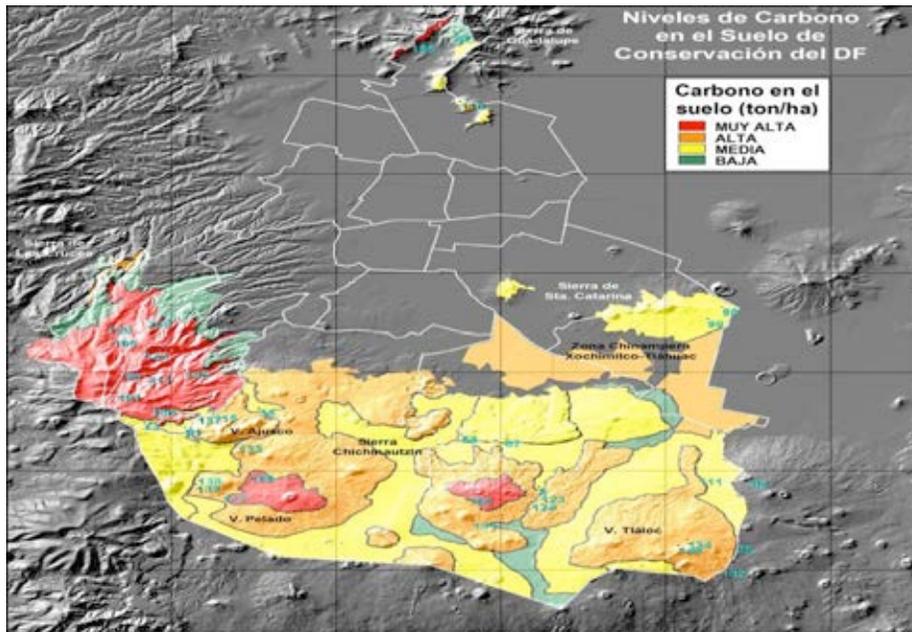


FIGURA 5. Niveles de COS en los suelos de conservación del Distrito Federal

CONCLUSIONES

El mayor contenido de COS se presenta en los sitios con vegetación de *Abies religiosa* con reforestación de *Pinus spp*, por lo que la importancia de la reforestación radica en los beneficios de protección al suelo, regulación microclimática y captación de carbono.

La vegetación que más contribuye a la captura de COS son los bosques de *Abies religiosa*, seguida de las reforestaciones con más de una especie *Pinus– Cupressus* y de *Pinus spp*.

Las áreas agrícolas tienen una capacidad menor de retener COS llegando a ser casi la mitad de lo que se ha registrado en áreas con vegetación forestal; por otra parte los cultivos que se siembran en surcos (maíz), retienen menos de la mitad de COS en comparación con los cultivos de cobertera (avena forrajera).

El relieve es un factor que influye en las concentraciones de COS, ya que en las laderas de las montañas y en los piedemontes los contenidos de COS son mayores debido a la cobertura vegetal y en las planicies las concentraciones son menores, debido a la actividad agrícola que en ellas se desarrolla.

De acuerdo a los niveles establecidos de COS para el SC los niveles muy altos se localizan en la Sierra de las Cruces y la Sierra de Guadalupe, que se caracterizan por ser geológicamente formaciones antiguas; otras áreas en este nivel son las partes más altas que corresponden al Volcán El Pelado, Cuautzin y Tláloc donde existe una mayor cobertura vegetal y una mayor humedad en el suelo.

Es importante seguir con los proyectos de reforestación en el SC, porque existe una cobertura vegetal permanente que mantiene altos niveles de COS; sin embargo es necesario llevar a cabo un programa de planeación, para evitar que se sigan reforestando los mismos sitios, establecer áreas nuevas, llevar registros por fecha de plantación y contar con las especies adecuadas a cada ecosistema, para garantizar un alto índice de sobrevivencia.

REFERENCIAS

- Ahedo R. 2000. Estimación de biomasa radical y almacenes de carbono en los Tuxtlas, Veracruz, México: los cambios con en el uso del suelo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México, D. F.
- Andrade, J.H., Muhammand,I. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agrofostería en las Américas* 10(39-40): 109-116
- Báez, P. 2008. Formación de agregados y captura de carbono en materiales de origen volcánico de México. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. México. pp: 13-28.

- Bockeim, J.G. 1991. Suelos forestales. Noriega editores. México. pp:119-139
- Bonan, G. 2002 Ecological climatology concepts and applications. Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom
- Castillo Rodríguez, M.E. Procesos exógenos en la Delegación La Magdalena Contreras Ciudad de México, Tesis Licenciatura en Geografía FFyL UNAM, México, 108 pp. 2003.
- Ciesla, W, M. 1996. Cambio Climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. Roma, FAO. 147 p.
- Chorlaví, G. 2007. Una mirada al cambio climático. Intercambios 6 (12) 2007. pp 1-11
- CORENADER, 2002. Programa de reforestación. Secretaría del Medio Ambientes, Gobierno del Distrito Federal.
- Dale, V. 1994. Effects of Land Use Change on Atmospheric CO₂ Concentrations: Southeast Asia as a Case Study. Springer-Verlag. N.Y. USA.
- Doran, J., Parkin, T. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set, in Methods for assessing soil quality, J.W and Jones (eds), Soil Science Soc. pp 25- 37.
- Estrada, H, I. 2003. Carbono del suelo acumulado en sistemas agrícolas en tres microcuencas del Edo. de Oaxaca. Colegio de Posgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México. pp. 12-19.
- Estrada, H, I. 2007. Carbono en biomasa aérea en suelo y su relación con la fracción fina de este reservorio. Colegio de Posgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México. pp. 1-24
- Etchevers, B. J., Monreal, M., Hidalgo, M. M. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción de laderas. Colegio de Posgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México. pp. 8-15
- Etchevers, B.J. 2006. El carbono y los sistemas terrestres. Ciencia y Desarrollo. pp 47- 52
- FAO. 2001. Situación de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación. Depósitos de documentos de la FAO en http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=docrep/htm.
- FAO. 2002. Captura de carbono en suelos para un mejor manejo de la Tierra. World soils resources. Report Rome, Italy 73 p.
- Follett, R. F. 2001. Soils management concept and carbon sequestration cropland Soils, Soils & Tillage Research 61:77-92

- García, O., y Ordoñez, D. 1999. El papel de los suelos forestales en la captura de carbono. *Nuestro Bosque* 1(1): 8-11
- González, M., Etchevers, B., Hidalgo, M. 2008. Carbono en suelos de ladera: Factores que deben de considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*. 42 (7): 741- 751.
- Gueye, S. K. 2008. Almacén y dinámica del carbono en suelos de ladera en un gradiente micro climático en Tuxpan, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México. pp. 11-22.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman y V.J. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology* 80(6): 1892-1907.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman y V.J. Jaramillo. 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications* 10: 515-527.
- Jackson, M. L. 1982. Análisis químico de suelos. 4 ed. Ed. Omega. Barcelona, España. 662 p.
- Klein, D., Fuentes, P., Schmidt, A. 2008. Soil organic C as affected by silvicultural and exploitative intervention in *Nothofagus pumilio* forests of Chilean Patagonia. *Forest Ecology and management* (255): 3549-3555.
- Lal, R. 2003. Global potencial of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Critical reviews in Plant Sciences* 22 (2):151-184
- Leblanc, R. H., J. J. Russo., Cueva, Subia, E. 2006. Fijación de carbono en palma aceitera en la región trópic húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical* 2(2): 199-202.
- Macera, O. 1996. Deforestación y degradación forestal en México. Documento de trabajo 19. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A. C. Pátzcuaro, Michoacán, México. 50 p.
- Martínez, H. E., Fuentes, E. J. P., Acevedo, H. E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Suelo y Nutrición Vegetal* 8(1): 68-96
- Melillo, J. M., P.A. Steudler, J.D. Aber y R.D. 1989. In: M.O. Andreae y D.S. Schimel (Eds.) Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Wiley & Sons, p. 263-280.
- Mosier, A., D. Schimel, D. Valentin, K. Bronson y W. Parton. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature* 350: 330-332.
- Mooser, F. Historia tectónica de la Cuenca de México. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, Núm. 15, pp. 239-245, 1963.

- Mooser, F., Montiel Arturo y Zuñiga Ángel Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, Tectónica Regional y Aspectos Geotérmicos (1937-1996). Comisión Federal de Electricidad. México. 27 pp. 1996.
- Ordóñez, A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F.
- Ordóñez, A. 1999. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D. F.
- Ordóñez, J.A.B. y O. Masera. 2001. La captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1):3-12.
- Ortiz, V y Ortiz, A. 1995. Edafología. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Edo. de México. pp: 135-138
- Raison, R.J., Brow,A.G., Flinn, D. 2001. Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management. CABI Publishing in association with The International Union of Forestry Reseca Organizations.
- Reicosky, D. C., Kemper, W. D., Langdale, G. W., Douglas Jr., C. L. and Rasmussen, P. E. 1995. Soil organic matter chances resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Cons.* 50:253-261.
- Rice, W. 2001. Secuestro de CO₂ atmosférico en el suelo. 9^a ed. Congreso Nacional de APRESID. 9(88): 34-48
- Salomón, L., Gómez, G., Etchevers, B. 2007. Acumulación de Carbono Orgánico en el suelo en reforestaciones de *Pinus michoacana* *Agrociencia* 41(7): 711-721.
- Sandoval, M., Mardones, F., Junod, J. M. 2003. El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Universidad del Bío-Bío. Theoria* Vol.12:65-43
- Saugier, B., Pontailler, J. 2006. El ciclo global del carbono y sus consecuencias en la fotosíntesis en el Altiplano boliviano. *Ecología en Bolivia.* 41 (3):71-85
- Sandoval, E. M., Stolpe, L. N., Zagal, V. E., Mardones, F. M., y Junod, M. J. 2003. El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Theoria.* Vol. 12: 65-71.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Publicado el 31 de diciembre de 2002 en el Diario Oficial de la Federación. Segunda Sección. México. 73p.

Schlesinger, W. H., 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potencial of soils. *Nature* 348: 232-234.

SMA. Secretaría del Medio Ambiente, Estrategia local de acción climática de la Ciudad de México/Acciones locales, logros globales. S.M.A. 122 p.

Smith, R. L., T. M. Smith. 2005. *Ecología*. Ed. Pearson Addison Wesley. Madrid, España. 664 p.

Swift, S.R. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil. Science*. 166(11): 258-871

Terradas, J. 2001. *Ecología de la vegetación de la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes*. Ediciones Omega. Barcelona.

Vergara, S., Etchevers, B., Vargas, H. 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *TERRA Latinoamericana*. 22(3): 359-367.

Verstappen, H. T., R. A. van Zuidam., A. M. Meijernink., J.J. Nossin. 1991. *The ITC System of Geomorphologic Survey*. 2nd. edition. International Institute for Aerospace Survey and earth Sciences (ITC) Publication Number 10. Netherland.

Walkey, A. and Black, I. A., 1947. An examination of the deghareff method for determining soil organic and a proposed modification of chromic acid titration method. *Soil Science* (37) p. 29-38.

CAPÍTULO VI

Recurso Suelo, Sector Planeación

Vulnerabilidad del suelo de conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación

Coordinador

José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz¹

Colaboradores

Teresa Adriana Arredondo Martínez, Christian Agustín Vázquez, Villanueva, Yair Puente Martínez, Vanessa Arely Sepúlveda Jiménez, Irma Estefanía García Sánchez, Oscar Aguado Bautista, Jaime Santiago Mariscal, Zuelclady Araujo Gutiérrez, Guillermo Jacobo Hernández, Miguel Ángel Castro Martínez, Guadalupe Araceli Flores Ramírez, Luis Oscar Fernández Piña, Lucila María Balam de la Vega

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar, en tres etapas, un Estudio Integral sobre el Uso Sostenible y el Aprovechamiento Potencial del Suelo de Conservación del Distrito Federal, cuyos resultados se integren en una misma plataforma tecnológica de información documental, estadística y cartográfica. En el caso documental, se incluyeron los aspectos ambientales, sociales, económicos y normativos; en conjunto, esta herramienta coadyuva a la adecuada toma de decisiones, en la realización de estrategias, políticas de bienestar social y ambiental en cuanto al Suelo de Conservación (SC). Para el logro de estos objetivos y en adición a una exhaustiva búsqueda de información documental, estadística, cartográfica y grafica digital, se determinó el espacio de trabajo geográfico a revisar y se analizó la vulnerabilidad ambiental del SC en su contexto tierra, agua y aire. Lo anterior, en consideración de los servicios ambientales que ofrece este tipo de terreno. En esta primera etapa del proyecto, la pretensión central fue estructurar la plataforma tecnológica de información, por lo que en esto destacan tres aspectos: el desarrollo tecnológico para la estructuración de dicha plataforma; la cantidad y calidad de la información a integrar en ésta; y la interpretación que de su visualización pueda aprovecharse para diversos fines, entre los que destacan la definición de estrategias para la promoción de servicios ambientales. Para que esto último esté al alcance de los tomadores de decisión, así como de profesionistas o interesados en general en este tema y que no cuenten con conocimiento o entrenamiento en las técnicas informáticas, se creó una plataforma tecnológica que permitiera visualizar

¹ Pronatura México, A.C.

diferente información expresada cartográficamente, sin requerir un software especializado (tipo Google Earth). Otra característica de la plataforma fue facilitar la descarga desde Internet, de la cartografía temática y especializada que se generó, y poder usarla en forma gratuita; es factible visualizar desde la Internet 26 diferentes coberturas de información (<http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx:8080/suelocon/mapa.php>), disponibles en distintos formatos homologados (img, rrd, tfw, jpg, shp, tif) y con un *software* accesible al usuario en general. La relevancia de esta herramienta tecnológica de información cartográfica para la Ciudad de México es que permite dar seguimiento a los procesos de la dinámica urbana, respecto a variables como: crecimiento y densidad poblacional, hidrología, clima, predios irregulares, apoyo a productores, áreas de ocurrencia de enfermedades (respiratorias, gastroentéricas y otras) y demanda de agua. Igualmente, identificar áreas: prioritarias para conservación o mantenimiento, vulnerables al cambio climático, de relevancia para brindar servicios ambientales, en peligro por alteración de la cobertura vegetal o por cambio del uso del suelo, entre las principales. De esta manera, la plataforma permite desarrollar: una caracterización climática del SC, una línea de tiempo respecto a los procesos histórico-políticos del decreto del SC, y un mapa señalando la localización de los predios irregulares por delegación política, entre otras posibilidades. En adición, esta investigación contó con un importante número de estudiantes de diferente nivel (licenciatura y posgrado) y especialidad (informática, biología, medio ambiente), cuya participación permitió a unos concluir sus tesis y a otros incursionar en este relevante tema; en conjunto, se logró especializar a estos recursos humanos. De igual manera, se tuvo la participación de un funcionario público. En contraparte, las dificultades enfrentados fueron: (i) cambio de institución del responsable de proyecto, (ii) acceso restringido a la información gubernamental y lenta respuesta en el caso de proporcionarla, (iii) poca disponibilidad de cartografía temática especializada, (iv) presupuesto insuficiente. En lo relativo a la siguiente etapa, se plantea desarrollar el segundo componente del visualizador de cartografías, que incluya un mayor número de capas de información temática especializada y que pueda interrelacionarse con otros resultados del proyecto. En conjunto, esta herramienta actualizada permitirá identificar áreas vulnerables derivada de la demanda de recursos y de espacio, o por incidencia de enfermedades infecciosas, o por crecimiento irregular; igualmente, se podrá evaluar la cobertura vegetal actual y su distribución, así como identificar los procesos de cambio en dicha cobertura, comparando diferentes años. Estas tareas requerirán de recursos humanos, los que continuarán su formación y especialización. En consideración de las dificultades enfrentadas en la primera fase, se estima necesario en la siguiente, contar con el apoyo de los funcionarios en cuanto a la obtención de información, misma que se sugiere forme parte de la base de datos que está conformando el Centro Virtual de Cambio Climático; de esta manera, estará disponible para las actuales y siguientes administraciones del D.F., facilitando así dar un seguimiento oportuno al tema de suelo de conservación, coadyuvando a una mejor toma de decisiones.

INTRODUCCIÓN

El vertiginoso crecimiento urbano en el Distrito Federal, ha ocasionado la demanda de muchos recursos naturales y espacio para el desarrollo de la urbe. El Suelo de Conservación (SC) ubicado en el sur de la ciudad, es un pulmón para la misma, aunado a los servicios ambientales que brinda. Dicha región es, sumamente vulnerable a los cambios que se manifiesten en las condiciones climáticas, la conversión a un uso de suelo, los quehaceres sociales y las acciones políticas; es por ello que, el presente estudio integra aspectos que van desde la cobertura vegetal y uso del suelo hasta los elementos políticos de la delimitación del SC, a fin de dar información actualizada y detallada en cartografía temática digital dinámica, que puede ser desplegada en cualquier computadora desde el internet; así, los tomadores de decisiones, investigadores, estudiantes y público en general, puede acceder a la información y visualizarla de una manera versátil y sin necesidad de software especializado. Se tienen actualmente 26 coberturas temáticas que se pueden bajar con sus respectivas bases de datos, o en diferentes formatos para que las personas las usen en su trabajo, o bien, se puede consultar en la siguiente liga: <http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx:8080/suelocon/mapa.php>

Considerando la deforestación como el proceso en el cual se presenta una sustitución de cobertura vegetal original por áreas de uso agrícola, pecuario y forestal, para un intervalo de tiempo determinado, se podría indicar que, la deforestación, misma que ha incrementado drásticamente durante las últimas cuatro décadas, es una causa de pérdida de la diversidad biológica a nivel genético, poblacional y ecosistémico.

La reducción de la cubierta vegetal ha ocasionado problemas como cambios regionales de los regímenes de temperatura y precipitación, modificaciones en los ciclos hídricos, contribuyendo al calentamiento global, la disminución en el secuestro de bióxido de carbono, y la pérdida de hábitats o la fragmentación de ecosistemas. En particular, en el Distrito Federal se forma una isla de calor, que da origen a otros procesos, modificando las condiciones climáticas y de salud, por ejemplo, enfermedades de tipo respiratorio en el SC-DF.

Dichos procesos pueden tener consecuencias sobre el bienestar de la humanidad y salud general del ambiente, en los países en vías de desarrollo la deforestación se debe al cambio de uso de suelo como resultado de la presión demográfica sobre el uso de los recursos naturales, así como un inadecuado aprovechamiento de la tierra.

Las pérdidas de cobertura vegetal, no sólo ha afectado a los ecosistemas naturales sino, también a los cuerpos de agua superficiales y por tanto a los recursos hídricos del país.

OBJETIVOS

El propósito del presente estudio es identificar diferentes áreas, mediante el análisis espacial y de la cartografía temática, donde se puedan determinar y analizar, de un lado diversos

cambios en la cobertura vegetal, forestal y uso del suelo, derivado de la modificación del paisaje por consumos energéticos, crecimiento poblacional, transporte y procesos industriales; de otro lado se buscó integrar la información en 26 mapas temáticos que se articulan mediante el uso de un servidor de mapas, con el propósito de que cualquier usuario los pueda consultar desde la internet, sin la necesidad de un *software* específico.

METODOLOGÍA

Mediante un método de cruce de cartografía, se puede tener información actualizada de diferentes procesos que ocurren en el (SC-DF); es por ello que, se desarrolla la plataforma visualizador de mapas con información relevante para que las personas que habitan el SC-DF, identifiquen áreas vulnerables al cambio climático y en particular a áreas que son vulnerables al cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo, ya que se deben tomar acciones inmediatas para frenar el deterioro ambiental y prevenir catástrofes.

Por lo expuesto anteriormente, el presente estudio integra la información temática y la presenta en diferentes formatos cartográficos: como imágenes y como bases de datos que se pueden usar con un *software* específico para el procesamiento de la información geográfica y en un visualizador de mapas temáticos que homologa todas las características propias del formato para un acceso sencillo, claro y conciso, porque el SC-DF es vulnerable al cambio climático, aunado a los procesos socio-ambientales de la dinámica propia de una mega urbe.

RESULTADOS OBTENIDOS

Se han generado 26 coberturas temáticas y se expresan en mapas que se pueden descargar en formatos como: jpg que es una imagen, shp para usar con programas de sistemas de información geográfica como el Arcview, o bien, se puede trabajar con los mapas desde el servidor e imprimir.

Se desarrolló una plataforma especializada en la integración de la información temática, homologando los criterios de visualización; dicha plataforma contiene las 26 capas de información cartográfica que permite el acceso y visualización de la información (Ver figura 1), sin el uso de un programa de cómputo específico y sin experiencia en el manejo del mismo.

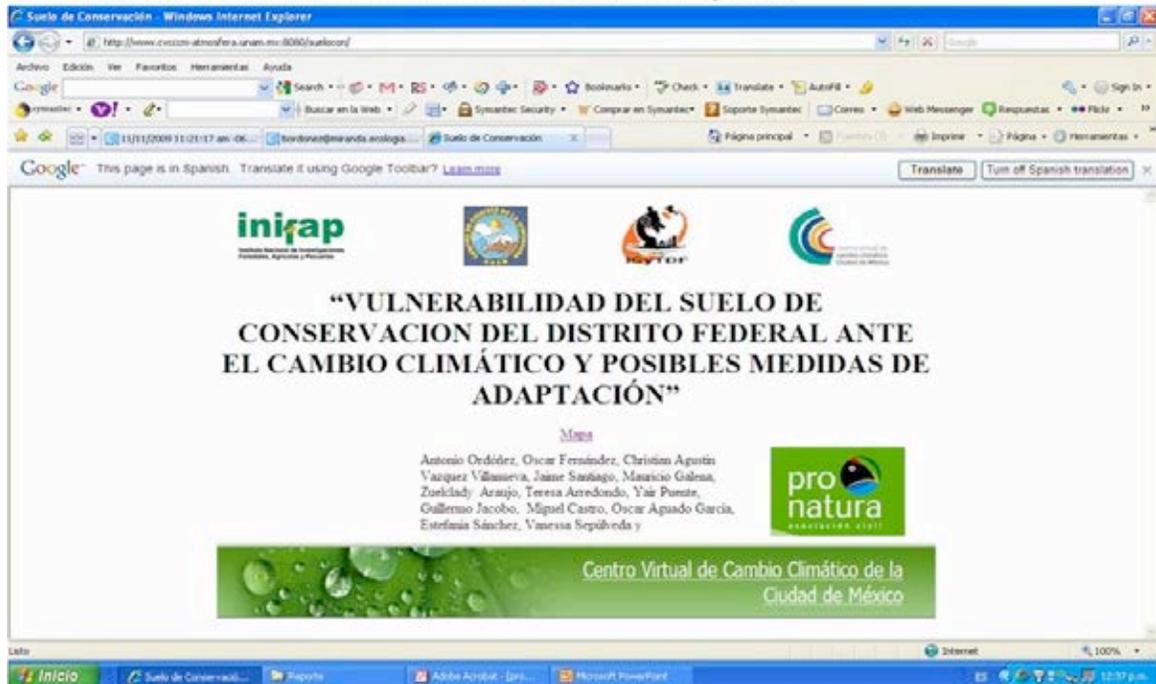
Se ha revisado las tendencias actuales de crecimiento poblacional y las áreas que han sufrido una conversión reciente y que, presentan algún tipo de irregularidad al estar ubicadas en el SC.

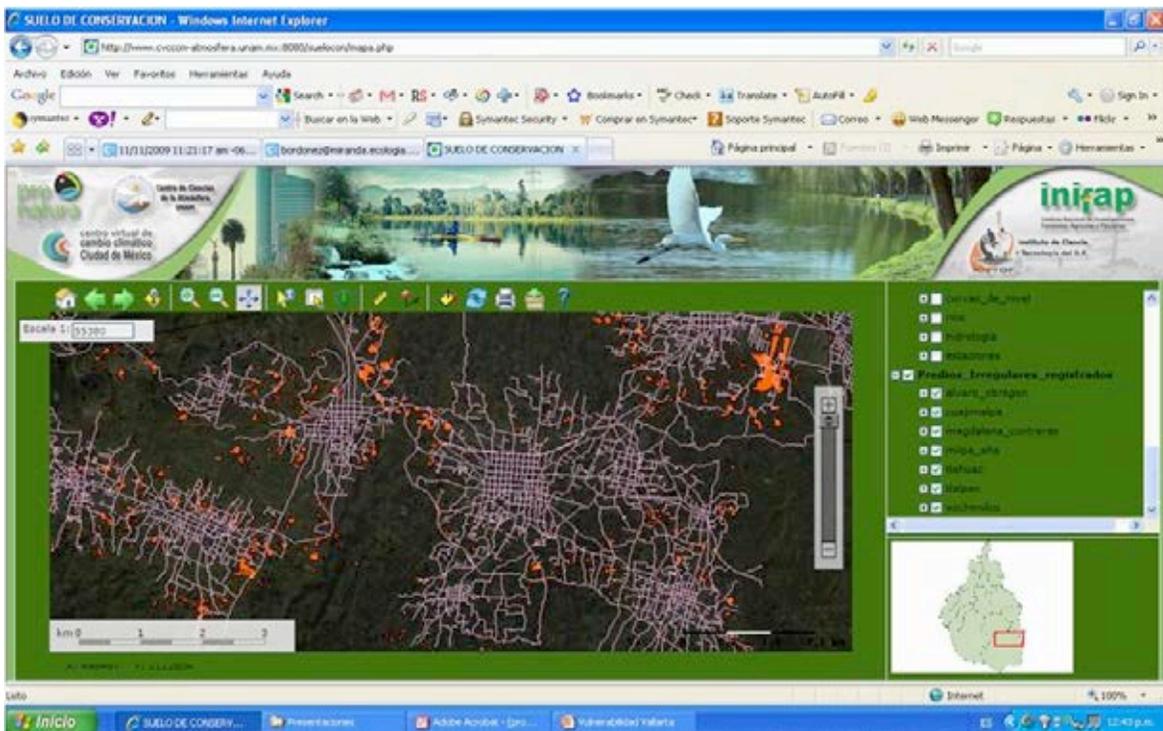
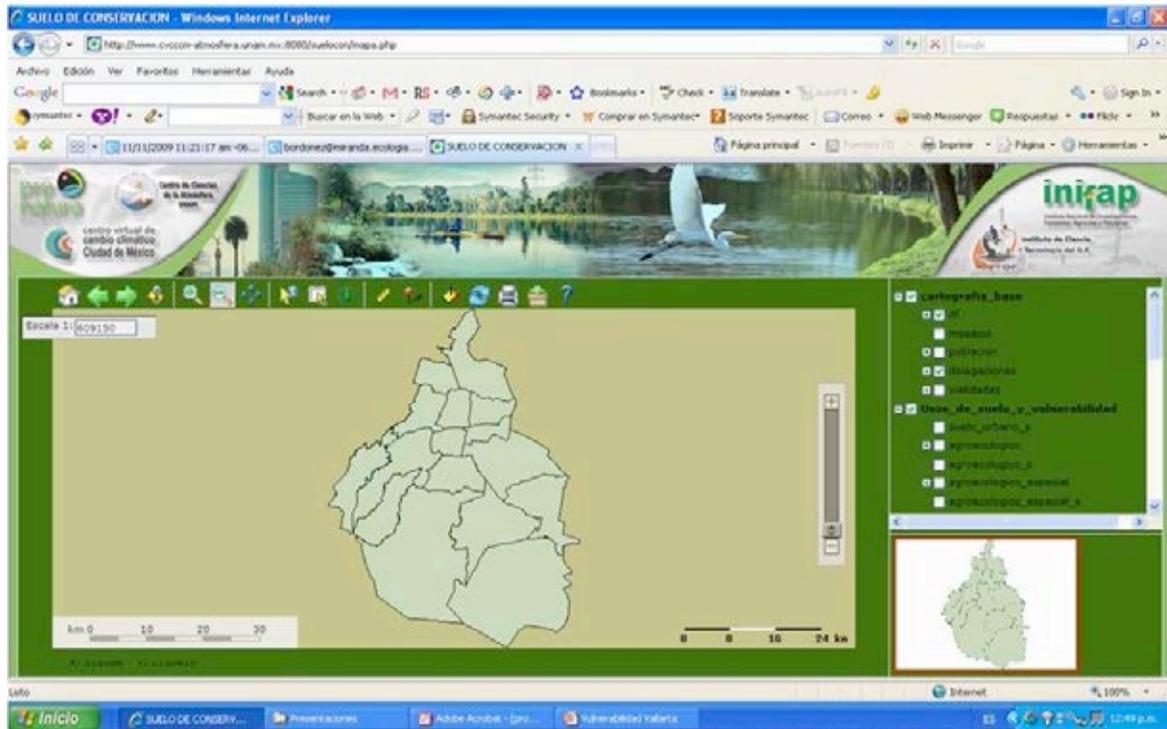
Se realizó la línea de tiempo en el ámbito político desde el decreto del suelo de conservación hasta la fecha, donde se aprecian diferentes aspectos laxos en su decreto y la ausencia de una definición concreta y colindancias de dicha área.

En cuanto a la vulnerabilidad del suelo de conservación se encuentra que la presión del crecimiento urbano y demanda de alimentos, disminución de áreas verdes que pudieran ofrecer servicios ambientales; pone en peligro a todos los ecosistemas, incluido el suelo de conservación, al afectar la cobertura vegetal con tendencia al uso urbano.

Uno de los ecosistemas claramente afectado, son los lagos y manantiales de la zona, esto ha resultado en la pérdida de recarga hídrica, calidad y cantidad de la disponibilidad del recurso, aunado a la posible contaminación química que se pueda presentar.

Plataforma (visualizador temático de los mapas)





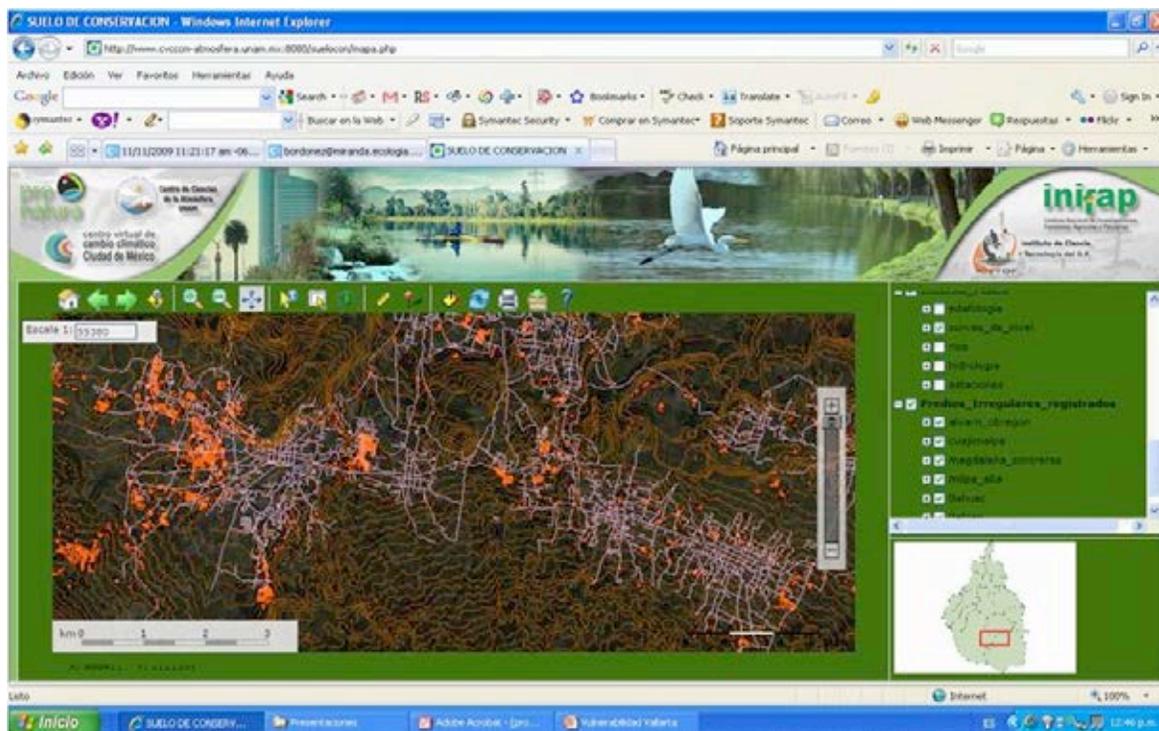


FIGURA 1. Ejemplos de la plataforma para la integración de información

CONCLUSIONES

Es importante recalcar la necesidad de controlar y restringir las causas de la deforestación a nivel regional y en función de los distintos tipos de vegetación que se afectan mayormente en el Distrito Federal.

Es necesario frenar el cambio en el uso del suelo por expansión de las fronteras urbanas principalmente la agrícolas y pecuarias para empezar a controlar el problema del cambio hacia un uso del suelo cada vez más degradado.

Se requiere empezar a evaluar financieramente los servicios ambientales que ofrece la permanencia y manutención de los ecosistemas naturales para los asentamientos poblacionales y las regiones aledañas donde aún se ubican fragmentos de vegetación natural para sensibilizar a la población de lo que se pierde en cuanto a calidad y salud del ambiente con dichos procesos.

Desde el año de 1987 a la fecha, se han reportado 48 eventos importantes vinculados con la planeación, administración y aprovechamiento del SC-DF; dichos eventos, están relacionados con la definición del suelo de conservación aunado a la necesidad de la delimitación del polígono que conforma el suelo de conservación.

Existe inconsistencia en los decretos y duplicidad de formatos respecto a la definición política del suelo de conservación, esto, da pie al cambio en la cobertura vegetal hacia un uso del suelo, aunado a los conflictos sociales y pérdida de los servicios ambientales. Por ello, se considera importante dar continuidad al programa de ordenamiento territorial propuesto por el gobierno del Distrito Federal, ya que el área es atractiva para el establecimiento de población marginal que se está incorporando al D.F.

Se necesita un manual que explique el uso y los alcances de la plataforma de visualización de la cartografía temática generada, incorporar información de otras áreas de investigación, seguimiento y actualización para que, los tomadores de decisiones, investigadores y público en general, dispongan, accedan, consulten, utilicen y disfruten de la información generada con responsabilidad y para los fines por los que fue diseñada.

REFERENCIAS

Administración Pública del Distrito Federal. 2006. Acuerdo por el que se aprueba el Programa de Manejo del Área Natural Protegida con carácter de Zona de Conservación Ecológica “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco”. Gaceta del Distrito Federa. 11 de enero de 2006.

Anta F., Salvador, Arreola M., Arturo, *et al.*, (Comps.). 2006. Ordenamiento Territorial Comunitario: un debate de la sociedad civil hacia la construcción de políticas públicas. INE-SEMARNAT, Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica, A.C. p 254. México.

Aguilar C., E. Martínez y L. Arriaga. 2000. Deforestación y fragmentación de ecosistema: ¿qué tan grave es el problema en México? Biodiversitas. Comisión Nacional de la Conservación de la Biodiversidad. 5 (30), p 7-11.

Asamblea Legislativa del Distrito Federal. III Legislatura. Ediciones Fiscales ISEF S.A. 2006.

Agenda Ecológica del Distrito Federal 2006. Ediciones Fiscales ISEF S.A. México.

Asamblea Legislativa del Distrito Federal. I Legislatura. 2000. Ley Ambiental del D.F. Gaceta Oficial del Distrito Federal. 13 de enero de 2000. pp 62. México.

Asamblea Legislativa del Distrito Federal. I Legislatura. 2000. Programa General de Ordenamiento Ecológico del D.F. Gaceta Oficial del Distrito Federal. 01 de Agosto, 2000.

Asamblea Legislativa del Distrito Federal. III Legislatura. 2005. Decreto de delimitación de las áreas de actuación del programa general de desarrollo urbano del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. 21 de enero de 2005.

Asamblea Legislativa del Distrito Federal. III Legislatura. 2006. Ley para la retribución por la protección de los servicios ambientales del suelo de conservación del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal. 04 de octubre de 2006.

Barton, D., L. Merino. 2004. La experiencia de las comunidades forestales en México: Veinticinco años de silvicultura y construcción de empresas forestales comunitarias. INE. pp 270. México.

Boyer, C. R. 2007. Revolución y paternalismo ecológico: Miguel Ángel de Quevedo y la política forestal en México, 1926-1940. Historia Mexicana. Julio – Septiembre. LVII. 1:91-138.

Cámara de Diputados H. Congreso de la Unión – Centro de Documentación, Información y Análisis. 2006. Informes Presidenciales: Lázaro Cárdenas Del Río. DSIA. p 16. México.

Cedeño, H. y D. R. Pérez. 2007. La legislación forestal y su efecto en la restauración en México. INE. <<http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/467/cedenoyperrez.html>> (6 de julio de 2009).

Comisión Nacional Forestal. 2001. Programa Estratégico Forestal para México 2025. p 191. México.

http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/normateca/PEF_2025.pdf (7 en julio de 2009).

Comisión Nacional Forestal. 2006. Programa de Ordenamiento y Fortalecimiento a la Autogestión Silvícola: Evaluación externa PROFAS 2005.

http://www.cnf.gob.mx/documentos/evaluaciones/2005/INFORME%20FINAL_PROFAS_2005.pdf> (11 de junio de 2009).

Comisión Nacional Forestal. 2007. Programa Hidrológico Forestal Región XIII. Resumen Ejecutivo.

http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/planeacion/Programas_Hidrologicos_Forestales/Reg_XIII.pdf> (7 julio de 2009).

Comisión Nacional de Población (CONAPO). <http://www.conapo.gob.mx>. (Consultado en agosto 2009).

Cortés-Ortiz, A. 1990. Estudio preliminar sobre deforestación en la región fronteriza del río Usumacinta. Reporte Interno. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. pp. 719-727.

Cortina Villar, S., P. Macario Mendoza y Y. Ogneva-Himmelberger. 1999. Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas Boletín* 38:41-56.

Curtis H, S Barnes. 2000. *Biología*. Editorial panamericana. pp 1491. España. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. 1994. *Ingeniería Ambiental de la Ciudad de México*.

Dirzo, R. y M.C. García. 1992. Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a neotropical area in southeast Mexico. *Conservation Biology*, 6(1):84-90.

Gaceta oficial del Distrito Federal. Asamblea Legislativa del Distrito Federal. 2003. Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal. 31 de Diciembre de 2003

Guevara A. 2005. *Política Ambiental en México: Génesis, Desarrollo y Perspectiva*. No. 821:163-175

H. Congreso de la Unión. 2003. *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. Diario Oficial de la Federación, 25 de febrero, 2003. México.

Instituto Nacional de Geografía e Informática. 1997. *Estadísticas del Medio Ambiente*. México. INEGI. México, en prensa

Instituto Nacional de Geografía e Informática. 2009. www.inegi.org.mx. (Consultado en agosto 2009).

León, C. 2007. *Análisis de vulnerabilidad y desarrollo de medidas de adaptación para el Plan de Cambio Climático de la Ciudad de México*. Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal.

Magaña, V. *La Vulnerabilidad de México al Cambio Climático: el caso del agua en el centro de México*, Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Mas, J.F. 1996. Estimación preliminar de las tasas de deforestación en el estado de Campeche. *Jaina*, 7(1). pp. 5-6.

Mas, J.F., V. Sorani y R. Álvarez. 1996. Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación. *Investigaciones Geográficas Boletín*, número especial 5. p. 43-57.

Meléndez, A. y F. J. Romero. 2007. *Humedales del Centro de México*. 2ª parte: Aves de Xochimilco. DUMAC. México.

Meyer, W.B., Adger, W.N., Brown, K., Graetz, D. Gleick, P., Richards, J.F. and Magalhães, A. Land and water use. In: Reyner, S. 1998. Human choice and climate change. Vol.II. Resources and technology.

Molina González, David. 2007. Estudios Regionales Forestales de las UMAFORES: 0901, 0903 y 0904 del Distrito Federal. México.

O'Brien , K. 1995. Deforestation and climate change in the Selva Lacandona of Chiapas, Mexico: some preliminary results. Norsk Geografisk Tidsskrift, 49. pp. 105-122.

Ramírez, R. I. 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangeo, michoacan y estado de México, 1971-1994-2000. Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. 45: 39-55.

Secretaría de Desarrollo Social Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2005. Delimitación de Zonas metropolitanas. pp 35. México.

Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2006. Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México. Primera Ed. México.

<http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/elac/07_df_estrategia_local_accion_climatica.pdf> (11 de junio de 2009).

Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2007. Agenda Ambiental de la Ciudad de México, Programa Sectorial del Medio Ambiente 2007-2012. p 177. México.

Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2007. Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México. p 59. México.

Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2008. Plan verde de la Ciudad de México: Acciones de alto impacto para una ciudad con futuro. p 31. México. <<http://planverde.org/articulos/1/media/guiaverde.pdf>> (29 Junio de 2009).

Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2008. Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012: Acciones Locales con Impactos Globales. P 171. México.

Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2009. Dirección General de Planeación y Coordinación de Políticas. <<http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/>> (7 julio de 2009).

Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2002. Norma Ambiental del Distrito Federal (NADF-002-RNAT-2002). Gaceta del Distrito Federal. 18 de Diciembre del

2003. <<http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/nadf-002-rnat-2002.pdf>> (13 de julio de 2009)

Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal. 2006. Norma Ambiental del Distrito Federal (NADF-001-RNAT-2006). Gaceta del Distrito Federal. 8 de Diciembre del 2006. <<http://www.arboricultura.org.mx/pdfs/podas.pdf>> (7 de julio de 2009).

Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales. 2008. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales. México.

SEMARNAT, CONAFOR, INIFAP, INE, INEGI. 2004. Documento Estratégico Rector del Inventario Nacional Forestal y de Suelos. p 29. México.

<http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/secciones/inventarionacional/documentos/DocumentoEstrategicoRector.pdf> (6 de julio de 2009).

Sistema Integrado de Información sobre Investigación Científica y Tecnológica (SIICYT). 2005. Programa de Ciencia y Tecnología 1995-2000. Capítulo VI. México.

<http://www.siicyt.gob.mx/siicyt/docs/Programa_Nacional_de_C_y_T_1970-2006/documentos/ProgramadeCienciayTecnologia19952000/CAPITULO6.pdf> (13 de julio de 2009)

Vargas, F. 1997. Parques Nacionales de México. Volumen II: Zonas Norte y Sur. INE. p 758. México.

CAPÍTULO VII

Recurso Hídrico, Aire y Agua, Sector Planeación y Servicios Públicos

Evaluación de los impactos de los residuos sólidos bajo cambio climático en la Ciudad de México

Coordinador del proyecto
Andrés Barreda Marín¹

Participantes
Alejandra Straffon Díaz, Juanita Ochoa Chi, Magdalena Ferniza Pacheco, Leticia Osorio,
Katia Meave Ferniza

RESUMEN

El manejo de la basura en el Valle de México, se percibe inadecuado y sin un control por lo que este proyecto pretende dar una contribución para ampliar y mejorar el conocimiento disponible sobre el impacto del cambio climático en los residuos sólidos. Para ello, se debe evaluar e identificar la relación que existe entre el cambio climático y los residuos sólidos, calculando las emisiones de gases de efecto invernadero que de ahí provienen y construyendo herramientas que permitan determinar las características principales y su efecto futuro en la ciudad de México. Con lo anterior, se podrá proyectar el tratamiento apropiado de los residuos sólidos que mitiguen los efectos combinados del cambio climático y la generación de gases de efecto invernadero. El proyecto identificó la ubicación de los sitios donde se depositan finalmente los residuos sólidos en la ZMCM (controlados, no controlados, clandestinos, entre otros), detectando la vulnerabilidad social e hidráulica de la disposición actual de estos residuos y la necesidad de actualizar una normatividad adecuada, desarrollando metodologías para la evaluación de la generación de los gases.

INTRODUCCIÓN

La medición del impacto y las acciones tendientes a la mitigación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) forma parte de los compromisos internacionales suscritos por México frente a los grandes retos del cambio climático a nivel mundial.

En el año de 1972 se realizan las primeras mediciones de la calidad del aire en el Distrito Federal enfocadas a la medición de los gases producto de la quema de combustibles fósiles, sin

¹ Facultad de Economía, UNAM; Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM; Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal

embargo es hasta el año 1990 que se publica el primer inventario nacional de GEI y se pone atención a los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) como fuente de contribución; los estudios realizados bajo la metodología propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) son publicados por primera vez en el Inventario Nacional de GEI del año 2002.

Este trabajo reconoce los aportes al mismo tiempo en que intenta establecer algunas limitaciones para el desarrollo de la metodología propuesta por el IPCC para el cálculo de los GEI. Igualmente se ofrece un análisis prospectivo de diferentes escenarios posibles de la relación entre los Residuos Sólidos Urbanos y la generación de GEI.

La evaluación se desarrolló entre los meses de agosto de 2008 y julio de 2009, apoyados en abundante material bibliográfico y hemerográfico, leyes, programas, informes, documentos e inventarios, en entrevistas a funcionarios responsables de las administraciones públicas tanto nacional como del Distrito Federal y del Estado de México, y en la realización de ocho talleres regionales con pobladores de diferentes municipios y delegaciones.

Los datos de la generación de Residuos Sólidos Urbanos disponibles datan del año de 1985 con algunas referencias hacia el año 1975, así como de 1992 a 2006. Datos con periodicidad anual sobre la generación de RSU, para el caso de Distrito Federal y el Estado de México, sólo se les puede ubicar entre el año 1998 y 2007.

A partir de la información que se obtuvo, se pudo determinar serias limitaciones en la estadística, lo que llevó a trabajar los escenarios con un alto grado de incertidumbre, sin embargo, se elaboraron una serie de recomendaciones que pueden servir para mejorar la cantidad y la calidad de la información tanto de RSU como de GEI.

El principal esfuerzo de esta investigación documental y de campo consistió en comenzar a elaborar una novedosa base de información cartográfica que permita describir todos los sitios legales, semilegales, ilegales y clandestinos, superficiales y enterrados, con infraestructuras apropiadas o sin ellas, pero todos finalmente sitios de disposición de Residuos Sólidos Urbanos y por lo tanto de generación de GEI que se localizan en el Distrito Federal.

OBJETIVOS

En este estudio los principales objetivos consisten en: identificar la relación entre Cambio Climático (CC) y los residuos sólidos (RS), calcular las emisiones de GEI provenientes de los RS, construir herramientas para determinar las características principales de los RS y su efecto futuro en las emisiones de GEI en la ZMCM y proyectar el tratamiento apropiado de los RS para mitigar los efectos combinados del CC y la generación de GEI.

METODOLOGÍA

Los objetivos propuestos hacen necesario el desarrollo de diferentes actividades y aspectos metodológicos que a continuación se resumen.

- Recopilación bibliográfica y hemerográfica sobre CC, RSU y la interacción existente entre estos dos aspectos, revisión del material, con base en el cual se elaboraron diversos diagnósticos.
- Construcción de mapas sobre disposición final de los RSU, considerando los diversos tipos de sitios: estaciones de transferencia, rellenos sanitarios, sitios controlados y no-controlados, tanto para el Distrito Federal como el Estado de México.
- Elaboración de mapas para delimitar las zonas urbanas y rurales, junto con los sitios de disposición final por tipo.
- Se analizó, con base en información oficial, el desempeño histórico de la generación de RSU (regional, per-cápita, composición), tanto para el Distrito Federal como el Estado de México.
- Se estimaron los GEI históricos asociados con los RSU, con base en datos públicos de los inventarios estatales y los no públicos derivados de reuniones con funcionarios de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México.
- Se identificaron los elementos causantes de la vulnerabilidad de la ZMCM vinculados a la generación y disposición de RSU.
- Se calcularon, con base en la metodología del IPCC para metano CH₄ (Descomposición de Primer Orden), las emisiones de GEI al año 2050, tanto por tipo de clima, como por tipo de tratamiento de los RSU.
- Se enumeran las deficiencias en el manejo de los RSU en la ZMVM, desde la falta de información para un estudio más preciso, hasta las carencias a lo largo del ciclo: desde la generación hasta la disposición final.
- Se hace referencia a las diversas opciones para un manejo integral y coordinado de los RSU en la ZMCM.

RESULTADOS OBTENIDOS

Según los datos oficiales del gobierno del Estado de México, los residuos sólidos urbanos se depositan de acuerdo a lo presentado en la Figura 1, de la siguiente forma: un 45 % en los rellenos sanitarios, 26 % en sitios controlados, 10 % en sitios no controlados y 19 % no ingresan a ningún sitio de disposición final.

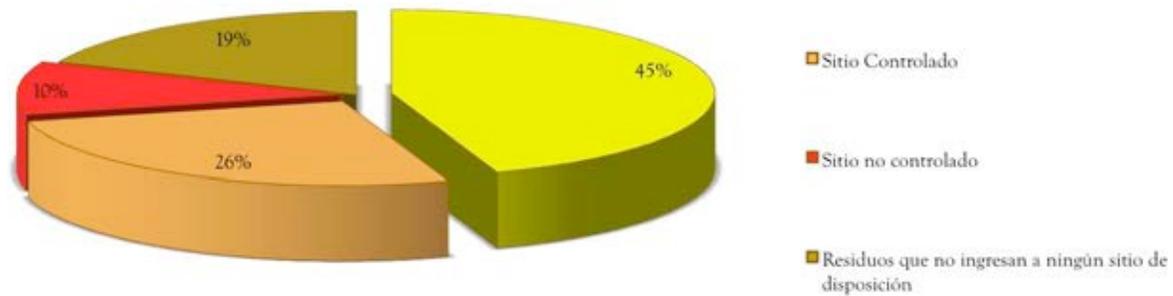


FIGURA 1. Disposición final de residuos sólidos urbanos en el Estado de México

Como se puede observar en la figura anterior, el 26 por ciento de la basura del Estado de México se va a sitios controlados, que son en realidad tiraderos sin ninguna infraestructura adecuada para la disposición final de los residuos sólidos urbanos, pues no cuentan con geomembrana, ni con alberca de lixiviados; a estos sitios se les llama controlados porque están cercados y con vigilancia en la puerta, impidiendo que los ciudadanos arrojen de manera directa y libre en ellos, pero no tienen ningún mecanismo ni dispositivo técnico para controlar el impacto ambiental provocado por los residuos.

En la ZMCM hay 22 sitios no controlados (de un total de 53 existentes en la entidad) y otros 3 en la zona sur oriente del Estado de México, en este tipo de basureros se depositan desechos de todo clase sin ninguna restricción, lo que expresa una falta del control sobre el manejo de la basura.

Como resultado del análisis de los diferentes mapas elaborados en esta investigación, se encuentra que el Distrito Federal concentra sus 13 estaciones de transferencia y un sitio de disposición final, y por ello parece tener un principio mínimo de racionalidad en la regulación de sus RSU; lo anterior contrasta con los 11 sitios controlados, 22 sitios no controlados y 6 basureros municipales del Estado de México en los municipios conurbados de la ZMCM, que en total suman 39 sitios de disposición final que operan prácticamente como tiraderos a cielo abierto, dado el descontrol que existe en ellos para el manejo de los residuos, que se traduce en un fuerte impacto ambiental, lo que refleja que el Estado de México tiene un manejo inadecuado de la basura.

Las limitaciones en el manejo y disposición final de los residuos que han sido determinadas en el desarrollo del estudio, las cuales van desde la adecuada caracterización de los residuos sólidos urbanos y su valorización bajo criterios de riesgo, en el registro y control de los residuos que se depositan en los sitios de disposición final, en la integración de los inventarios y en la supeditación de su manejo a criterios de rentabilidad económica o política,

ignorando o reduciendo prácticamente en su totalidad los criterios ambientales que garanticen la protección del medio ambiente y la salud de la población, traduciéndose todo ello en el aumento en la vulnerabilidad de la ZMCM.

El análisis cartográfico pone en evidencia que los cálculos generales sobre las fuentes de RSU generadoras de emisiones GEI en realidad resultan muy poco verídicos, porque los datos y registros están muy desactualizados e incompletos, frente a un escenario de urbanización incontrolada que avanza con velocidad sorprendente, justo en las zonas donde se observa la mayor presencia de tiraderos de basura a cielo abierto, estén o no controlados por las autoridades de la ZMCM.

Por otro lado, saltan a la vista otra serie de problemas asociados a la disposición final de RSU y a la gran cantidad de emisiones de GEI, los cuales se enuncian a continuación:

1. Existen numerosos sitios de disposición clandestina de RSU que no han sido inventariados ni monitoreados por ninguna autoridad ni institución (salud, universidades, servicios públicos, entre otros).
2. Los principales canales de desagüe de la ZMCM, ubicados en su mayor parte en el Estado de México, como resultado de las aguas de excreta y de la descomposición de los RSU que se depositan en ellos, se han convertido también en una fuente muy importante de GEI; estos “basureros lineales” no están considerados en ninguno de los estudios sobre GEI de la Ciudad de México asociados a basura o a otras fuentes, como ejemplo y para efectos de ilustrar este importante aspecto y relación, se presenta la Figura 2.

Igualmente, la Figura 3 ilustra la ubicación de los sitios de depósitos de residuos y las fuentes de agua, las cuales pueden ser contaminadas por la descomposición de los mismos y la producción de lixiviados.

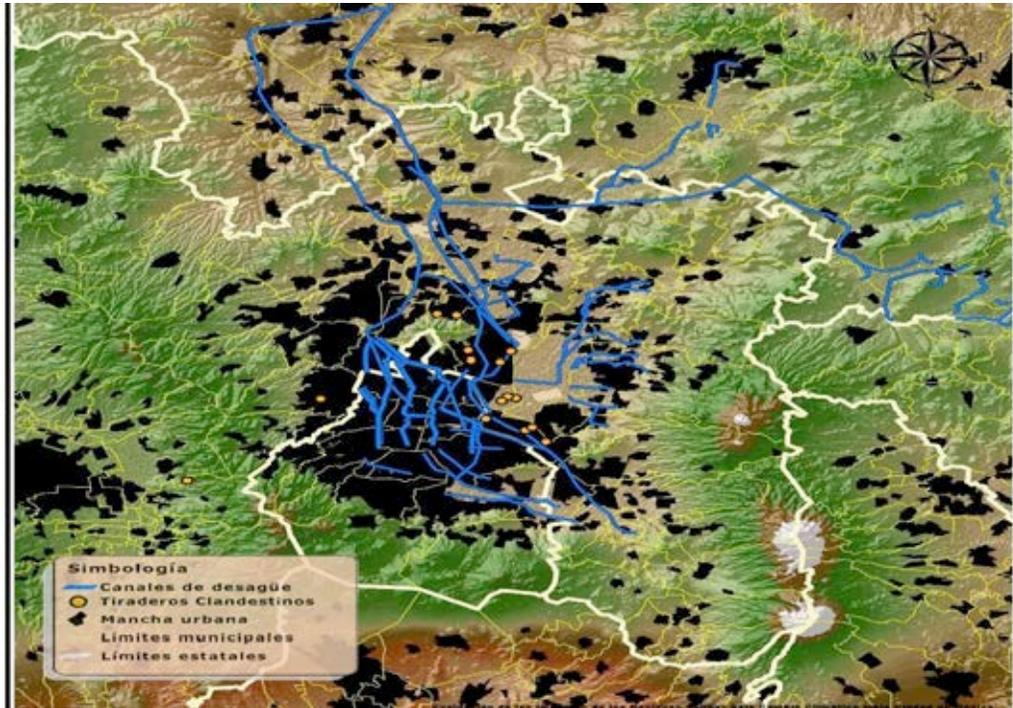


FIGURA 2. Tiraderos clandestinos y canales de desagüe

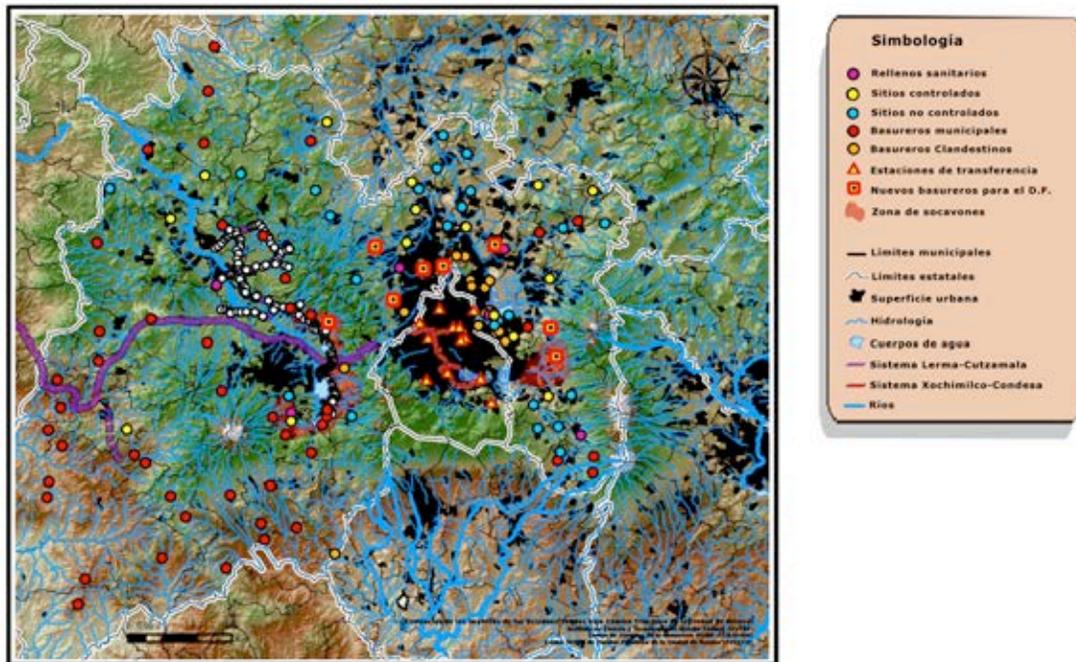


FIGURA 3. Sitios de disposición final de los RSU e hidrología de la ZMVM

3. Existen un conjunto de basureros lineales conformados por la gran cantidad de basura que se deposita en los márgenes de todo tipo de caminos, principalmente en las regiones urbanas.
4. También parece que se están depositando basuras en minas subterráneas de arena, socavones abiertos en las sierras que rodean a la Ciudad de México y la ciudad de Toluca, en las nuevas grietas que el hundimiento de la ciudad está generando en la periferia del acuitardo.
5. Otro problema a considerar es que los principales basureros existentes y proyectados se están ubicando en las principales zonas de desarrollo urbano e industrial, así como en las principales Islas de Calor de la ZMCM.

Con el propósito de incluir los efectos del cambio climático en el análisis de la producción de GEI provocados por los residuos sólidos, se tuvo en cuenta las salidas de los modelos de circulación general ECHAM5/MPI, UKHADGEM1 y GFDLCM 2.0 sugeridos por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), y los escenarios de emisiones A1B, A2, B1 y B2 para un horizonte de tiempo hasta el año 2050.

El aumento de temperatura proyectado por todos los escenarios debido al cambio climático global, junto con el efecto de “isla de calor” tan importante en la ZMCM, que es un efecto local no considerado en los modelos de circulación general, tiene como resultado que la ZMCM pasará de ser una zona climática templada a una zona climática tropical; la anterior situación se traducirá en tasas de descomposición de RS mayores, y por consiguiente una mayor velocidad en la cantidad de CH₄ emitido a la atmósfera.

Con relación al anterior aspecto, se reconoce que 97.8 % del CH₄ generado es debido a los RSU, lo que equivale a 5.15 Mt de CO₂ equivalente, es decir, en este documento se reconoce que para el 2006 los RSU emitían 26 % más que lo estimado dos años antes por la Estrategia Local de Acción Climática del Distrito Federal.

Igualmente el trabajo considera que las emisiones de CH₄ emitido son sensibles a las diferentes prácticas de manejo de los RSU, por lo cual en la presente investigación se han considerado cuatro posibilidades de manejo, las hipótesis hechas para cada posibilidad se describen a continuación:

1. *Incineración gradual*: considera que en el año 2010 se incineran 10 % de los Residuos Sólidos Urbanos, aumentando gradualmente este porcentaje en 1.5 %, hasta llegar al año 2050 con 70 % de incineración en la ZMCM; los metales, el vidrio y el caucho se eliminan de la masa incinerada. La cantidad de RSU que son depositados es igual a la de la línea base.
2. *Recuperación gradual*: considera que en el año 2010 se recupera el 10 % de las emisiones de metano CH₄, ya sea que simplemente se queme para eliminar su alto potencial de calentamiento global al reducirlo a CO₂ ó que el calor generado en la reacción química sea utilizado; el

porcentaje de recuperación aumenta anualmente en 1.5 %, hasta llegar al año 2050 con 70 % del CH₄ recuperado. La cantidad de RSU que son depositados es igual a la de la línea base.

3. *Disminución en la generación*: considera que en el año 2010 disminuye la disposición final de RSU en 5 % (respecto al año anterior) sobre la proyección de aumento de la línea base, es decir, en lugar de aumentar la cantidad de RSU entre el año 2009 y 2010, esta cantidad se mantiene constante en el D.F y disminuye en un 2.4 % en los municipios conurbados; a partir de este año la disminución en generación aumenta cada año en 1 %, hasta llegar al 2050 con un 45 % de disminución en la cantidad de RSU depositados; la anterior posibilidad de gestión implícitamente implica una reducción en la generación de RSU o un aprovechamiento de las materias primas (reciclado) que comúnmente acaban siendo depositadas, por lo que la composición de los RSU depositados se modifica, predominando lo orgánico y disminuyendo los plásticos, que hipotéticamente sería reutilizados.

4. *Disminución en la generación y recuperación*: combina los supuestos de los numerales 2 y 3 anteriores.

La Figura 4 ilustra las emisiones de CO₂ equivalente proyectadas de acuerdo a las cuatro posibilidades de gestión anteriormente expuestas y la línea base.

Es importante aclarar que la línea base contempla que la composición y la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos se proyectan iguales a las actuales (2008), siendo el 100 % de éstos dispuestos en rellenos sanitarios en el Distrito Federal, y en los municipios conurbados del Estado de México el 45 % en rellenos sanitarios, 39 % en sitios controlados y 16 % en tiraderos a cielo abierto.

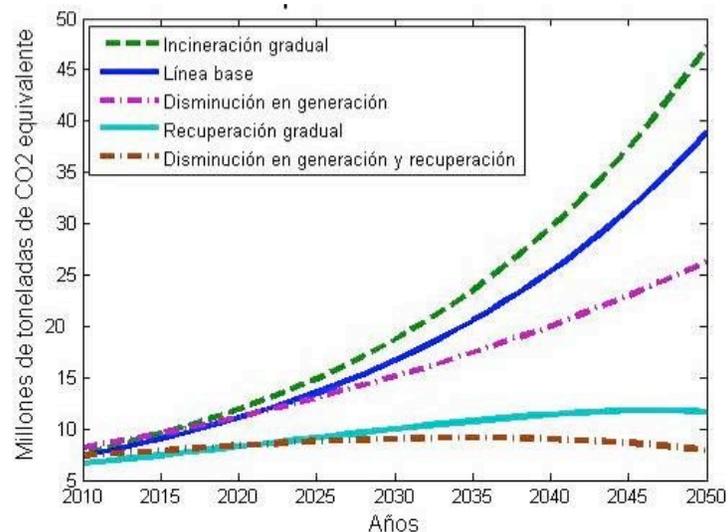


FIGURA 4. Escenarios de generación de CO₂ equivalente debidos a la disposición final de RSU en la ZMVM

De la figura anterior se infiere que la única posibilidad entre las propuestas, de emitir en el año 2050 la misma cantidad de GEI que en el año 2008, consiste en combinar las estrategias de gestión de RSU: disminución en la generación y recuperación del metano emitido; esta posibilidad es factible desde el punto de vista técnico, inclusive es menos ambiciosa que los programas que algunas ciudades del mundo, como Buenos Aires (Argentina), han implementado en reducción de RSU, en donde se plantea una reducción del 30 % para el año 2010 con relación a la cantidad total de residuos depositados en el año 2004. Desde el punto de vista de la recuperación del metano producido, la posibilidad de llevarla a cabo es también viable, inclusive considerando que el aprovechamiento del metano requiere de infraestructura en los sitios de disposición final, en este sentido el proyecto del Gobierno del Distrito Federal de captura del biogás producido en el Bordo Poniente IV Etapa, ha estimado reducir en 1.4 Mt de CO₂ equivalente las emisiones provenientes de los Residuos Sólidos Urbanos, lo que equivaldría a recuperar cerca de un 20 % las emisiones de GEI de toda la ZMCM.

CONCLUSIONES

La estadística en torno a los RSU presenta serias inconsistencias que limitan su utilización rigurosa para un cálculo verídico de los procesos de generación de GEI.

Los datos disponibles sobre la cuantificación de los RSU no hacen una distinción clara entre los datos correspondientes a generación y los relativos a la disposición, sobre todo en el caso del Estado de México, lo anterior dificulta el establecimiento de la verdadera proporción de RSU que queda depositada en sitios no identificados por las administraciones públicas locales, lo cual genera a su vez que el margen de error en el cálculo de las emisiones de GEI puede ser enorme.

Los primeros cálculos elaborados con datos oficiales indican que la generación de GEI debidos a la disposición final de RSU en la ZMCM fue para el año 2008 de 6.783 millones de toneladas de CO₂ equivalente; considerando los aumentos en temperatura que se proyectan para la ZMCM debidos al cambio climático global y el efecto de isla de calor; junto con que la tasa de generación de RSU y las prácticas de gestión se mantengan como las actuales, para el año 2050 se podrían estar emitiendo 42.420 millones de toneladas de CO₂ equivalente, es decir un 625 % más que en el año 2008.

Dentro de los escenarios de posible gestión proyectados en el futuro, las únicas prácticas que en el año 2050 podrían producir emisiones de GEI equivalentes a las del presente consisten en aquellas en las cuales se combina la disminución en la generación de RSU y la recuperación del metano proveniente de los sitios de disposición final.

Es necesario determinar localmente las tasas de descomposición de las diferentes clases de RSU. Asimismo, las modificaciones en la generación de GEI debidas a la combinación de éstos con residuos de otro tipo, como pueden ser las aguas de excreta en los canales de

prolongados desagües a cielo abierto, que sobre todo predominan en las áreas urbanas de la ZMCM ubicadas en el Estado de México.

Los estudios de RSU asociados al calentamiento global, se limitan al análisis de su impacto en los GEI cuando podrían tener en cuenta escenarios más complejos que involucraran diversos factores que convergen en el contexto del calentamiento global.

Tal es el caso del estudio del comportamiento de la contaminación por lixiviados en un escenario de sequía, de falta de agua por escasez de lluvia o por disminución en el suministro que obligue a la explotación aún mayor de los pozos de la ZMCM. Son necesarios los estudios de los fenómenos de contaminación biológica y química, y su relación con los problemas de infecciones en la población, mutación y reconversión de microorganismos, incremento de fauna nociva asociada sólo por mencionar algunos.

REFERENCIAS

Castillo Miriam: “El Gobierno del Distrito Federal proyecta construir tres centros de reciclaje” Disponible en <http://impreso.milenio.com/node/8577055>.

Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México, 2008. Disponible en http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/index.php?option=com_content&task=view&id=72&Itemid=107

COFEPRIS, Diagnóstico nacional de salud ambiental y ocupacional. Secretaría de Salud, Dirección General de Salud Ambiental, México, 2002. Disponible en <http://cofepris.salud.gob.mx/bv/libros/l31.pdf>

COMIA-GTZ, La basura en el limbo. Desempeño de gobiernos locales y participación privada en el manejo de residuos urbanos, México, 2003.

Comisión Ambiental Metropolitana, Bases conceptuales y de diagnóstico del programa para la prevención y manejo integral de residuos peligrosos. Zona Metropolitana del Valle de México, Gobierno del Estado de México, SEMARNAT, Gobierno del Distrito Federal, Comisión Ambiental Metropolitana, GTZ Agencia Alemana de Cooperación Técnica. México, 2002. Disponible en www.sma.df.gob.mx/.../bases_conceptuales_residuos_peligrosos.pdf

Comisión Metropolitana de Asentamientos Humanos, Programa de ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México, México, 1998.

CONAPO, De la población de México 2005-2050. Disponible en http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=234.

Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala, C. Gay. Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación. México, 2008. Disponible en http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74

Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1988. Disponible en <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pDistrito Federal/148.pdf>

Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. Ley General para la Prevención y gestión Integral de los Residuos, 2003. Disponible en <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf>

Coordinación General de la Comisión para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, México, 2009. Disponible en <http://www.asambleadf.gob.mx/cm/09/peds-14.pdf>

Cortinas de Nava, Cristina. Hacia un México sin basura: Bases e Implicaciones de las Legislaciones sobre Residuos. Cámara de Diputados. LVIII Legislatura, México, 2001.

Cortinas de Nava, Cristina, Riesgos Sanitarios y la Aplicación de los Tres Convenios (Basilea, Estocolmo y Róterdam). Disponible en http://www.sre.gob.mx/eventos/dgtg/prog_susquimicas/dracristinacortinas.ppt

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, Basura Cero. Disponible en http://www.buenosaires.gov.ar/areas/med_ambiente/basura_cero/?menu_id=21731

Gobierno del Distrito Federal y Gobierno del Estado de México. Primera declaratoria de ampliación del ámbito territorial de planeación y estudio de la Zona Metropolitana del Valle de México, Gaceta Oficial del Distrito Federal y Gaceta Oficial del estado de México, 23 de enero de 2006.

Gobierno del Distrito Federal y Gobierno del Estado de México. Primera declaratoria de ampliación del ámbito territorial de planeación y estudio de la Zona Metropolitana del Valle de México. 18 de agosto de 2008.

Gobierno del Distrito Federal, Ley Ambiental del Distrito Federal, 2000. Disponible en sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/ley_ambiental_distrito_federal.pdf

Gobierno del Distrito Federal, Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2003. Disponible en vinculando.org/leyes/comentarios_df_residuos_solidos.html.

Gobierno del Distrito Federal, Reglamento de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008. Disponible en <http://www.df.gob.mx>.

Gobierno del Estado de México. Código para la Biodiversidad del Estado de México, México, 2005. Disponible en: http://www.cddiputados.gob.mx/POLEMEX/leyes2006/pdf/54_.pdf

Gobierno del Estado de México. Reglamento del Libro Cuarto del Código para la Biodiversidad del Estado de México 2007. Disponible en <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/ESTADO%20DE%20MEXICO/Reglamentos/MEXREG270.pdf>

INE, Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, INE-SEMARNAT, México, 2006.

INEGI. XII Censo General de Población y Vivienda 2000 y del II Conteo de Población y Vivienda 2005. Disponible en www.inegi.gob.mx.

INE-SEMARNAT, Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, México, 2006. Disponible en: www.ine.gob.mx/publicaciones/download/495.pdf

IPCC 2006, Volumen 5, Capítulo 5: Incineración e incineración abierta de desechos.

IPCC, 2007 Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., and Miller H.L. (editores). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Capítulo 2: Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. USA, 2007.

IPCC, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (eds). Capítulo 5 Desechos. 2006.

IPCC, Volumen 5, Capítulo 3, Sección 3.7: Evaluación de la incertidumbre. 2006.

Jáuregui, Ernesto, La variabilidad climática en los registros instrumentales en México, INE. México. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/437/jauregui.html>

Kiss K. G. et al, Caracterización de lixiviados y biogás generados en sitios de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos en lugares seleccionados de la Zona Centro de México, Reporte Final, diciembre 2006. INE, Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados, Subdirección de Investigación sobre el Manejo Integral de los Residuos, México.

Mejía Ponce de León, Adolfo. Problemas de interpretación, aplicación y vacíos de la legislación ambiental municipal. Disponible en <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/9/amejia.html>.

Norma Oficial Mexicana NMX-AA-61-1985.

Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.

Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-010-SMA-RS-2008.

Norma Oficial Mexicana NMX-AA-022-1985.

Presidencia de la República. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2006. Disponible en:

http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR.pdf

Secretaría de Obras del Gobierno del Distrito federal. Disponible en <http://www.obras.df.gob.mx/transparencia/contratos/arrendamientos2007dgsu.htm>

SEDESOL, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, México, 2008. Disponible en

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/compendio2008/10.100.8.236_8080/ibi_apps/WFServletb83e.html

SEDUE, Informe sobre el estado del medio ambiente en México, México, 1986.

SEMARNAT, Agenda Gris. Prevención y control de la contaminación. Programa sectorial de medio ambiente y recursos naturales. México, 2008. Disponible en

http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/Documents/PAT_2009_agenda_gris.pdf

SEMARNAT, Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de estadísticas ambientales. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, México, 2005. Disponible en

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/pDistrito Federal/introduccion.pdf

SEMARNAT, Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, México, 2005. Disponible en

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/pDistrito Federal/introduccion.pdf

SEMARNAT, Política y estrategias para la prevención y gestión integral de los residuos en México, México, 2007. Disponible en

http://siscop.ine.gob.mx/novedades/politica_y_estrategias_gir.pdf

SEMARNAT, Programa nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2008-2012. Presentación preliminar del programa dada a conocer por la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental. Disponible en

http://www.ine.gob.mx/dgcnica/descargas/taller_3grs_pon_cchavez.pdf

SEMARNAT, Programa sectorial de medio ambiente y recursos naturales. México, 2008. Disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/programas/Pages/PSMARN.aspx>

SMA Distrito Federal, Estrategia Local de Acción Climática, México, 2006.

SMA Distrito Federal, Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Zona Metropolitana del Valle de México 2006.

SMA Distrito Federal, Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal 2006. México, 2006. Disponible en http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario_residuos_solidos.pdf

SMA Distrito Federal, Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal. 2007. México, 2008. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/index.htm>.

SMA Distrito Federal, Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012.

SMAGEM, Bases de Diagnóstico. Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Vulnerabilidad del Estado de México ante Cambio Climático Global. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, México, 2008. Disponible en: <http://www.edomex.gob.mx/ambiente/doc/pdf/dgpcca/2008bdiegei-vclimatico.pdf>

SMAGEM, Diagnóstico ambiental del Estado de México por regiones hidrográficas 2007, México, 2007. Disponible en: <http://www.edomex.gob.mx/ambiente/doc/pdf/2007-da-em-2007.pdf>

SMAGEM, Programa para la prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial del Estado de México. México, 2009. Publicado en la Gaceta Oficial del Gobierno del Estado de México el 17 de abril de 2009. Disponible en: <http://www.edomex.gob.mx/legistelfon/doc/pdf/gct/2009/abr173.pdf>

SMAGEM, Prontuario, México, 2009. Disponible en [http://www.edomex.gob.mx/ambiente/doc/pDistrito Federal/PRONTUARIO.pdf](http://www.edomex.gob.mx/ambiente/doc/pDistrito%20Federal/PRONTUARIO.pdf)

CAPÍTULO VIII

Recurso Aire, Sector Transporte público

Escenarios de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de pasajeros en la Zona Metropolitana del Valle de México

Claudia Sheinbaum Pardo¹, Carmina García Robles², Juan Carlos Solís Ávila², Carlos Chávez³

RESUMEN

El objetivo original del proyecto fue analizar el crecimiento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) de 2000 a 2006 en el sector transporte y desarrollar escenarios de generación para el año 2020; ello, a fin de comparar el impacto de medidas de mitigación, en emisiones y en costos, respecto a un escenario base. Durante el desarrollo del proyecto se encontraron problemas para estimar el cambio histórico, por lo que se definió y construyó el año base: 2006, a partir del cual se desarrolló igualmente un escenario base y diversos de mitigación para el año 2020. Por esta razón, el análisis se circunscribió al transporte de pasajeros. La relevancia de este proyecto para la Ciudad de México radica en que sus autoridades pueden contar hoy, con la modelación de escenarios base de emisiones de GEI asociados al consumo de la energía del transporte de pasajeros. Este sector es la principal fuente de estos gases, lo que proporciona medios para valorar, frente al escenario base, los estimados de mitigación de GEI, tanto en emisiones, como en costos. Esta modelación admite establecer bases para la planeación, que deriven en programas, medidas y acciones de mitigación de GEI. En esta consideración, el trabajo presenta escenarios de consumo de energía y de emisiones de GEI del transporte de pasajeros en la ZMVM, para el año 2020. Los escenarios se dividen en nueve: uno base o tendencial y ocho escenarios de mitigación; éstos son: (i) hoy no circula sabatino; (ii) aumento en la eficiencia vehicular de los automóviles nuevos; (iii) cambio modal de transporte privado y microbuses hacia Metrobús; (iv) aumento en la velocidad de circulación del automóvil privado, lo cual puede estar asociado a nuevas vialidades u otros mecanismos de control de la demanda o infraestructura; (v) transporte escolar en sustitución de transporte privado; (vi) crecimiento cero del número de taxis, combis y microbuses; (vii) cambio en la estructura de las ventas, favoreciendo el automóvil subcompacto a partir de 2012; y (viii) incorporación de vehículos híbridos en las ventas a partir de 2012. La metodología está sustentada en la definida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 1996a,b,c) y en el modelo MEEM para transporte, desarrollado en el Instituto de Ingeniería (Sheinbaum et al., 2000). De

¹ Instituto de Ingeniería, UNAM

² Estudiantes de posgrado del Instituto de Ingeniería, UNAM

³ Universidad Autónoma de la Ciudad de México

acuerdo con el escenario base o tendencial, el parque vehicular para el transporte de pasajeros en el año 2020 sería de casi tres veces el que circuló en el año 2006 y el auto privado seguirá representando cerca del 88% del total de la flota. El consumo de energía representará 2.16 veces el de 2006 y las emisiones de GEI, 2.19 veces, alcanzando el valor de 45.6 Tg de CO₂ equivalente. Con todas las medidas de mitigación, la disminución de emisiones de GEI llegaría al 33.4% respecto al escenario base. El escenario de menor impacto en la mitigación es el *hoy no circula sabatino*, que representa un decremento en las emisiones del año 2020 de tan sólo el 0.9%. En orden de importancia, de menor a mayor, le sigue el escenario de incorporación de vehículos híbridos (2.2%), seguido por: el aumento en la eficiencia de los autos nuevos (2.4%), el transporte escolar (2.6%), el incremento en la eficiencia del parque asociado a una mayor la velocidad de circulación de todos los autos privados (4.2%), el mantener la flota de taxis, combis y microbuses constante a su valor de 2010 (6.7%), el aumento en las líneas de Metrobús (8.1%) y finalmente, el escenario de mayor impacto es el que implica castigar a las camionetas y favorecer la venta de autos subcompactos (8.4%). Asimismo, el estudio presenta una estimación inicial de los costos sociales, basada en un análisis comparativo de cada escenario respecto al tendencial, brindando como resultado los costos por tonelada de CO₂ mitigada. Obviamente, aquellos escenarios que no representan inversión -pues sólo dependen de la aplicación de políticas públicas como el *hoy no circula sabatino*- resultan en valores negativos; es decir es más económico para la ZMVM el escenario de mitigación que el tendencial. En el caso del aumento en la velocidad y de la eficiencia de los autos nuevos, no se tiene suficiente información para desarrollar el cálculo. Por lo que se refiere a la relación con instancias del Gobierno del D.F., se hace necesario mantener una mayor conexión con el área de la Secretaría del Medio Ambiente que elabora el inventario de emisión de GEI, debido a que existen diferencias metodológicas importantes. Y por lo que respecta a una segunda fase y dado que hoy contamos con información histórica, en particular de la eficiencia vehicular, se plantea analizar las tendencias de las emisiones de GEI del transporte de pasajeros de 2000 a 2008, al igual que evaluar hacia el 2020, la vinculación de las emisiones de contaminantes locales y de GEI. Asimismo, es de nuestro interés desarrollar el estudio del escenario base y de mitigación para el transporte de carga.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las emisiones de GEI provocadas por el consumo de energía en el transporte representaron el 23 % en el año 2004 y se ubican en el segundo lugar en importancia, después de la generación eléctrica, de las anteriores el auto particular representa el mayor porcentaje de consumo.

México está entre los 20 países con mayores emisiones de GEI en el mundo. Aún cuando los acuerdos internacionales en la materia no lo obligan a reducir emisiones, es indispensable que el país visualice los escenarios de reducción en la perspectiva de su propio

desarrollo y de la contribución que pueda aportar a la estabilización de las emisiones en el planeta.

En México, el transporte es el sector que más contribuye a las emisiones de GEI y es el de mayor crecimiento; por lo anterior, analizar las tendencias de la ZMCM es indispensable tanto para disminuir el consumo de los derivados del petróleo, como para mitigar las emisiones de GEI.

Este trabajo presenta escenarios de consumo de energía y emisiones GEI del transporte de pasajeros en la ZMCM, para el año 2020. Los escenarios se dividen en seis, el base o tendencial y cinco escenarios de mitigación, a) hoy no circula sabatino, b) aumento en la eficiencia vehicular de los automóviles nuevos; c) cambio modal de transporte privado y microbuses hacia Metrobús, d) aumento en la velocidad de circulación del automóvil privado, lo cual puede estar asociado a nuevas vialidades, u otras mecanismos de control de la demanda o infraestructura, e) transporte escolar en sustitución de transporte privado y f) crecimiento cero del número de taxis, combis y microbuses.

De acuerdo con el escenario base o tendencial, el parque vehicular para transporte de pasajeros en el año 2020 sería de casi tres veces lo que circuló en el año 2006, y el auto privado seguirá representando cerca del 88 % del total de la flota. El consumo de energía representará 2.16 veces el de 2006 y las emisiones de GEI, 2.19 veces, alcanzando el valor de 45.6 Tg de CO₂ equivalente.

Con las medidas propuestas la disminución de emisiones de GEI llegaría al 20.9 % respecto al escenario base; en orden de importancia, el hoy no circula sabatino representa una disminución del 0.9 %, la incorporación de transporte escolar, 1.3 %, el aumento en la eficiencia de los autos nuevos, 2.0 %, aumento en la eficiencia debido al incremento en la velocidad, 2.7 %, la incorporación de BRT, 6.4 % y la estabilización de la flota vehicular de taxis, microbuses y combis, 7.6 %.

Asimismo se realiza una estimación inicial de costos basado en un análisis comparativo de cada escenario respecto al tendencial y que brinda como resultado, los costos por tonelada de CO₂ mitigada. Obviamente aquellos escenarios que no representan inversión pues sólo dependen de la aplicación de políticas públicas como el hoy no circula sabatino resultan en valores negativos, es decir, es más económico para la ZMCM el escenario de mitigación que el tendencial.

OBJETIVOS

El objetivo general del presente estudio busca generar escenarios de consumo de energía y emisiones de GEI del transporte de pasajeros en la ZMCM, para el año 2020; mediante la propuesta o planteamiento de seis alternativas o escenarios, el base o tendencial y cinco escenarios de mitigación.

METODOLOGÍA

La metodología seguida en éste estudio está sustentada en la del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPCC (1996) y el Modelo de Energía y Emisiones para México (MEEM) para transporte desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Sheinbaum *et al.*, 2000).

Después de definir y elaborar el escenario base, se analizaron los diferentes escenarios de mitigación los cuales como se mencionó anteriormente se refieren a las siguientes opciones: hoy no circula sabatino, aumento en la eficiencia vehicular de los automóviles nuevos, cambio modal de transporte privado y microbuses hacia Metrobús, aumento en la velocidad de circulación del automóvil privado, transporte escolar en sustitución de transporte privado y crecimiento cero del número de taxis, combis y microbuses.

Para estimar el consumo de energía por modo de transporte y por combustible se utiliza la siguiente ecuación:

$$E = \sum_j \sum_i \sum_t V_{ijt} * d_{ijt} * e_{fijt} * PC_j \quad (1)$$

Donde:

E = Consumo de combustibles (suma del consumo de diesel, gas natural, GLP, gasolina) en joules.

V_{ijt} = Número de vehículo del tipo i del año-modelo t, que utilizan el combustible j

d_{ijt} = Distancia anual recorrida del vehículo tipo i que utiliza el combustible j del año-modelo t;

e_{fijt} = Eficiencia del vehículo tipo i que utiliza el combustible j del año-modelo t (lt/km)

PC_j = Poder calorífico del combustible j

Dado que en este trabajo se analiza el transporte de pasajeros, los modos de transporte que se consideran son: vehículo privado sub-compacto, vehículo privado-compacto, vehículo privado de lujo, vehículo privado deportivo, camioneta (camiones ligeros de uso múltiple tipo a,b,c,d,e)¹, taxi, microbús o minibús y autobús

Para estimar las emisiones de GEI para el año base por modo de transporte para un año determinado, se calcula el consumo de energía por modo y por combustible y se utilizan los factores de emisión del IPCC. En este caso, se usan los factores de emisión de la metodología 1996, dado que es hasta ahora, la aprobada por la Convención Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas.

¹ Este tipo de vehículos –clasificados así por la industria automotriz mexicana– se refiere a las camionetas de diferente tipo (sin incluir *pick-up*). La gran mayoría de estos vehículos se utilizan para transporte de pasajeros.

De esta forma, las emisiones de CO₂ se calcularon conforme al IPCC (1996) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \sum_j (\text{Combustible consumido } j) * (\text{Factor de emisión } j) * (\text{Fracción oxidada } j) * (44/12) \quad (2)$$

Donde j es el tipo de combustible.

Los factores de oxidación se presentan en la Tabla 1; por su parte, los factores de emisión, se presentan en la Tabla 2.

TABLA 1. Fracción de carbono oxidado

Carbón	0.98
Petróleo y productos	0.99
Gas	0.995
Peat para generación eléctrica	0.99

Fuente: IPCC, Manual de referencia V III. 1996c:1-29

TABLA 2. Factores de emisión de CO₂, incluyendo fracción oxidable (tCO₂/TJ)

GLP	62.436
Gasolinas	68.607
Diesel	73.326
Gas natural	55.820

Fuente: IPCC, Manual de referencia V III. 1996c

Las emisiones de CH₄ y N₂O, se calcularon de acuerdo a una combinación de los factores de emisión sugeridos por el IPCC utilizando el método Tier 2, y a diferencia del CO₂, en donde el factor de emisión se establece en g/J, el factor de emisión para los otros gases se estima en g/km.

Las emisiones de CO₂ están determinadas por el contenido de carbono en el combustible debido a que prácticamente todo el combustible que se quema, con excepción del que no se oxida (factor de oxidación), se convierte en CO₂; por ello, el IPCC recomienda utilizar el factor de emisión en gramos de CO₂ por energía (joule). Sin embargo, para el CH₄ y el N₂O, las emisiones dependen de la tecnología de control y de los kilómetros recorridos, de forma similar a los contaminantes locales o criterio, como el CO, COV o NO_x, por ello, en este caso se utilizan factores de emisión en g/km; la ecuación para estimar las emisiones de CH₄ y N₂O es entonces la siguiente:

$$\text{Emisiones de gas}_i = \square \text{ Vijt} * \text{dijt} * (\text{Factor de emisión}_k \text{ en g/km}) \quad (3)$$

Donde k es el GEI diferente al CO₂. Los factores de emisión para el CH₄ y el N₂O se presentan en las Tablas 3 y 4 para automóviles a gasolina y de otros combustibles, respectivamente. Se decidió utilizar los factores de emisión del IPCC (1996) que corresponden a vehículos de Estados Unidos; en este caso, las emisiones dependen de la tecnología de control.

Como puede observarse, el factor de emisión del metano disminuye a medida que el automóvil tiene un mejor convertidor catalítico; sin embargo, las emisiones de óxido nitroso son mayores mientras mejor es la tecnología de control, esto pone énfasis en el hecho de que la tecnología de control de las emisiones de contaminantes locales, no necesariamente tiene impacto positivo en las emisiones de GEI, este es el caso particular del N₂O donde las emisiones son mayores, y del propio CO₂, en donde el convertidor catalítico no representa ningún impacto.

Las emisiones equivalentes de CO₂ se calculan de acuerdo a la fuerza potencial de calentamiento global del CH₄ y del N₂O determinada en la metodología del IPCC (1996), como:

$$\text{Emisiones de CO}_2\text{eq.} = \text{emisiones de CO}_2 + \text{emisiones de CH}_4 * 21 + \text{emisiones de N}_2\text{O} * 310 \quad (4)$$

TABLA 3. Factores de emisión de CH₄ y N₂O para vehículos de gasolina

	Año de incorporación en México	CH ₄	N ₂ O
		g/km	g/km
Auto privado, taxi y combi (1)			
Convertidor catalítico de tres vías	1993 en adelante	0.030	0.170
Convertidores por oxidación	1991-1992	0.070	0.075
Sin control	anteriores a 1991	0.135	0.020
Microbús (2)			
Convertidor catalítico de tres vías	1993 en adelante	0.035	0.236
Convertidores por oxidación	1991-1992	0.090	0.097
Sin control	anteriores a 1991	0.135	0.024
Autobús (3)			
Convertidor catalítico de tres vías	1993 en adelante	0.075	0.606
Sin control	anteriores a 1993	0.270	0.054
Motocicleta (4)			
Con control	1993 en adelante	0.13	0.002

Fuente: IPCC (1996). (1) Tabla 1.27 US Gasoline passenger cars; (2) Tabla 1.28 US light duty gasoline trucks; (3) Tabla 1.29 US Heavy Duty Gasoline Trucks; (4) Tabla 1.33. US Motorcycles.

TABLA 4. Factores de emisión de CH₄ y N₂O para vehículos de combustibles distintos a gasolina

	Año de incorporación en México	CH ₄	N ₂ O
		g/km	g/km
Auto privado, taxi y combi a diesel (1)			
Control avanzado	1998 en adelante	0.010	0.007
Control moderado	1994-1997	0.010	0.010
Sin control	anteriores a 1994	0.010	0.014
Auto privado, taxi y combi a GLP (4)			
Control avanzado	1993 en adelante	0.030	NAV
Sin control	anteriores a 1993	0.180	NAV
Auto privado, taxi y combi a GNC (5)			
Control avanzado	1993 en adelante	0.700	NAV
Sin control	anteriores a 1993	3.500	NAV
Microbús a diesel (2)			
Control avanzado	1998 en adelante	0.010	0.024
Sin control	1994-1997	0.01	0.063
Sin control	anteriores a 1994	0.01	0.031
Microbús a GLP (4)			
Control avanzado	1993 en adelante	0.030	NAV
Sin control	anteriores a 1991	0.180	NAV
Microbús a GNC (5)			
Control avanzado	1993 en adelante	0.700	NAV
Sin control	anteriores a 1991	3.500	NAV
Autobús a diesel (3)			
Control avanzado	1998 en adelante	0.040	0.025
Control moderado	1994-1997	0.050	0.025
Sin control	anteriores a 1994	0.060	0.031

Fuente: IPCC (1996; 2006). (1) Tabla 1.30 US diesel passenger car; (2) Tabla 1.31 US light duty diesel truck; (3) 1.32 US heavy duty diesel vehicles; (4) Tabla 1.43 passenger cars. Para N₂O se toma de IPCC (2006); Tabla 3.3; (5) Tabla 1.44 passenger cars, Para N₂O se toma de IPCC (2006)

RESULTADOS OBTENIDOS

De acuerdo a los análisis realizados se pudo determinar que el consumo de combustibles en la ZMCM para transporte de pasajeros incluyendo motocicletas alcanzó en 2006 el valor de 268.55 PJ; lo cual significó el 15.04 % del consumo de combustibles del autotransporte en el país. La Tabla 5 muestra el consumo por combustibles de la ZMCM y a nivel nacional; por su parte, la tabla 6 presenta el consumo de gasolina por modo de transporte y edad, en ella claramente se observa como el auto particular representa el mayor consumo y cerca de la mitad de éste es de los autos de 2001 a 2006.

TABLA 5. Consumo de combustible para transporte de pasajeros en la ZMVM, 2006 (PJ)

	ZMVM (pasajeros)	Nacional (total autotransporte)	
Gasolina	218.02	1277.28	17.07%
Diesel	32.27	469.15	6.88%
GLP	17.72	38.58	45.93%
GNC	0.55	0.711	76.75%
Total	268.55	1785.72	15.04%

Fuente: ZMVM: Elaboración propia con base en datos de SMA (2008); Nacional (SENER, 2007)

TABLA 6. Estructura del consumo de combustibles por modo de transporte en la ZMVM (2006)

	Particular	Taxi	Combis	Microbuses	Autobuses*	Motocicletas	Total (PJ)
Gasolina	48.58%	12.50%	5.92%	7.32%	0.80%	6.07%	218.02
Diesel	0.01%	0.01%	0.01%	0.05%	11.92%		32.27
GLP	0.04%	0.00%	0.22%	6.30%	0.03%		17.72
GNC	0.00%			0.20%			0.55

Fuente: ZMVM: elaboración propia con base en datos de SMA (2008), *Incluye concesionados, escolares, turismo, interestatal y otros.

Una vez realizadas todas las estimaciones de acuerdo a la metodología presentada, se pudo determinar que para el escenario base, el consumo de energía en el año 2020 será de 579.231 PJ, 116 % más que en el año 2006.

Por su parte, las emisiones de CO₂ equivalente para el escenario base en el año 2020 alcanzarán 45.574 Tg de CO₂ equivalente, 119% más que las emitidas en el año 2006; el incremento es ligeramente mayor que el del consumo de energía, producto del incremento en las emisiones de N₂O, el cual es de 135 %.

Con todas las medidas de mitigación consideradas, la disminución de emisiones de GEI llegaría al 20.9 % respecto al escenario base. En orden de importancia, el hoy no circula sabatino representa una disminución del 0.9 %, la incorporación de transporte escolar, 1.3 %, el aumento en la eficiencia de los autos nuevos, 2.0 %, aumento en la eficiencia debido al incremento en la velocidad, 2.7 %, la incorporación de BRT, 6.4 % y la estabilización de la flota vehicular de taxis, microbuses y combis, 7.6 % (tabla 7).

TABLA 7. Escenarios base y de mitigación para el año 2020, ZMCM, Tg de CO₂ equivalente

	2006	BASE	Hoy no circula sabatino	Transporte escolar	Eficiencia en autos nuevos	Eficiencia-velocidad	BRT	Taxis, etc. constante
CO ₂								
Auto privado	8.96	21.21	20.90	18.06	20.46	19.54	19.54	21.63
Taxi	2.31	4.60	4.60	4.60	4.46	4.60	4.60	2.20
Combi y microbús	3.58	4.52	4.52	4.52	4.52	4.52	2.92	3.64
Autobús	2.50	5.40	5.40	8.58	5.40	6.18	6.18	5.40
Motocicleta	1.12	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
Total	18.46	40.05	39.74	40.06	39.16	39.16	37.55	37.19
CH ₄								
Auto privado	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Taxi	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Combi y microbús	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Autobús	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Motocicleta	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Total	0.07	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12
N ₂ O								
Auto privado	1.58	3.93	3.87	3.35	3.94	3.62	3.62	4.01
Taxi	0.55	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	0.54
Combi y microbús	0.14	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.24	0.24
Autobús	0.03	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05
Motocicleta	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Total	2.30	5.40	5.34	4.83	5.41	5.10	5.01	4.85
TOTAL	20.84	45.57	45.21	45.02	44.70	44.38	42.69	42.16
Diferencia			-0.36	-0.55	-0.88	-1.19	-2.89	-3.41

CONCLUSIONES

Es evidente que en el escenario base analizado al año 2020 se incremente el consumo de energía alcanzando un valor de 579.231 PJ, lo que representa un 116 % más de lo que se consumía en el año 2006, la anterior situación provoca igualmente un aumento de las emisiones de CO₂ equivalentes, las cuales alcanzarán un total de 45.574 Tg de CO₂ equivalente, es decir 119 % más que las emitidas en el 2006.

Como se pudo observar, las medidas de mitigación en su conjunto ayudarían a la disminución hasta del 20.9 % de emisiones de GEI respecto al escenario base; sin embargo este valor es muy inferior al aumento esperado de 119 % en el escenario base, es decir que aún

contemplando todas las medidas de mitigación el aumento en las emisiones será de aproximadamente 98.1 % con relación a la cantidad de emisiones del año 2006.

REFERENCIAS

An F., Sauer A. 2004. Comparison of Passenger vehicle Fuel Economy and Greenhouse Gas Emission standards around the world. Pew Center on Global Climate Change.

Centro Estatal de Investigación de la Vialidad y el Transporte (CEIT). 1997. Proyecto de Integración y Modernización del Transporte Público en Guadalajara, Jalisco. Memorandum Técnico 1. Recolección y Análisis de datos. Guadalajara, México.

Centro Estatal de Investigación de la Vialidad y el Transporte (CEIT). 2008. Programa de integración y modernización del transporte. <http://www.ceit.org.mx>.

Consejo Nacional de Población (ONAPO). 2008. Proyecciones de la población de México de las entidades federativas, de los municipios y de las localidades 2005-2050. Consejo Nacional de Población, México.

Ebrard, M. 2008. Segundo informe de Gobierno. Gobierno del Distrito Federal. <http://www.df.gob.mx>

US Environmental Protection Agency (USEPA). 2006. Final Technical Support Document. Fuel Economy Labeling of Motor Vehicle Revisions to Improve Calculation of Fuel Economy Estimates. Office of Transportation and Air Quality EPA420-R-06-017 December 2006

Gobierno del Estado de Jalisco. 2008. Programas Sectoriales Espaciales, Movilidad. Jalisco 2030. Gobierno de Jalisco. <http://www.jalisco.gob.mx>

Gobierno del Estado de Nuevo León. 2008. Plan sectorial de Transporte y Vialidad 2008-2030. <http://www.nl.gob.mx/>

Gobierno del Estado de Nuevo León. 2008. Anteproyecto del Plan Urbano de la Zona Conurbada de Monterrey. <http://www.nl.gob.mx/>

González N. 2008. Sexto informe de Gobierno. Gobierno de Nuevo León. <http://www.nl.gob.mx/>

González E. 2008. Segundo informe de Gobierno. Gobierno de Jalisco. <http://www.jalisco.gob.mx>.

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2008. Resultados del estudio sobre emisiones y características vehiculares en la Zona Metropolitana de Monterrey. México D.F. <http://www.ine.gob.mx>

INE. 2007. The Benefits and Costs of a Bus Rapid Transit System in Mexico City. Final Report. México D.F.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Banco de Información Económica. Estadísticas del sector comunicaciones y transportes. <http://dgcnesyp.inegi.org.mx/cgi-win/bdieintsi.exe/NIVG10#ARBOL>

INEGI. 1990. Censo Nacional de Población y Vivienda. Consulta Interactiva de datos.

INEGI. 1995. Censo de Población y Vivienda. Consulta interactiva de datos.

INEGI. 2000. Censo Nacional de Población y Vivienda. Consulta interactiva de datos.

INEGI. 2005. Censo de Población y Vivienda. Consulta interactiva de datos. www.inegi.org.mx/lib/olap/general_ver4/MDXQueryDatos.asp

INEGI. 2005a. II Censo de Población y Vivienda 2005, Microdatos del Distrito Federal, del Estado de México, de Jalisco y de Nuevo León. Aguascalientes, México.

INEGI. 2005b. Cartografía Geoestadística Urbana 2005 (AGEB). CD (Información para los municipios que integran la ZM de Guadalajara, ZM Monterrey y ZM del Valle de México, correspondiente a la clasificación CONAPO, INEGI, SEDESOL). Aguascalientes, México.

INEGI. 2005c. Marco Geoestadístico Municipal 2005 (MGM2005). CD (Información para la República Mexicana). Aguascalientes, México.

INEGI. 2005d. Vialidades principales cartografía 1:250000. Aguascalientes, México.

INEGI. 2006. Estadísticas de transporte 1994-2005. Aguascalientes, México.

INEGI. 2008. Anuario estadístico Jalisco 2008. Aguascalientes, México.

INEGI. 2009. Anuario estadístico de Nuevo León 2008. Aguascalientes, México.

INEGI. 1994-2008. La industria automotriz mexicana. Aguascalientes, México.

Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). 1996. Revised 1996a IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"; Reporting Instructions (Volume 1).

IPCC. 1996. Revised 1996b IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"; Workbook (Volume 2).

IPCC. 1996. Revised 1996c IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Reference Manual (Volume 3).

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (Guadalajara, Mexico), Jalisco, Centro Estatal de Investigación de la Vialidad y el Transporte (Jalisco, México), Jalisco (México). Secretaría de Vialidad y Transporte. 2001. Movilidad: una visión estratégica en la zona metropolitana de Guadalajara.

ITESO, 2001. 139 páginas.

Lozano A., Antún J.P., Granados F. 2004a. Resultados estadísticos del muestreo origen-destino de automóviles particulares 2002, en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Informe para el Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM., pp. 15.

Lozano A., Antún J.P., Granados F. 2004b. Resultados estadísticos del muestreo origen-destino de automóviles particulares 2004, en la Zona Metropolitana del Valle de México. Informe para el Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM., pp-16.

Lozano A., F. Granados, L. Álvarez-Icaza, V. Torres, J.P. Antún, R. Magallanes, 2005. Fase D: Recomendaciones. In: Bases para el Plan Rector de Vialidad del Distrito Federal, Vol 4, pp. 1-31, Universidad Nacional Autónoma de México y Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Lozano A., F. Granados, J. Antún, R. Magallanes, V. Torres, E. Romero, G. Londoño, A. Guzmán, F. Vargas, G. Luyando, 2006. Proyecto de Corredores Metropolitanos de Transporte de Carga en la Zona Metropolitana del Valle de México. In: Estudio Integral Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México, Vol IV, pp.1-348, Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Ambiental Metropolitana del Valle de México, México.

Lozano A., Antún JP., Granados F., Torres V., 2007. Assessment of traffic and emissions impacts, for determining future infrastructure in a metropolitan street network: An application in Mexico City. Proceedings of the Sixth Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN), June 3-8 2007, Pucket, Thailand.

Melgar y Asociados. 2008. Base de datos de parque vehicular por edad, nacional y para los estados. Legal, regularizados e ilegales. México D.F.

Negrete, Ma. Eugenia y Héctor Salazar (1986), “Zonas metropolitanas en México, 1980”, Estudios Demográficos y Urbanos, vol. 1, núm. 1, pp. 97-124

Peña E, 2008. Informe de Gobierno. Gobierno del Estado de México.

Peña E, 2008. Compromisos de gobierno.
<http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/gobierno/index.htm>

Secretaría de Energía (SE), 1997. Balance Nacional de Energía 1996. México D.F.

Secretaría de Energía (SE), 2008. Balance Nacional de Energía 2007. México D.F.

www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Balance_2007.pdf

SCT, DGST, 2008. Libro de Datos Viales 2008. Dirección General de Servicios Técnicos, Subsecretaría de Infraestructura, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), México.

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). 2008. Inventario de emisiones criterio, 2006. <http://www.sma.df.gob.mx>

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). 2008. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, 2006. <http://www.sma.df.gob.mx>

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). Base de datos de inventarios de emisiones 1990-2006. Documento interno.

SEDESOL, CONAPO e INEGI, 2007. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005. Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/delimex05/DZMM_2005_0.pdf

SEDESOL, CONAPO e INEGI. 2004. Delimitación de las zonas metropolitanas de México, México.

Sheffi Y., 1985. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods, Prentice Hall.

Sheinbaum, 2008. Problemática Ambiental de la Ciudad de México. Limusa, México D.F.

Sheinbaum C., Masera O., 2000. Mitigating Carbon Emissions while Advancing National Development Priorities: The Case of Mexico. *Journal of Climatic Change* 47(3): 259-282;

Sobrino, Jaime, 1993, Gobierno y administración metropolitana y regional, México, Instituto Nacional de Administración Pública, A. C.

Unikel, Luis, Crescencio Ruiz y Gustavo Garza, 1978., El desarrollo urbano de México, México, El Colegio de México.

West, B.H., R.N. McGill, J.W. Hodgson, S.S. Sluder, and D.E. Smith. 1997. Development and Verification of Light-Duty Modal Emissions and Fuel Consumption Values for Traffic Models, FHWA Report, Washington, DC, April 1997, and additional project data, April 1998. (Additional resources: www.fhwa-tsis.com).

CAPÍTULO IX

Análisis y Consideraciones

Jesús Efrén Ospina Noreña¹

La Tabla 1 estructura una matriz simple donde las columnas se refiere a los proyectos o capítulos expuestos anteriormente y las filas corresponden a los modelos y escenarios climáticos utilizados en cada uno de ellos, variables climáticas analizadas, proyectadas y resultados encontrados, variables relacionadas a las anteriores identificadas dentro de los objetivos específicos de cada capítulo, componente físico y/o biótico comprometido, afectado o relacionada a cada uno de los estudios.

En la Tabla 1, la letra equis (X) se refiere a los modelos/escenarios usados y efecto directo sobre algún componente determinado explícitamente en cada capítulo, la (X) considera que existen efectos sobre las componentes, pero no fueron determinados explícitamente en los estudios y el símbolo (-) indica que en los estudios no se usaron o identificaron o se tuvo en cuenta dichos aspectos.

¹ Doctor en Ciencias, CCA-CVCCCM-UNAM

TABLA 1. Matriz de elementos o aspectos transversales o no en los diferentes estudios realizados en el CVCCCM

<i>Aspecto/Proyecto</i>		<i>Capítulo I</i>	<i>Capítulo II</i>	<i>Capítulo III</i>	<i>Capítulo IV</i>	<i>Capítulo V</i>	<i>Capítulo VI</i>	<i>Capítulo VII</i>	<i>Capítulo VIII</i>
Modelo Escenario	HADGEM1	A2	X	-	-	-	-	X	-
		A1B	X	-	-	-	-	X	-
	ECHAM 5	A2	X	-	-	-	-	X	-
		A1B	X	-	-	-	-	X	-
	GFDLCM2	B1		X	-	-	-	X	-
		A1B		X	-	-	-	X	-
Variable	Temperatura	Incremento	X	X	-	X	-	X	-
		Disminución			-		-		-
	Precipitación	Incremento	X	X	-	-	-	X	-
		Disminución	X	X	-	-	-	X	-
Variables relacionadas		Evaporación, disponibilidad de agua	Evaporación, precipitación efectiva, volumen de escurrimiento (ZU), volumen de recarga (SC), consumo de agua, descarga del drenaje.	Humedad, T _{min} , T _{max} , Ozono (O ₃), enfermedades respiratorias y cardiovasculares	Partículas biológicas (aeroalergenos, polen), fenofases (floración), enfermedades respiratorias (alergias, asma)	Cobertura vegetal, captura de CO ₂ atmosférico (biomasa, suelo), Carbono orgánico del suelo	Cobertura vegetal, uso del suelo, suelo de conservación, tipos de vegetación, deforestación	Zona climática, CO ₂ equivalente, velocidad de generación de metano, tasa de descomposición, riesgo de incendios, lixiviados, contaminación suelo y mantos freáticos	Consumo y tipos de combustibles, GEI, emisiones de CO ₂ equivalente, consumo de energía
Elemento físico comprometido	Aire	X	X	X	X	X	X	X	X
	Agua	X	X	X	X	X	X	X	X
	Suelo	X	X	X	X	X	X	X	X
Elemento biótico comprometido	Animal	X	X	X (Salud humana)	X (Salud humana)	X (Acción microbiana)	X (biodiversidad)	X	X
	Vegetal	X	X	X	X	X	X	X	X

En la Tabla 1 se puede observar que sólo los capítulos I “Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático”, capítulo II “Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” y capítulo VII “Evaluación de los impactos de los residuos sólidos bajo cambio climático en la Ciudad de México”, consideraron las proyecciones de las variables climáticas de acuerdo a varios escenarios específicamente los cambios esperados en temperatura y precipitación. En todos ellos se observa una clara tendencia de aumento en la variable temperatura, mientras que en precipitación se encuentra incertidumbre al encontrar aumentos de la variable en algunos escenarios y disminución en otros.

Los aspectos identificados como variables relacionadas en los estudios, los cuales están expuestos en forma explícita en cada uno de ellos, se convierten en insumos necesarios y brindan la posibilidad de adelantar estudios retrospectivos que permitan observar la relación entre ellas y las variables climáticas, permitiendo proyectar a futuro su comportamiento, con el propósito de encontrar la posible vulnerabilidad de los sistemas y/o variables relacionadas y así poder elaborar estrategias de mitigación y adaptación.

Los efectos directos sobre los elementos o componente identificados en cada estudio, se convierten en plataformas para profundizar, complementar y avanzar en el conocimiento de los efectos del cambio climático sobre dichos elementos o componentes, lo cual permitirá tener estudios cada vez más integrados, reducción en la incertidumbre de los resultados y optimización de recursos económicos y humanos.

Es importante anotar que aunque la mayoría de los estudios, exceptuando el capítulo VII, se enfocaron a explorar los efectos sobre los componentes físicos correspondientes a sus objetivos específicos, prácticamente todas las investigaciones llevan efectos implícitos sobre todos los elementos. Por ejemplo, los capítulos I y II no sólo influyen sobre el recurso hídrico, sino también sobre el aire y suelo al contemplar los procesos complejos del ciclo hidrológico y otros ciclos e interrelaciones, los cuales incluyen humedad del aire y del suelo, actividad microbiana en el suelo, reacciones químicas en el aire, tasa de descomposición de vegetación, tipos y velocidad de meteorización, entre otras; interrelaciones que se deben explorar e integrar en futuros estudios. Lo anterior señala necesarias líneas de investigación que se deben realizar, aprovechando los resultados ya obtenidos como insumos.

De lo anteriormente expuesto se desprenden algunas consideraciones, las cuales se resumen a continuación.

Es necesario adelantar estudios tendientes a encontrar la relación existente entre las variables climáticas y las variables explicativas de los índices de vulnerabilidad de la disponibilidad de agua, explorados en el capítulo I, mediante análisis retrospectivos, de tal

forma que permitan construir o elaborar escenarios de dicha vulnerabilidad de acuerdo a los escenarios de cambio climático esperados.

De lo expuesto en el capítulo II, se observa la necesidad de definir años normales, calurosos, fríos, igualmente de encontrar la relación de las variables climáticas con las definiciones anteriores y a su vez con el aumento o no en la demanda del agua y el incremento o disminución de la oferta natural de los recursos hídricos, con el propósito de poder construir los escenarios futuros con relación a los anteriores aspectos.

Los resultados encontrados en el capítulo III “Efecto de la temperatura sobre las admisiones hospitalarias pediátricas en la Ciudad de México de 2000 al 2002”, permiten proyectar las incidencias hospitalarias al futuro de acuerdo a la relación que se encontró de la temperatura con el O₃ y de este con las diversas enfermedades respiratorias e ingresos hospitalarios; es igualmente de gran relevancia iniciar estudios conducentes a determinar los efectos económicos en los que incurren los afectados a casusa de la enfermedad e incapacidad a la que se ven sometidos, incluyendo costos empresariales, personales, familiares, representados por ejemplo en ingresos/horas, ingresos/días de incapacidad, es decir, lo que el afectado dejaría de percibir y/o lo que el empleador debería de pagar y de percibir a la vez, gastos en medicamentos, transporte, entre otros.

Aunque en el estudio relacionado con la “Evaluación de la calidad del aire de la Ciudad de México y su efecto en la salud de la población expuesta a biopartículas aeroalergénicas (granos de polen) y su relación con el cambio climático”, se presentan resultados que deben ser analizados con detenimiento, debido a que se dan valores muy determinísticos, sin especificar claramente de dónde salieron las proyecciones, modelos y escenarios que se usaron. Por otra parte, considerar 10 meses de monitoreo no es suficiente para determinar el efecto de las variables climáticas sobre las fenofases de las especies; en este caso en particular de la floración del *Fraxinus*; el estudio es importante desde el punto de generación de bases de datos, determinación de relaciones con la salud, elaboración del inventario de polen, y atlas de la distribución espacial, lo cual brinda una plataforma para continuar estudios y avanzar en esta área del conocimiento. Al igual que en el caso anterior se recomienda adelantar e iniciar otras investigaciones epidemiológicas y cálculos econométricos.

De las investigaciones desarrolladas sobre el recurso suelo capítulo V, es importante adelantar estudios sobre la transición (cambios) que pueden tener los bosques y las especies vegetales con el cambio climático y así poder determinar con que especies enriquecer los bosques existentes o reforestar las áreas degradadas, pero que cumplen con funciones importantes como reguladores hídricos, captadores de CO₂, entre otros; en este estudio tampoco se consideran modelos y escenarios de CC; pero se dan elementos e interacciones de variables relevantes para la cuantificación de la captura de CO₂, lo cual puede ser

aprovechado para generar estrategias de prevención (captura de CO₂), planeación en grandes ciudades, mitigación y adaptación.

Igualmente en el capítulo VI no se observa ni hay relación con los modelos y escenarios de cambio climático; sin embargo se analizan y desarrollan variables que seguramente se van a ver afectados por el CC, además se dan elementos para la planeación, tratando de conservar los elementos o recursos que mitiguen los efectos del CC, como son las zonas de SC, el estudio también brinda la plataforma gráfica en 26 coberturas temáticas a las cuales se les puede traslapar los efectos del CC, esto apoyados en algunos estudios complementarios.

De otro lado el capítulo VII, plantea la relación existente entre zonas climáticas, producción de residuos sólidos, producción de CH₄ y CO₂ equivalente, lo que se convierte en información importante para profundizar sobre los efectos de CC en las anteriores variables y para poder elaborar estrategia de mitigación y adaptación que incluya las posibles reducciones de GEI los cuales pueden ser introducidos o considerados en las futuras negociaciones de certificados de reducción de emisiones de GEI. En este punto es importante señalar que el estudio sólo hace referencia al comportamiento de la temperatura, pero no muestra datos para los diferentes escenarios, tampoco muestra lo que pasa con la precipitación y la relación de la humedad con la descomposición de residuos y formación de los diferentes compuesto, lo que se convierte en oportunidades o posibles líneas de investigación que vayan complementando la actual, lo anterior aplica para la mayoría de las investigaciones expuestas.

Las tendencias de consumo de energía y producción de GEI asociados a los diferentes tipos de transporte y combustibles, encontradas en el capítulo VIII “Escenarios de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de pasajeros en la zona metropolitana del valle de México”, muestran que es necesario desarrollar estudios donde se considere la búsqueda de nuevas fuentes de energía, renovables y menos contaminantes, debido que de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se concluye que aun contemplando todas las medidas de mitigación propuestas al año 2020, el aumento en las emisiones de GEI será de aproximadamente 98.1 % con relación a lo que se emitía en el año 2006. Es de gran importancia igualmente buscar las diferentes interacciones y relaciones entre las fuentes de emisiones móviles (transporte), concentración de compuestos químicos perjudiciales para la salud y en general para las diversas especies vegetales y animales, reacciones físico-químicas de los compuestos con las variables climáticas como: temperatura, precipitación, evaporación, humedad relativa.