

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

Dra. Gloria Soto Montes de Oca
Dra. Marina Herrera Pantoja

Colaboradores
Mtra. Araceli Soto Montes de Oca
Lic. María Eugenia Vilchis Carmona
Ing. Mario Archundia Silva

AGOSTO 2009

- ❖ Este proyecto se realizó en el marco de desarrollo del Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM), fruto de la cooperación entre la Universidad Nacional Autónoma de México y el Gobierno del Distrito Federal, a través de sus respectivas dependencias, el Centro de Ciencias de la Atmósfera y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, contando con el apreciable apoyo financiero de éste último.

1. INTRODUCCION

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 en 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 México es aun limitado el número de estudios que han abordado esta problemática particular, pero resulta urgente hacerlo para las zonas con mayor vulnerabilidad. Las autoridades han reconocido que la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es la región del país con los problemas más graves de sustentabilidad en el manejo del recurso.

La ZMVM 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 DF se destina para fines domésticos. El 67% del agua que consume la ZMVM proviene del acuífero local y 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 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 Principales:

- ❖ Realizar una evaluación de las posibles implicaciones que el cambio climático puede tener los recursos hídricos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) durante el presente siglo.
- ❖ Evaluar los riesgos potenciales del cambio climático en la cantidad, calidad y gestión del agua en la ZMCM.

Objetivos secundarios

- ❖ 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.
- ❖ Proponer políticas y acciones aplicables a la ZMCM.

Para evaluar el impacto del cambio climático este estudio revisó la información histórica existente para tener una estimación de los rangos en que el clima de de la ZMCM ha variado en las últimas décadas. Se utilizó un Modelos de Circulación Global (GCM) como la

herramienta para estudiar el clima futuro, analizando 2 escenarios de emisiones de gei, el A1B y el B1 para el periodo 2046-2085. 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 precipitaciones en la gestión 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.

El trabajo se divide en 7 secciones. Después de esta introducción se desarrolla el planteamiento del problema. En la segunda sección se describen las principales características físicas de la ZMVM. En la tercera sección se describe la metodología. Posteriormente, se analiza el sistema de abasto de la ciudad en términos de su resiliencia a fenómenos externos y vulnerabilidad de sectores específicos de la población. En la quinta y sexta sección se presentan los resultados de los futuros escenarios de cambio climático y se evalúan los posibles impactos de los escenarios en el sistema de abasto del servicio, así como las posibles medidas de adaptación. Finalmente se presenta una discusión y conclusiones sobre los resultados de la investigación.

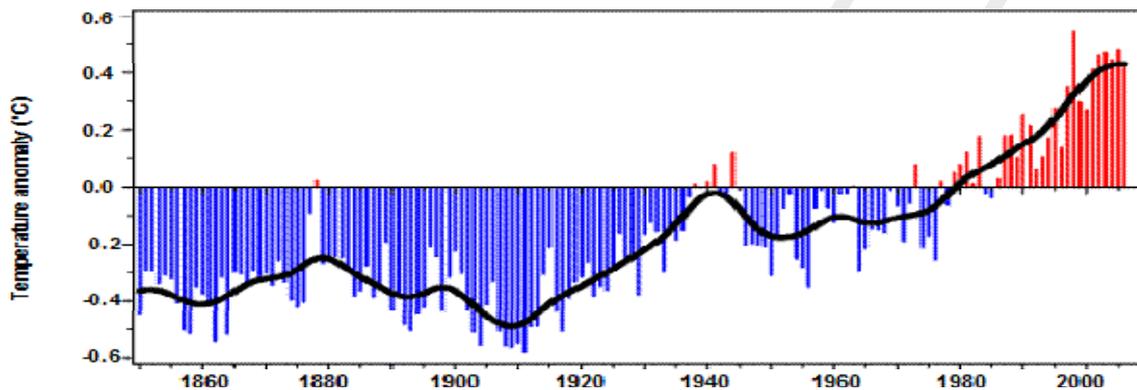
Planteamiento del Problema

El sistema climático es extremadamente complejo y muchos procesos contribuyen a los cambios en los patrones climáticos. El clima de nuestro planeta varía naturalmente como resultado de las interacciones entre el océano y la atmósfera, el cambio de órbita, fluctuaciones en la energía recibida del sol o por erupciones volcánicas (Burrough, 2001). Desde principios del siglo XX, la temperatura promedio del planeta ha aumentado aproximadamente 0.6 °C en promedio (Jones *et al.*, 1999; Jones and Moberg, 2003). Los análisis de records climáticos y paleoclimáticos confirman que el siglo XX registró las temperaturas más altas del último milenio (Stouffer *et al*, 1994; Burrough, 2001). Estos cambios exceden en gran medida la variabilidad climática natural (Figura 1.1).

Sin embargo, hay pruebas científica contundentes que demuestran que el calentamiento observado es resultado del incremento en las concentraciones de gases invernadero de origen antropogénico como son: el vapor de agua, el bióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y los clorofluorocarbonos (CFC) (Manabe y Bryan, 1985; Houghton et al., 1990; Vitousek, 1994; IPCC, 2001). A excepción de los clorofluorocarbonos, todos existen de manera natural en la

tropósfera y atrapan parte del calor que produce el sol. Este proceso corresponde al llamado efecto de invernadero, un proceso esencial dentro del sistema climático. Sin embargo, el incremento en estos gases es suficiente para modificar significativamente las propiedades de la atmósfera y consecuentemente, del clima. Las actividades humanas tales como el uso de combustibles fósiles y la tala inmoderada de árboles han producido un aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (Tabla 1.1).

Figura 1.1 Temperatura global promedio de 1850 a 2006



Fuente: The climatic Research Unit, 2007, website: <http://www.cru.uea.ac.uk>

Tabla 1.1 Cambio en la concentración de gases de efecto invernadero durante el periodo 1750-2005

Year	Carbon dioxide (ppmv)	Methane (ppmv)	Chlorofluorocarbons (pptv)	Nitrous oxide (ppbv)
1750	280	0.80	0	270
2005	379	1.77	484	319

Fuente: IPCC, 2007. ppmv = partes por millón por volumen, ppbv = partes por billón por volumen y pptv = partes por trillón por volumen.

Las evidencias de que muchos sistemas de nuestro planeta están siendo afectados por el calentamiento global son contundentes. Por ejemplo, en los sistemas vinculados con temperaturas bajas se ha observado que el hielo del ártico se está adelgazando, ha aumentado el número y extensión de los lagos glaciales, ha aumentado la inestabilidad del terreno en las regiones de permafrost, han aumentado las avalanchas de rocas en regiones montañosas, hay un descenso de la cubierta de nieve, se ha reportado acortamiento de las estaciones gélidas en lagos y ríos, hay aumento de la escorrentía y adelanto de las fechas de caudal máximo primaveral en numerosos ríos alimentados por glaciares y por nieve. En los sistemas hidrológicos se observa que la temperatura de lagos y ríos en numerosas regiones está aumentando produciendo efectos sobre la estructura térmica y sobre la calidad del agua, la precipitación está aumentando en las latitudes norte y disminuyendo en los trópicos, los eventos meteorológicos extremos tales como sequías e inundaciones están aumentando provocando



grandes pérdidas humanas y económicas en todo el mundo (Figuras 1.2 y 1.3).

En los diversos ecosistemas se tiene evidencia de que los patrones de comportamiento de muchas especies de plantas y animales en todo el mundo se están alterando, los procesos primaverales como el retoñar de las plantas, la migración de las aves o la puesta de huevos se están adelantando, hay alteraciones del ámbito geográfico y adelantamiento de las migraciones de diversas especies. En la salud humana se reportan casos de mortalidad causada por el calor en Europa, cambios en los vectores de enfermedades infecciosas y aumento de la producción de pólenes alergénicos (Parrilla *et al.*, 1994; Nicholls *et al.*, 1996; Crick *et al.* 1999; de Vries, 2000; McCarthy *et al.*, 2001; Arnell, 2004; Ericson *et al.*, 2006; Viner, 2006; Both y Visser, 2001; Penuelas, 2001; Walther *et al.*, 2002; Penuelas y Boada, 2003).

Los desastres de origen hidrometeorológico son los más frecuentes y los que mayores daños causan a la población de todo el mundo. Las sequías son una de las causas principales de desastres a escala mundial. Durante los últimos 30 años se ha registrado un aumento en la frecuencia e intensidad de este fenómeno lo que ha impulsado grandes movimientos migratorios, e incitado hambruna, crisis económica, social y política en muchos países de nuestro planeta (<http://www.drought.unl.edu/index.htm>).

Las lluvias intensas también provocan daños. Los aumentos en la población durante el siglo XX llevaron a países como México a permitir asentamientos humanos en zonas de alto riesgo: cauces de ríos barrancas o cañadas, sitios expuestos a huracanes, al punto de que cientos de vidas están en riesgo. Las experiencias del huracán Mitch en 1998 y Katrina en 2005 mostraron que no basta con disponer de avanzados métodos de monitoreo y pronóstico para evitar la tragedia ante un evento hidrometeorológico extremo. Para reducir la vulnerabilidad ante este tipo de eventos es necesario el trabajo conjunto de científicos, tomadores de decisiones y sociedad.

Figura 1.2 (a) Las Inundaciones de 1998 causaron 7000 muertos, pérdidas de 25 hectáreas de cultivo y daños a 6 millones de casas en Bangladesh, China, India, Vietnam. (b) Agosto 2005 el Huracán Katrina arrasa la ciudad de Nueva Orleans, USA, dejando perdidas por 15 millones de dólares, 1940 muertos y 29000 desaparecidos. (c) Las inundaciones de Tabasco, México, en 2007 cubren el 80% del estado y son la peor catástrofe en los últimos 50 años.

Figura 1.3 (a) Desde 1994 en Norte de México enfrenta una de las sequías más severas, las pérdidas económicas suman más de 1 billón de dólares. (b) La sequía que Australia enfrenta desde 2001 es catalogada como la peor de los últimos 100 años (c) Barcelona está importando agua de Marsella, con un costo de 22 millones de euros.



El cambio climático es una de las amenazas más serias que actualmente enfrenta nuestro planeta 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). El último informe del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) proyecta que el aumento en la temperatura debido al incremento de gei , producirá un gran impacto en los recursos hídricos, acortando la duración del periodo de lluvias, reduciendo la cubierta de nieve, incrementando el nivel del mar y aumentando la

frecuencia de los eventos extremos como inundaciones y sequías (IPCC, 2007). Según el IPCC, si se mantiene la tendencia actual los daños mundiales serían catastróficos dado que el nivel del mar podría subir de 15 a 95 cm para el año 2100. El incremento de un metro desplazaría a 70 millones de personas en Bangladesh, sumergiría el 80 por ciento de las Islas Marshall y amenazaría las costas suratlánticas de los Estados Unidos, la zona costera de Japón. El derretimiento del hielo en el Ártico afectaría los pueblos nativos del Norte de Canadá, y sería uno de los peores escenarios de desastre para el hemisferio norte.

En México los efectos del cambio climático se han manifestado con una secuencia de desastres de origen hidrometeorológico con graves daños para la sociedad mexicana. Por un lado se han presentado sequías como la de 1997, 1998 y 2005 que provocaron incendios forestales y la pérdida de cosechas. Por otro lado, los eventos de lluvias extremas se han intensificado desde 1999, provocando grandes pérdidas humanas y económicas en todo el país sobre todo en el sureste mexicano (Figuras 1.2 y 1.3).

Los escenarios del cambio climático para México son alarmantes, sobre todo porque el país carece de los recursos y estrategias para enfrentar y mitigar los impactos de este fenómeno, además de poseer una elevada vulnerabilidad social, económica y política. Y es que un alto porcentaje de la población vive en zonas de riesgo, en viviendas precarias, en áreas con escasez de agua, en zonas con graves problemas de contaminación o depende de tierras de temporal.

En México hay muchas presiones en los recursos hidráulicos 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. Existe el reconocimiento de la ONU sobre la inequidad en la distribución del servicio de abasto de agua potable. Es bien sabido que el acceso inadecuado al agua constituye una parte esencial de la pobreza de la población, afectando a sus necesidades básicas de salud, seguridad alimentaria y sustento (ONU, 2003). La inequidad con frecuencia afecta a las zonas periféricas. En algunos casos estas áreas son asentamientos informales, en donde la posibilidad de instalar el sistema de abasto se ve restringida por factores diversos.

El concepto de vulnerabilidad en términos de abasto de agua se define como el grado en el que las personas son afectadas por factores que perturban sus vidas y que están fuera de su control inmediato. En muchas ciudades de nuestro país los problemas de disponibilidad y

contaminación del recurso son cada vez más graves, lo que pone en riesgo la provisión del servicio y hace vulnerable a la población frente a posibles problemas de acceso al servicio en el futuro. Debido al peligro de deterioro del servicio es relevante conocer el riesgo en que se encuentran los sistemas de abasto de agua en estas ciudades.

Una reducción del volumen de agua en cuencas demasiado explotadas debido a cambios en los patrones de precipitación y evapotranspiración puede traducirse en una catástrofe. Por lo tanto, es importante generar escenarios futuros de cambio climático en México que permitan conocer la vulnerabilidad a condiciones anómalas en el clima y proponer estrategias para enfrentar dichas situaciones adversas.

En este estudio para evaluar los efectos del cambio climático en la ZMCM, primeramente se revisa la información histórica existente para determinar las tendencias climáticas, hidrológicas, de demanda de agua y de políticas de manejo. Una vez establecida la línea base, se desarrolla la metodología que permita hacer predicciones futuras, análisis y evaluaciones de los cambios que experimentará el clima en los años por venir. Para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo asociados al abasto del agua entre la población es fundamental considerar los efectos de las actuales prácticas insustentables en el manejo del servicio y prever el efecto adicional que el cambio climático tendría.

1. ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO

1.1 Antecedentes

Antes de la conquista de la gran Tenochtitlán, los manantiales de Chapultepec eran la fuente principal de abasto de agua. Posteriormente, a mediados del siglo XIX con la desecación de los lagos, se inició la explotación del hoy denominado acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el cual desde entonces ha sido la fuente más importante para el abastecimiento de agua de la población del Distrito Federal. En 1936 había 1,100 pozos y el acuífero aún se comportaba como estacionario.

Durante el siglo XX la ciudad de México presentó un crecimiento exponencial debido no solamente al aumento demográfico natural sino también a la migración producida por la centralización que ofrecía la oportunidad de empleo e ingresos más altos; oferta de servicios más económicos, acceso al suelo y vivienda; etc. Entre 1940 y 1970, la población creció a un promedio del 5% anual provocando que para 1980 el crecimiento físico de la ciudad de México se diera de una forma desordenada sobre el 50% de suelos de propiedad ejidal o comunal. En

1986, la población migrante representaba el 24.6% del total de la población residente en la ZMVM. Adicionalmente las altas tasas de crecimiento observadas en los municipios conurbanos del área metropolitana llevaron a la unión con la zona metropolitana de la ciudad de México. Sin embargo, A partir de 1990 el crecimiento descendió a 1.7% anual, debido principalmente a la disminución en la tasa de natalidad y al descenso de la inmigración neta debido a la saturación del espacio físico, la oferta insuficiente de servicios públicos, la reducción significativa del empleo formal, la inseguridad y el deterioro de la calidad de la vida y del ambiente (INEGI 1981; 1991; 1996 y 2001).

Dado el rápido crecimiento poblacional, el patrón de expansión urbana ha carecido de planeación, provocando que la infraestructura para la provisión de los servicios públicos sea siempre insuficiente. Las autoridades, tanto locales como federales, no han podido planear el crecimiento y desarrollo del país ni proveer a toda la población con la siempre creciente demanda de servicios de agua potable y tratamiento de aguas residuales (Arredondo-Brun, 2007).

1.2 Localización del área de estudio

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es el centro cultural, económico e industrial de la República Mexicana. En ella se localiza el 45 por ciento de la actividad industrial nacional y tiene lugar el 38 por ciento de su producto interno bruto (INEGI,2005). Se ubica en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano, en un valle a 2,400 metros sobre el nivel del mar (msnm), rodeado de sierras de origen volcánico con cumbres que alcanzan alturas superiores a los 5000 metros (Figura 2.1).

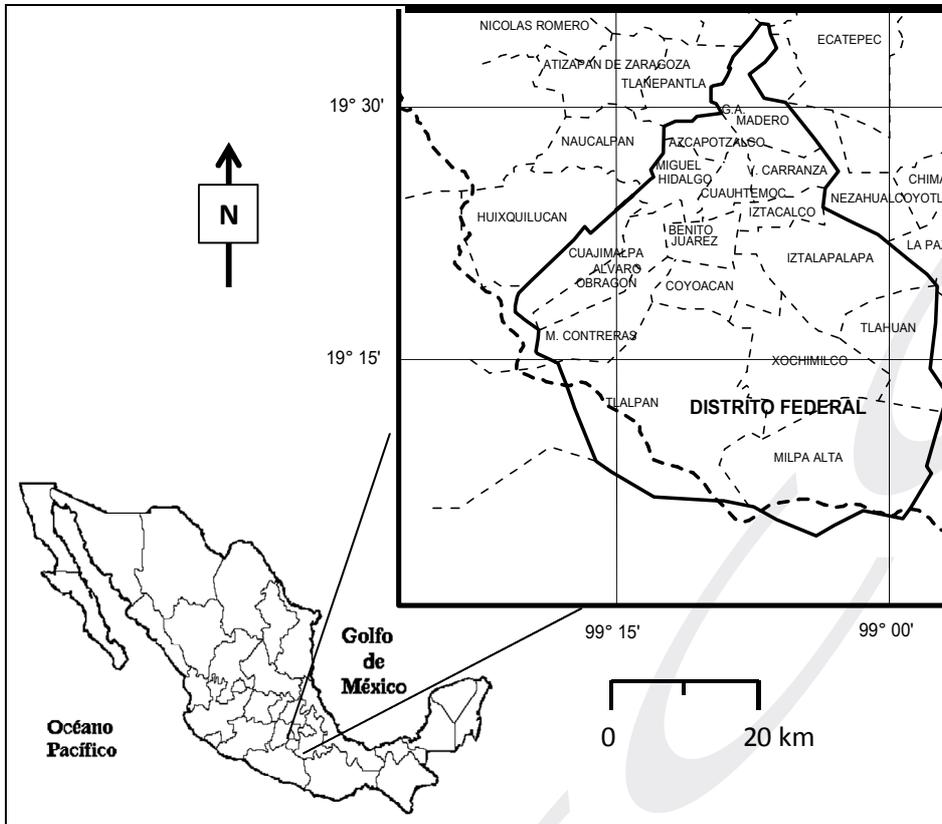
2.3 El Clima de la ZMCM

Los factores que controlan el clima de una región son la latitud, la elevación, la topografía, su proximidad a largas masas de agua y las circulaciones atmosféricas dominantes. El clima de la ZMCM, por su régimen de lluvia y por la altitud en la que se ubica, es considerado tropical-atemperado (Jáuregui, 2000).

En la ZMCM la temperatura media anual varía entre 12° y 18°C, con valores máximos en abril y mayo de hasta 33.5°C y mínimos durante diciembre y enero de hasta -1°C. En las partes planas se presentan las temperaturas más altas y las temperaturas bajas se presentan en las zonas montañosas como la sierra del Ajusco y Sierra Nevada. Las variaciones de temperatura pueden ser de hasta 15°C lo que permite dividir la estación de secas en las subestaciones

Seca-Caliente de marzo a mayo y Seca-Fría de noviembre a febrero.

Figura 2.1 Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de México.



La precipitación es la variable meteorológica de más valor, dado que de ella depende el agua disponible que cada año es utilizada. A diferencia de algunos países donde la información climática es clave para la planeación, en México son pocas las acciones coordinadas que se siguen para mitigar los efectos negativos y aprovechar los aspectos positivos de condiciones climáticas extremas. La ZMCM presenta un régimen anual definido de precipitación entre los meses de junio a octubre, relacionado con la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos sin pticos en las Costas del Pacífico y Atlántico. Los otros meses son de sequía, aunque pueden tener lugar lluvias aisladas. La precipitación media anual es de alrededor de los 700 mm, aumentando con la elevación e incrementándose de noreste a suroeste. Los niveles más altos de precipitación se registran en las zonas montañosas y los más bajos en la zona oriente. Un concepto que es importante resaltar aquí es el de sequía meteorológica, que se define en términos de una disminución de precipitación por debajo de lo "normal" o promedio.

2.4 Edafología

aproximadamente a 35 000 ha del SC. El resto está ocupado por matorrales, pastizales, vegetación introducida y uso urbano.

De acuerdo las cartas edafológicas del INEGI (1989) a escala 1: 50 000, en la ZMCM se tiene gran diversidad de suelos, siendo el Feozem el de mayor distribución el cual tiene una capacidad de infiltración media (Ortiz y Ortiz, 1990). El incremento de la mancha urbana ha reducido la infiltración promedio estimada que se tenía en los años 70 de 228.2 Mm³ a 155.5 Mm³ para los años 2000 en las Delegaciones del Distrito Federal y de 86.7 Mm³ a 68.8 Mm³, en los mismos periodos, para los Municipios Conurbados. En la tabla 2.1 se indican las unidades de suelo presentes en la ciudad de México, considerando la clasificación de suelo propuesta FAO-UNESCO (INEGI, 2000).

Tabla 2.4 Tipos de suelos de la ZMCM		
Tipo de suelo	Características	Capacidad de Infiltración
Andosol (T)	Connotativo de suelos formados a partir de materiales ricos en vidrio volcánico que por lo común presentan un horizonte superficial de color oscuro. En condiciones naturales tienen vegetación: de pino, abeto, encino, etc., si está en zonas templadas de selva o si está en zonas tropicales, con una capa superficial de color negro, son suelos muy susceptibles a la erosión.	Media
Cambisol (B)	Suelos cuya estructura y consistencia son producto de la meteorización in situ. Se desarrollan en cualquier clima, menos zonas áridas, con cualquier tipo de vegetación en el subsuelo tiene una capa de terrones que presentan un cambio con respecto al tipo de roca subyacente, con alguna acumulación de arcilla, calcio, etc. Susceptibilidad de moderada a alta a la erosión.	Lenta
Feozem (H)	Suelos ricos en materia orgánica. Se encuentra desde zonas semiáridas hasta templadas y tropicales. En condiciones naturales tiene casi cualquier tipo de vegetación, se halla en terrenos planos hasta montañosos y la susceptibilidad a la erosión depende del tipo de terrenos donde se encuentre.	Media
Fluvisol (J)	Se forma por materiales de depósito aluviales recientes, están constituidos por material suelto que no forma terrones y son poco desarrollados. Se encuentran en todo tipo de clima, cercanos a zonas de acarreo por agua, la vegetación varía desde selva a matorrales y pastizales.	Rápida
Gleysol (G)	Se encuentra en casi todos los climas, en zonas donde se acumula y estanca el agua, al menos en la época de lluvias. En la capa saturada con agua presentan colores azulosos, verdosos o grises que al secarse presentan manchas rojas, su vegetación natural es de pastizal. Estos suelos en ocasiones presentan acumulación de sales. Son poco susceptibles a la erosión.	Muy lenta
Histosol (O)	Suelos ricos en materia orgánica sin descomponer o parcialmente en estado de biodegradación. Es un suelo de zonas de climas húmedos, templados o cálidos. Se encuentran en zonas pantanosas o en los lechos de antiguos lagos.	Media
Litosol (Y)	Suelos de poco desarrollo con la roca dura subyacente a poca profundidad. Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, son suelos sin desarrollo, con profundidad	Media

	menor de 10 cm., tienen características muy variables, según el material que los forma. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentren pudiendo ser desde moderada hasta alta.	
Luvisol (L)	Tiene acumulación de arcilla en el subsuelo, son de zonas templadas o tropicales lluviosas, su vegetación natural es de selva o bosque, son rojos o claros, moderadamente ácidos. Son suelos de susceptibilidad alta a la erosión.	Lenta
Planosol (W)	Suelos generalmente desarrollados en una topografía vana o deprimida con escaso avenamiento. presenta debajo de la capa más superficial, una capa más o menos delgada de un material claro, ácido e infértil que a veces impide el paso de las raíces, por debajo de esta capa se presenta un subsuelo arcillosos e impermeable, o bien, roca o un tepetate, son de climas semiáridos o templados su vegetación natural es de pastizal. Son muy susceptibles a la erosión.	Lenta
Regosol (R)	Material suelto que reposa sobre la roca dura subyacente. Suelo con poco o escaso desarrollo. Se pueden presentar en muy diferentes climas y con diversos tipos de vegetación. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende del terreno en el que se encuentre.	Media
Solonchak (Z)	Se caracteriza por presentar un alto contenido en sales en algunas partes del suelo, o en todo él, se presentan en diversos climas y en zonas donde se acumulan sales solubles. Su vegetación, cuando la hay, es de pastizal o plantas que toleran las sales. Son poco susceptibles a la erosión.	Muy lenta
Vertisol (V)	Suelos ricos en arcilla; generalmente en zonas subhúmedas a áridas, con hidratación y expansión en húmedo y agrietados cuando secos. Son suelos muy duros, arcillosos y masivos frecuentemente negros, grises y rojizos. Son de climas templados y cálidos, con una marcada estación seca y otra lluviosa. Su susceptibilidad a la erosión es baja.	Muy lenta

Fuente: INEGI 2000 y 1989

El SC se ubica en la provincia florística Serranías Meridionales, región Mesoamericana de Montaña. Es una zona de transición entre el Reino Holártico y Neotropical. Presenta dos regiones ambientales bien definidas en cuanto a la cobertura vegetal, que corresponden a los dos sistemas terrestres: la Sierra de Las Cruces, la cual presenta suelos desarrollados y clima subhúmedo, y la Sierra Chichinautzin, con suelos escasamente desarrollados y condiciones más secas.

Estas 2 estructuras presentan 6 tipos de vegetación, distribuidos a lo largo de un gradiente altitudinal y climático. El bosque de oyamel, que ocupa la mayor superficie, siguiéndole en orden de importancia el área agrícola, el pastizal, el bosque encino y el matorral.

Entre 1999 y el 2000 se realizó el análisis y evaluación del estado actual del medio ambiente y el recurso hídrico, así como su relación con el medio urbano (regular e irregular). Los resultados concluyeron que el SC enfrenta un sostenido proceso de degradación de sus recursos naturales. La zona progresivamente ha ido perdiendo los ecosistemas que facilitan la

recarga y su lugar está siendo ocupado por asentamientos humanos irregulares que la cancelan (OPMAC, 2000).

2.5 Geología

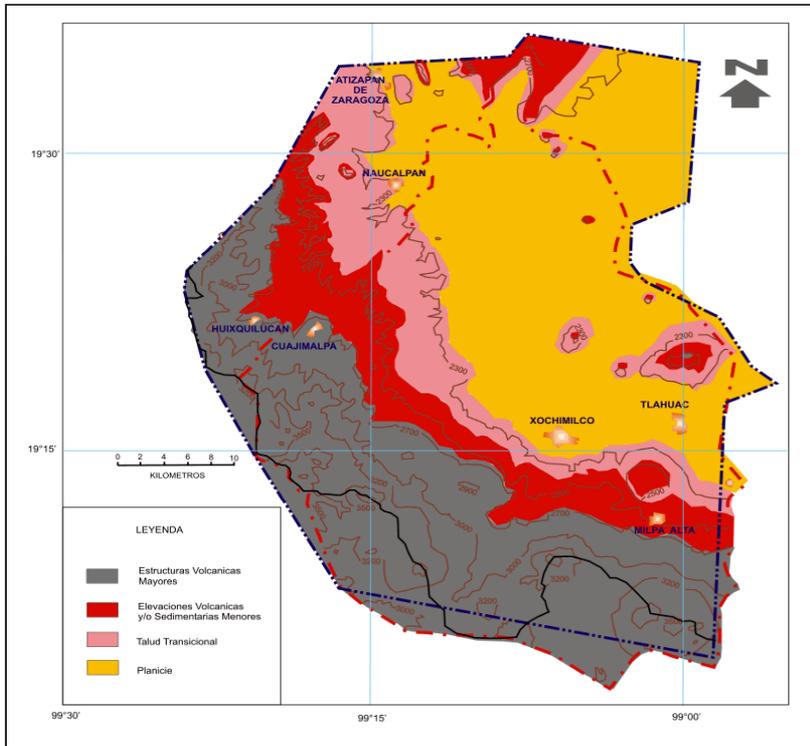
Los detalles de la geología subsuperficial han sido descritos por Mooser (1988) y por Mooser y Molina (1993) quienes identificaron tres principales zonas hidrológicas para el Valle de México: la zona lacustre, el piedemonte o zona de transición y la zona montañosa. La zona lacustre corresponde a las elevaciones de menor altura. La región piedemonte se encuentra entre el lecho de los antiguos lagos y las montañas de mayor pendiente y está compuesto en gran medida por basalto fracturado de flujos volcánicos. La formación de basalto es altamente permeable, con una buena capacidad de almacenamiento, se encuentra expuesta cerca de la porción superior del piedemonte y se extiende por debajo de los depósitos aluviales del valle. El piedemonte, conocido también como zona de transición, es importante para la recarga natural del acuífero. Las montañas que circundan la Cuenca de México son de origen volcánico. La zona del acuífero está limitada principalmente por dos grandes estructuras tectovolcánicas que se diferencian entre sí por su edad geológica y por sus características morfológicas y litológicas, éstas son las sierras de Las Cruces y del Chichinautzin.

La Sierra Nevada se encuentra hacia el este, mientras que la Sierra de las Cruces se localiza hacia el oeste. La sierra de Las Cruces presenta un gran sistema de elevaciones de origen volcánico con alto grado de fracturamiento; tiene una altitud de 4 000 msnm, supera los 12° de pendiente y muestra un tipo de relieve denudatorio (Lugo,1984); asimismo, hacia la zona del parteaguas de la sierra se identifican 19 circos de erosión, de un ancho promedio de 1.5 kilómetros (Lugo, 1984 y 1990). La Sierra Chichinautzin, en el sur, cuenta con 3600 msnm de altitud y un relieve volcánico acumulativo; es una estructura joven, (Pleistoceno Superior-Holoceno) forma la cadena más reciente y es la zona de recarga natural del acuífero de la ZMVM, debido a la alta permeabilidad de su roca de basalto. Los grandes manantiales de Xochimilco son un punto de descarga del flujo subterráneo. Las fuentes de recarga del agua subterránea son en gran medida las precipitaciones infiltradas y la nieve derretida en las montañas y cerros que la rodean.

De acuerdo a la descripción de Mooser *et al.*(1996), la secuencia litológica de la Cuenca de México va más allá de los 3 mil metros de profundidad y se clasifica de lo reciente a lo antiguo de la siguiente manera: i) depósitos lacustres del Cuaternario; ii) sedimentos aluviales del Cuaternario; iii) vulcanitas básicas del Cuaternario Superior; iv) vulcanitas básicas y ácidas del

Cuaternario Inferior; v) depósitos de la Formación Tepozteco; vi) depósitos lacustres del Plioceno; vii) vulcanitas, principalmente ácidas, del Mioceno; viii) Vulcanitas ácidas del Oligoceno y ix) sedimentos marinos plegados del Cretácico.

Figura 2.5 Geomorfología de la Cuenca de México.



Fuente: Lopez, 1988

2.6 Acuífero de la ZMCM.

Regionalmente el subsuelo del Valle de México se encuentra constituido por una secuencia de aluviones y productos volcánicos, ambos permeables, que permiten la infiltración y circulación de agua subterránea y dan origen a un acuífero. En el centro del valle se emplazó un cuerpo de arcillas lacustres que funcionan como acuitardo debido a su reducida permeabilidad. El subsistema acuífero se encuentra confinado por las arcillas lacustres en la porción oriental del valle, en la porción occidental funciona como acuífero libre (Figura 2.6).

La recarga principal del acuífero proviene de la infiltración del agua que se precipita sobre las sierras que lo circundan, en especial en la porción sur, debido a la alta permeabilidad de las rocas que en esa zona existen. El agua infiltrada circula en forma radial de los flancos de las sierras hacia el centro del valle. La descarga principal del acuífero se lleva a cabo mediante el bombeo de los pozos perforados en el valle y no se manifiesta una descarga hacia otras

México. Este acuífero granular-mixto-fracturado se encuentra subyaciendo a las arcillas lacustres. Es de este acuífero del que se extrae la mayor parte del agua subterránea para la ciudad de México. Adicionalmente, algunos autores (Sánchez y Gutiérrez, 1997; Birkle *et al.*, 1995) consideran que más allá de los 300 metros de profundidad, que hoy en día es captado, existe otra porción del acuífero superficial localizado entre los 400 y 800 metros.

Tabla 2.6 Unidades hidroestratigráficas en el acuífero de la ZMCM			
Unidad	Clasificación Hidroestratigráfica	Litología	Espesor promedio (m)
U1	Unidad superior de baja permeabilidad	Arcilla lacustre.	60
U2	Unidad superior permeable	Aluviones, lavas basálticas y tobas del Cuaternario; así como depósitos de la Fm. Tarango. Además de basaltos del Terciario Superior.	600
U3	Unidad inferior de baja permeabilidad	Arcilla lacustre del Terciario Superior, rocas ígneas ácidas del Mioceno, Rocas ígneas intermedias del Oligoceno y Conglomerados del Eoceno; así como margas, areniscas, lutitas y carbonatos compactos del Cretácico Superior.	1500
U4	Unidad inferior permeable	Carbonatos de la Fm. Morelos.	500

Fuente: SACM-IMTA. (2006 a)

De acuerdo al tipo de roca y el comportamiento piezométrico se pueden establecer 3 subsistemas: i) zona metropolitana, ii) valle de Chalco y iii) ex lago de Texcoco. El primero está conformado por materiales granulares de permeabilidad media a baja, siendo sus zonas de recarga la sierra de las Cruces y los alrededores de Tlalpan. Dentro de este subsistema existen conos de abatimiento (de 10 a 15 m) en la zona de Azcapotzalco y en el área de Tlalapan-Xotepingo-Cuemanco. El segundo, corresponde al valle de Chalco, y su esquema de flujo se ha independizado del resto del valle. En este caso, la recarga se realiza por la infiltración de agua de lluvia que se suscita en las sierras de Santa Catarina, Chichinautzin y Nevada. El material que constituye a este acuífero son basaltos y piroclastos que hacia la planicie alterna con depósitos aluvio-lacustres. En la parte central del valle se tiene un cono de abatimiento de 10 m. El tercer subsistema corresponde al área del ex lago de Texcoco, el cual está relacionado hidráulicamente con el acuífero de la zona metropolitana. Los materiales que lo conforman son de baja permeabilidad, no cuenta con extracciones considerables y el gradiente hidráulico es casi nulo.

El flujo de agua subterránea en medio poroso en el acuífero se realiza en los sedimentos aluviales del Cuaternario, los que se hayan distribuidos en la planicie de la región. Asimismo, en mucho menor proporción, en los sedimentos arcillo-lacustres del Cuaternario, las tobas del

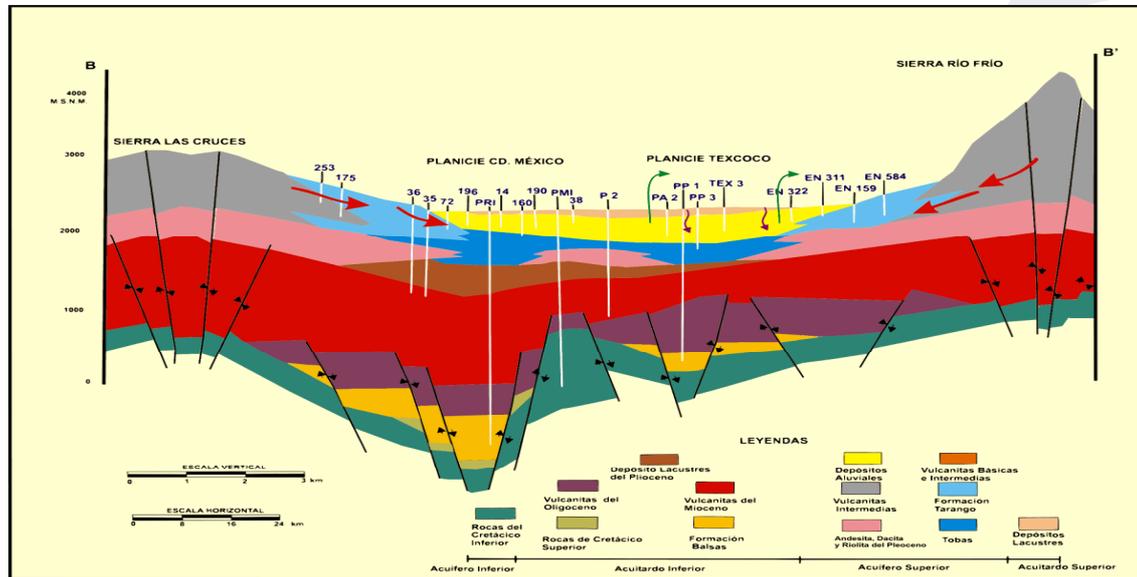
Cuaternario, las arenas de la Formación Tarango, así como en los depósitos del Terciario Inferior Continental (Eoceno – Oligoceno) representados por los conglomerados del Grupo El Morro o Balsas. Condiciones de flujo en un medio fracturado, en los acuíferos emplazados en la ciudad de México se realizan, principalmente, en las rocas ígneas del Terciario-Cuaternario y en las rocas carbonatadas del Cretácico Inferior.

Las áreas de recarga están establecidas hacia las sierras que lo limitan (Guadalupe, Las Cruces, Chichinautzin y Santa Catarina); las áreas de descarga inducida están representadas por la zona de influencia de los pozos, ubicados principalmente en la planicie y entre ambas, se cuenta con las áreas de transferencia, regularmente conformadas por las zonas de piedemonte, mismas que en la actualidad han sido modificadas hidrodinámicamente por el bombeo de los pozos ubicados en ellas.

El flujo subterráneo se genera en las partes altas, sierra de las Cruces, tiene una dirección principal de poniente a oriente. El gradiente del flujo es de aproximadamente 0.02 y se mantiene más o menos uniforme en la porción occidental del valle. Decece a 0.007 en la zona de Azcapotzalco en donde se aprecia un cono de abatimiento que intercepta flujo de la parte oriental. En lo que se refiere a la porción media del Acuífero, zona de Álvaro Obregón, Contreras, Benito Juárez y Coyoacán, la configuración de la elevación del N. E. indica que la carga hidráulica varía de 2355 a 2170 msnm. Al igual que en el caso anterior, el flujo subterráneo se genera en la sierra de las Cruces, tiene una dirección principal de poniente a oriente y alimenta a las partes bajas de la cuenca. El gradiente del flujo varía de aproximadamente 0.022 a 0.028 en las estribaciones de la sierra de las Cruces. Decece a 0.0025 en la zona que se localiza al poniente del cerro de la Estrella, en donde se delinea un cono de abatimiento que intercepta flujo subterráneo de la parte oriental, proveniente de la sierra Sta. Catarina. En la parte sur de la cuenca, zona de Xochimilco y Tláhuac, la configuración de la elevación del N. E. muestra que la carga hidráulica varía de 2225 a 2170 msnm y que el flujo subterráneo se genera en la sierra de Chichinautzin, tiene una dirección principal de sur a norte y cambia a NW a medida que se acerca al cerro de la Estrella. El gradiente del flujo varía de 0.014 a 0.025 en las estribaciones de La Sierra y decece significativamente a 0.0025 en el área aledaña al cono de abatimiento que se localiza al poniente del cerro de la Estrella. La porción norte del acuífero recibe recarga proveniente de la sierra de Guadalupe, la carga hidráulica varía de 2245 msnm en las estribaciones de la sierra a 2180 msnm en las partes bajas. La dirección del flujo es al SW para la parte de Azcapotzalco y al sur para la zona de Gustavo A. Madero. La sierra Santa Catarina se manifiesta como área

límite de recarga para los acuíferos Ciudad de México al poniente, Chalco-Amecameca al sureste y Texcoco al norte noreste (Figura 2.6.1).

Figura 2.6.1 Esquematación del flujo subterránea del acuífero de la ZMCM .



Fuente: Vázquez y Jaimes, 1989

3. METODOLOGIA

3.1 Datos históricos

Para poder evaluar el impacto del cambio climático es necesario revisar la información histórica existente para tener una estimación de los rangos en que el clima de de la ZMCM ha variado en las últimas décadas. 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.

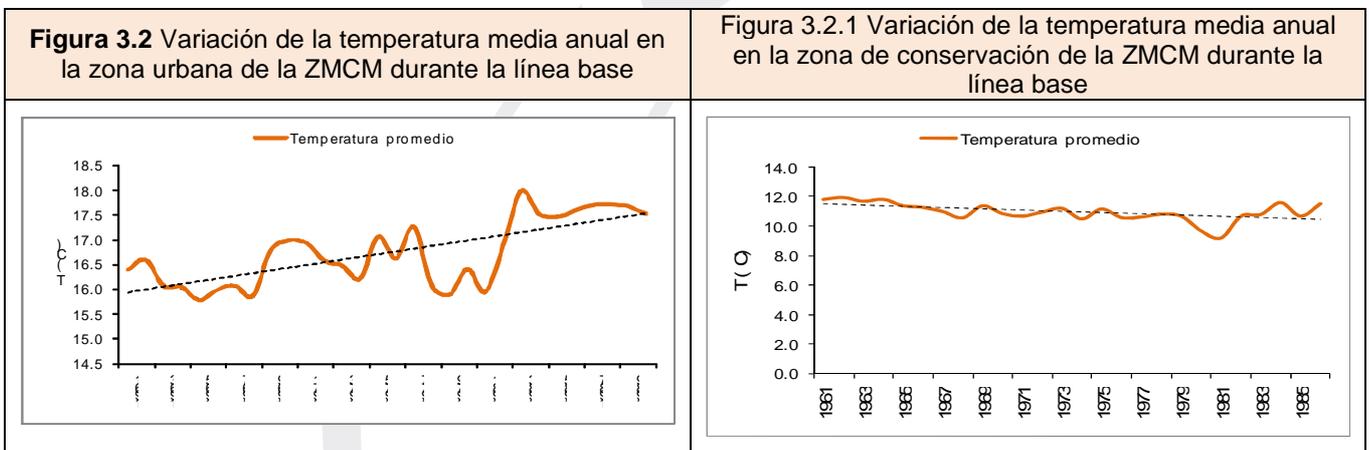
La organización Mundial Meteorológica recomienda el uso del periodo 1961-1990 como periodo estándar contra el cual comparar los efectos del cambio climático (WMO, 2002). Sin embargo, dado que la mayoría de las estaciones meteorológicas incluidas en la base de datos Eric III

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 ZMVM.

3.2 Tendencias de temperatura en la ZMCM

En la ZMCM la temperatura media anual varía entre 12° y 18°C, con valores máximos en abril y mayo de hasta 32.5°C y mínimos durante diciembre y enero de hasta -1°C. En el centro y norte se presentan las temperaturas más altas. Las temperaturas bajas se presentan en las zonas montañosas como la sierra del Ajusco y Sierra Nevada.

El análisis de las tendencias de temperaturas mostró un marcado incremento de la temperatura media anual para la zona urbana de la ZMCM (Figura 3.2). Este incremento en la temperatura se debe principalmente al incremento de la temperatura máxima. En contraste, en la zona de conservación no se mostró cambio durante el periodo de la línea base (Figura 3.2.1). Es muy posible que este incremento en la temperatura tenga mucho de su origen en el fenómeno conocido como ‘isla de calor urbano’, el cual es reflejo de la totalidad de los cambios que trae consigo la urbanización.



3.3 Cálculo de precipitación de la ZMCM

De los métodos que existen para cuantificar el volumen de precipitación, los más conocidos son: el método de las isoyetas, el de los polígonos de Thiessen y de los promedios. El método de las isoyetas tiene la desventaja de que, se tienen que calcular las isoyetas para cada evento o para la precipitación acumulada, de acuerdo con el intervalo de tiempo de interés. El método consiste, básicamente, en obtener curvas con igual lámina de precipitación, para luego interpolar curvas intermedias y obtener las áreas entre esas dos curvas a las que se les asocia

la lámina de precipitación de la isoyeta que envuelven. El método de los polígonos de Thiessen consiste en obtener el área de influencia de cada una de las estaciones climatológicas. Los polígonos de Thiessen son uno de los métodos de interpolación más simples. Se crean al unir puntos entre sí, trazando mediatrices de los segmento de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. Al dividir el área parcial del polígono, entre el área total de la cuenca, se obtiene el factor de ponderación, que multiplicado por la lámina de lluvia registrada en la estación correspondiente, permite el cálculo de aportación de cada estación climatológica. El método de la media aritmética es el método más sencillo y es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre el área de observación deseada.

Para fines de este estudio se realizó un cálculo para la zona urbana y otro para la zona de conservación. Los valores más altos se presentaron en la zona montañosa, resultando ser más del doble que en el resto de la ciudad, lo que fue causado esencialmente por el efecto orográfico. Por otro lado, en el norte y oriente fue más escasa.

Durante el periodo de estudio en la zona urbana de la ZMCM se observó un decremento en la precipitación media anual (Figura 3.3), mientras que en la zona de conservación la tendencia fue de ligero incremento (Figura 3.3.1). Durante este periodo de la línea base, los eventos de precipitación con una intensidad mayor a 30 mm en 24 horas son los más frecuentes, registrándose casi 180 eventos en los 29 años de análisis. Los eventos con una intensidad mayor a 70 mm en 24 horas fueron muy raros (Figura 3.3.2).

3.4 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 respetos 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.

Figura 3.3 Variación de la precipitación media anual en la zona urbana de la ZMCM durante la línea base

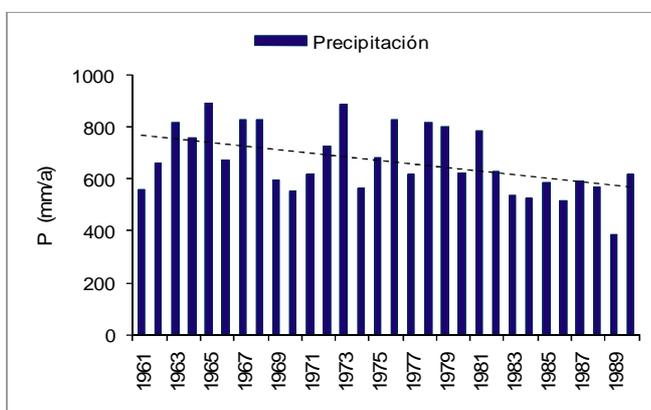


Figura 3.3.1 Variación de la precipitación media anual en la zona de conservación de la ZMCM durante la línea base

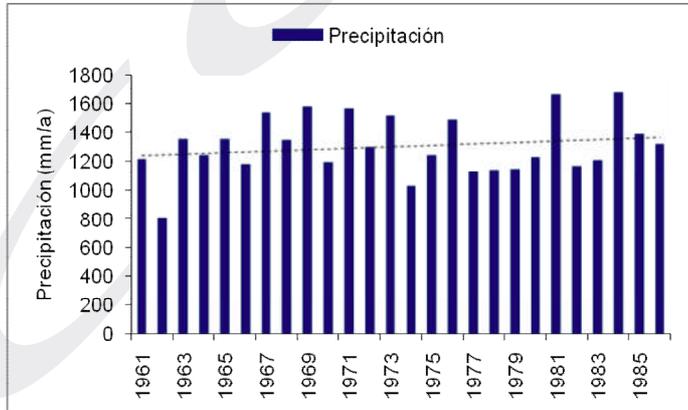
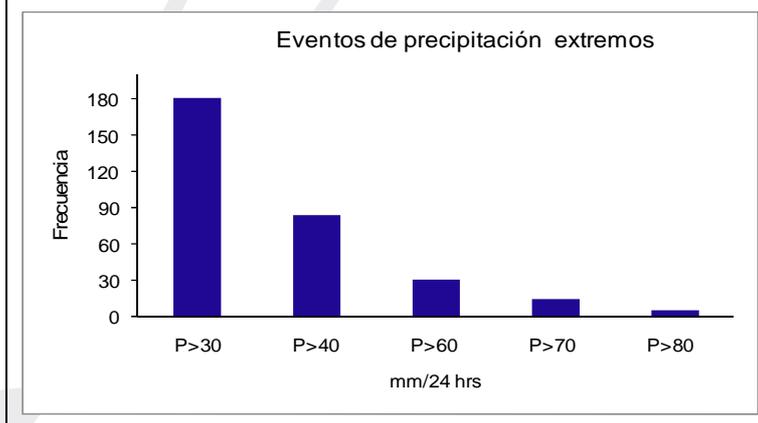


Figura 3.3.2 Frecuencia de eventos extremos de precipitación en la ZMCM durante la línea base



Para estimar la evapotranspiración potencial un gran número de métodos han sido propuestos: Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998, Hess, 1996), Priestley and Taylor (1972), Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1982), Thornthwaite (Thornthwaite & Mather, 1955), Penman-Grindley (1969), Mishra and Singh (2003), etc. La ecuación de Penman-Monteith es considerada la más completa y la 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 ZMCM.

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

$$ET = 0.0023(T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} Ra$$

Donde, ET es evapotranspiración (mm day^{-1}), T_{mean} temperatura promedio diaria ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$), T_{min} temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$) y Ra radiación extraterrestre (mm day^{-1}).

3.5 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 3.5 muestra la capacidad de infiltración de los diferentes suelos del la ZMCM de acuerdo a Ortiz y Ortiz (1990).

Tabla 3.5 Capacidad de infiltración según el tipo de suelo		
Tipo de Suelo	INFILTRACION	
	Capacidad (lámina de agua / hora)	
Andosol	Media	1.75 a 2.5 cm
Cambisol	Lenta	0.25 a 1.75 cm
Feozem	Media	1.75 a 2.5 cm
Fluvisol	Rápida	> 2.5 cm
Gleysol	Muy lenta	< 0.25 cm
Histosol	Media	1.75 a 2.5 cm
Litosol	Media	1.75 a 2.5 cm
Luvisol	Lenta	0.25 a 1.75 cm
Planosol	Lenta	0.25 a 1.75 cm
Regosol	Media	1.75 a 2.5 cm
Solonchak	Muy lenta	< 0.25 cm
Vertisol	Muy lenta	< 0.25 cm
Fuente: Ortiz y Ortiz, 1990		

Dos aspectos muy importantes que influyen en el proceso de infiltración son la temperatura y la urbanización, ya que el incremento de la primera origina un aumento del proceso de evapotranspiración, mientras que la segunda, reduce sustancialmente las zonas permeables

superficiales. En la tabla 3.5.1 se da la variación de la superficie urbana para cada una de las delegaciones y municipios de la zona en estudio, en ella se aprecia que para el caso particular de la Delegación Magdalena Contreras, la mancha urbana duplicó y triplicó en los años 90 (28.4%) y 2000 (45.7%) la superficie existente en los años 80 (14.3%), respectivamente.

3.7 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. Esta 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 $5.20 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ provenientes de las redes de abastecimiento.

Delegación/Municipio	1970-79	1980-89	1990-99	2000-01
Alvaro Obregón	48.30%	54.90%	61.40%	66.00%
Azcapotzalco	82.80%	89.50%	96.30%	100.00%
Benito Juárez	91.20%	93.60%	97.70%	100.00%
Coyoacán	86.30%	98.10%	99.30%	100.00%
Cuajimalpa de Morelos	5.20%	6.80%	13.30%	21.80%
Cuauhtémoc	90.60%	93.50%	97.70%	100.00%
Gustavo A. Madero	75.70%	82.10%	84.30%	86.50%
Iztacalco	92.20%	94.90%	98.20%	100.00%
Iztapalapa	49.00%	68.20%	83.60%	95.60%
La Magdalena Contreras	10.40%	14.30%	28.40%	45.70%
Miguel Hidalgo	84.70%	89.60%	96.30%	100.00%
Milpa Alta	1.50%	1.90%	3.90%	6.60%
Tlahuac	18.40%	24.20%	30.50%	35.00%
Tlalpan	11.00%	14.30%	15.40%	16.20%
Venustiano Carranza	86.60%	91.80%	97.10%	100.00%
Xochimilco	15.40%	18.70%	19.50%	20.10%
Atenco	1.50%	4.10%	17.30%	35.50%
Atizapán de Zaragoza	15.50%	27.80%	42.40%	54.70%
Ecatepec de Morelos	25.10%	39.00%	51.10%	56.60%
Huixquilucan	2.40%	4.60%	7.70%	10.60%
Naucalpan de Juárez	28.40%	37.00%	44.20%	52.60%
Nezahualcoyotl	79.60%	81.70%	83.40%	84.20%
La Paz	25.50%	35.00%	42.30%	45.60%
Tlalnepantla de Baz	52.70%	64.60%	70.50%	73.70%
Valle de Chalco Solidaridad	42.20%	45.20%	47.50%	48.50%

Fuente: INEGI 1981, 1991, 2001

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 and 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, etc. El método convencional de balance de humedad del suelo de Penman-Grindley (Penman, 1948, 1950; Gindley, 1967, 1969, Howard and Lloyd, 1979) considera la recarga como una función de la precipitación efectiva. En este estudio, una versión modificada de este método (Herrera-Pantoja y Hiscock, 2008) fue utilizada para calcular la recarga potencial o la precipitación efectiva (Hxr). En este método, 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). 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. 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 AWC valor es alcanzado, y después del cual no es posible que AE se produzca.

Los parámetros de AWC y FAW fueron ajustados para las diferentes zonas y los resultados ajustados contra los resultados presentados en el estudio SACM-IMTA (2006 a).

La Tabla 3.7 muestra los promedios anuales calculados tanto para la zona urbana como para el área de conservación, los cuales son comparables a los reportados en los estudios reportados en la literatura (SACM-IMTA, 2006a; 2006b) por lo que la metodología se considera apropiada para poder utilizarla para desarrollar las simulaciones futuras de cambio climático.

Tabla 3.7. Series de tiempo anuales de temperatura máxima (T max) temperatura mínima (T min), temperatura media (Tme), precipitación (P), evapotranspiración real (AE) y precipitación efectiva (Hxr)						
Zona Urbana						
Fecha	T max	T min	T me	P	AE	Hxr
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm/ a)	(mm/ a)	(mm/ a)

1961	24.0	8.8	16.4	561	379	40
1962	24.6	8.6	16.6	658	378	60
1963	23.7	8.4	16.1	815	435	128
1964	23.8	8.3	16.0	756	442	91
1965	23.6	8.0	15.8	894	417	186
1966	23.4	8.5	16.0	671	426	87
1967	23.8	8.4	16.1	827	458	159
1968	23.5	8.2	15.9	829	450	161
1969	24.7	8.9	16.8	595	402	97
1970	24.8	9.2	17.0	552	380	7
1971	24.5	9.4	16.9	615	408	25
1972	24.5	8.7	16.6	722	438	62
1973	24.5	8.4	16.5	884	426	297
1974	23.8	8.6	16.2	566	375	42
1975	24.2	9.9	17.1	681	419	13
1976	23.6	9.7	16.6	827	420	186
1977	24.4	10.1	17.3	616	386	22
1978	23.3	8.8	16.1	815	410	202
1979	23.6	8.2	15.9	801	406	213
1980	24.0	8.8	16.4	621	406	75
1981	23.2	8.7	15.9	784	404	188
1982	24.9	8.8	16.9	627	392	67
1983	26.3	9.6	18.0	538	413	7
1984	25.4	9.6	17.5	526	376	40
1985	25.9	9.0	17.5	583	441	0
1986	26.0	9.1	17.6	517	406	2
1987	26.3	9.1	17.7	592	388	16
1988	26.3	9.1	17.7	568	423	0
1989	26.4	8.9	17.7	384	349	0
1990	25.9	9.1	17.5	618	446	0
	24.6	8.9	16.7	668	410	82
Zona de Conservación						
Fecha	T max	T min	T me	P	AE	Hxr
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm/ a)	(mm/ a)	(mm/ a)
1961	18.8	4.9	11.8	1213	447	501
1962	19.3	4.7	12.0	802	364	174
1963	18.5	4.9	11.7	1350	522	583
1964	18.5	5.1	11.8	1242	513	446
1965	18.3	4.5	11.4	1352	484	556
1966	18.2	4.4	11.3	1175	461	366
1967	17.7	4.3	11.0	1535	511	656
1968	17.5	3.7	10.6	1345	497	495
1969	18.6	4.2	11.4	1577	451	943
1970	17.9	3.8	10.9	1192	472	518

1971	17.8	3.6	10.7	1567	548	788
1972	17.4	4.5	11.0	1294	501	513
1973	17.8	4.6	11.2	1517	499	708
1974	17.3	3.7	10.5	1024	446	341
1975	17.7	4.7	11.2	1240	432	565
1976	16.9	4.3	10.6	1492	452	779
1977	16.9	4.3	10.6	1119	415	373
1978	16.8	4.9	10.8	1135	393	423
1979	17.1	4.3	10.7	1145	376	497
1980	15.3	4.1	9.7	1225	411	472
1981	14.5	3.9	9.2	1662	460	895
1982	16.9	4.5	10.7	1163	428	460
1983	16.9	4.7	10.8	1205	414	508
1984	17.6	5.6	11.6	1676	429	1024
1985	16.8	4.6	10.7	1386	394	675
1986	17.9	5.1	11.5	1314	426	652
	17.5	4.5	11.0	1306	452	574

4. SISTEMA DE ABASTO DE AGUA DE LA ZMCM.

4.1 Resiliencia de la ZMCM en el tema de abasto de agua.

Para el estudio de los impactos del cambio climático es fundamental considerar el tema de resiliencia. La resiliencia se define como la capacidad de una comunidad o sociedad para adaptarse cuando está expuesta a un peligro. Lo hace resistiendo o cambiando de manera que alcance o mantenga un nivel aceptable de funcionamiento y estructura. Una sociedad resiliente puede enfrentar shocks y reconstruirse cuando sea necesario. La resiliencia en temas sociales supone la capacidad humana para anticipar y planear hacia el futuro. Una ciudad resiliente es aquella que es capaz de sostenerse así misma a través de sus sistemas al hacer frente a asuntos y o eventos que la amenazan, dañan o tratar de destruirla (WB 2008, ver Pág. 32).

La resiliencia en las ciudades puede verse limitada por una diversidad de factores, entre ellos el crecimiento desordenado, el incremento de la contaminación, instituciones inflexibles que no responden adecuadamente a las necesidades de la sociedad, subsidios perversos que incentiven que no internaliza los costos ambientales, etc.

Los impactos del cambio climático pueden reducir significativamente la resiliencia de las ciudades o su capacidad de responder a otros eventos extremos. Sin embargo, para evaluar en qué medida las ciudades podrán responder al cambio climático, debemos considerar que muchos de los impactos se relacionan directamente con el manejo de riesgos. Antes de

analizar los impactos del cambio climático es fundamental considerar la vulnerabilidad y riesgo actuales debido a prácticas insustentables en el manejo del servicio de abasto de agua.

El ZMVM es una ciudad con un nivel bajo de resiliencia. En esta sección se desarrollan a continuación las áreas que representan los principales problemas de sustentabilidad, y que generan un peligro latente de deterioro del servicio que puede poner en riesgo el acceso al agua aún sin considerar los impactos del cambio climático.

Para establecer una línea base que permita evaluar los riesgos del cambio climático, primero es relevante conocer las condiciones actuales en que se encuentran el sistema de abasto de agua del DF. Una vez definida esta línea base, en la siguiente sección se pronosticará el nivel de riesgo derivado de los impactos del cambio climático; es decir la “probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (perjuicios a los medios de vida o a la actividad económica), como resultado de interacciones entre peligros naturales, (en este caso, el cambio climático), los ocasionados por el ser humano, y condiciones de vulnerabilidad” (WB 2008, p. 279). En otras palabras, los peligros ocasionados por el cambio climático deben sumarse a los que actualmente enfrenta el Distrito Federal por políticas insustentables en el manejo del servicio.

4.2 Vulnerabilidad relacionada con la disponibilidad de agua

La ZMVM consume 61 metros cúbicos por segundo (m^3/s) de agua. El 70% del agua se extrae de fuentes locales, principalmente el acuífero y el resto proviene de fuentes externas. Del total de agua, el DF consume $32 m^3/s$ y el Edomex $29 m^3/s$ (ver Tabla 4.2). Las cifras de hace una década estimaban que el déficit de agua era cercano a $10 m^3/s$, de los cuales $3 m^3/s$ correspondían al DF y $7 m^3/s$ al Edomex (JAC 1995).

Tabla 4.2 Volumen de agua disponible para la ZMVM			
Distrito Federal	Fuentes Internas	$20 m^3/s$	Déficit $3 m^3/s$
	Fuentes externas	$\frac{12 m^3/s}{32 m^3/s}$	
Estado de México	Fuentes Internas	$23 m^3$	$4.2 - 7 m^3/s$
	Fuentes externas	$\frac{6 m^3}{29 m^3}$	
Zona Metropolitana del Valle de México		$61 m^3$	

Fuente: SACM 2008, CONAPO 2006, CONAGUA 2005, INEGI 2005

Actualmente, el SACM recibe agua de fuentes propias y federales. El DF consumió un total de 1,012 M-m3 de agua en 2007, de los cuales 628 millones (62%) fueron de fuentes propias y 384 millones (38%) de fuentes federales (Tabla 4.2.1).

En términos de ubicación de las fuentes, en la Figura (4.2) se muestra el volumen de agua que generan diversas fuentes. Como se puede observar, los mayores volúmenes ingresan por el sistema Cutzamala, alrededor de 300 millones de m3, es decir el 27% de total del agua que recibe el DF. Le sigue en importancia las fuentes locales del sector sur, con aproximadamente 240 millones de m3 (24% del total). En un nivel significativamente menor en su contribución de recurso se encuentra el sistema Lerma, con alrededor de 150 millones de m3 (16% del total).¹ Los sistemas que tienen una menor contribución son las fuentes locales del sector norte (8%) y oriente y centro (7% cada uno) y de los pozos federales (11%).

Tabla 4.2.1 Volumen anual de agua entregada de fuentes locales y federales			
Año	Fuentes locales	Fuentes Federales	Gran Total
1990	604,200,384	449,756,906	1,053,957,290
1991	607,814,756	421,679,684	1,029,494,440
1992	631,173,796	411,014,270	1,042,188,066
1993	680,800,551	403,333,452	1,084,134,003
1994	685,232,611	452,593,567	1,137,826,178
1995	677,136,137	416,985,080	1,094,121,217
1996	685,358,235	410,443,386	1,095,801,621
1997	683,714,341	411,824,150	1,095,538,491
1998	668,701,558	404,081,506	1,072,783,064
1999	680,152,868	406,147,158	1,086,300,026
2000	701,000,677	392,366,352	1,093,367,029
2001	689,579,809	389,269,002	1,078,848,811
2002	672,993,910	387,628,374	1,060,622,284
2003	659,204,156	396,845,320	1,056,049,476
2004	643,416,790	390,712,352	1,034,129,142
2005	636,300,331	391,386,712	1,027,687,043
2006	624,391,199	383,317,213	1,007,708,412
2007	628,565,148	384,313,572	1,012,878,720

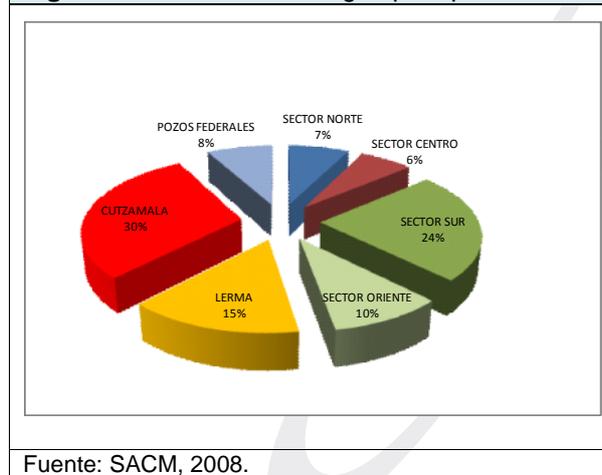
Fuente: SACM 2008 a

La ubicación de las fuentes influye en la cantidad de agua que se distribuye en diferentes

¹ Cabe mencionar que a partir de 1995 las autoridades federales transfirieron a las locales la administración de varios pozos, lo cual se refleja en un aumento sustancial de las fuentes locales del sector sur y la reducción de las fuentes de pozos federales en ese año.

zonas del DF. La zona poniente por donde ingresa el sistema Cutzamala y la zona sur aparentemente serían las regiones con mayor acceso al recurso y menor vulnerabilidad; mientras que el centro, norte y oriente de la ciudad cuentan con fuentes más limitadas. En este sentido, se puede concluir que las características geográficas derivadas de la ubicación de las fuentes de agua hacen más vulnerables a las colonias que se encuentran en el oriente, centro y norte de la ciudad ya que están expuestas a la amenaza de fuentes relativamente escasas del recurso².

Figura 4.2 Volúmenes de agua por tipo de fuente



Sin embargo, otra forma de evaluar estas cifras es el nivel de vulnerabilidad de la ciudad en términos de la dependencia de fuentes externas, que representan el 38% del total de agua consumida en el DF. En este sentido, la falta de control por parte de las autoridades locales respecto a las fuentes federales puede hacer que cualquier suspensión temporal o permanente ponga en riesgo el acceso de agua para una parte importante de la población, sobre todo la que habita en la zona poniente. De hecho, el sistema Cutzamala ya mostró sus primeras limitaciones al haber reducido su nivel de almacenamiento al 52 por ciento de su capacidad en 2009, cuando lo normal en época de estiaje es 70 por ciento, lo cual llevó a implementar recortes en el suministro en diversos momentos con la afectación de cerca de 400 colonias.

4.3 Vulnerabilidad del acuífero

El tema de la sobreexplotación del acuífero ha sido mencionado en múltiples documentos,

² El abasto de agua se distribuye a través de cinco sectores geográficos. El sistema norte incluye las delegaciones Azcapotzalco y Gustavo A. Madero; el sistema sur incluye Milpa Alta, Tlalpan, Xochimilco y una porción de Tlahuac, Coyoacán e Iztapalapa; el sistema poniente incluye Cuajimalpa, Magdalena Contreras, la mayor parte de Álvaro Obregón y parte de Miguel Hidalgo; el sistema oriente incluye la mayor parte de Iztapalapa, parte de Tlahuac, Venustiano Carranza; el sistema central incluye Benito Juárez, Cuauhtemoc, una porción de Coyoacán, Álvaro Obregón, Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza y Miguel Hidalgo (SACM-IMTA 2006 a).

tanto oficiales como de investigación³. La sobreexplotación del acuífero local incrementa el riesgo de que la población en el DF cuente con una menor cantidad de este recurso en el futuro. Documentos oficiales que han presentado una situación de alto riesgo, aunque con diferentes magnitudes. Por un lado, el DOF publicó un estudio de la disponibilidad de agua del acuífero de la ZMCM en 2003. En el estudio se concluyó que el acuífero de la ZMCM registraba un nivel de sobreexplotación de 200% (SEMARNAT 2003).

A partir de esta información oficial, el SACM elaboró otros estudios que arrojaron resultados diferentes a los publicados en el DOF. En el Estudio para Obtener la Disponibilidad del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se concluyó que “la disponibilidad del acuífero para el año 2003 es nula, pero con un déficit de -345.8 millones de m³, lo que representa una reducción de cerca del 64% del publicado en el DOF” (SACM-IMTA 2006^a, p. 277). Se comenta que las discrepancias entre ambos estudios podrían deberse a errores en los volúmenes registrados en el REPDA.

Los resultados del balance del acuífero para el año 2005 se muestran en la Tabla 4.3 (SACM-IMTA 2006 b, p284). Estas cifras indican que en el año 2005 el acuífero principal cedió cerca de 116.5 millones de metros cúbicos de su almacenamiento, lo que representa una sobreexplotación del 34 % del total de las entradas al acuífero (SACM-IMTA 2006b).

Tabla 4.3 Balance del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México 2005			
Balance 2005		m³/s	m³/a
Entradas	Recarga natural	5.41	170,505,691
	Flujo lateral	4.40	138,736,325
	Arcilla	1.44	45,436,690
	Acuitardo inferior	0.0004	13,490
Total de Entradas		11.25	354,692,196
Salidas	Pozos	14.94	471,155,000
Total de Salidas		14.94	471,155,000
Cambio almacenamiento		-3.69	-116,462,804
Fuente: (SACM-IMTA 2006b)			

En términos de las consecuencias por la sobreexplotación del acuífero se menciona que la contaminación el zonas debido a que el abatimiento acumulado en los niveles de agua ha producido durante el tiempo en que se ha llevado a cabo la extracción de agua subterránea, ha ocasionado salinización del recurso, debido a la inversión del flujo horizontal en algunas zonas del acuífero, particularmente en la región oriental de Iztapalapa y Texcoco (Figura 4.2). Además

³ SACM 2004. Ver también Ortega-Guerrero et al. 1993; Durazo 1996; Sánchez-Díaz and Gutierrez-Ojeda 1997; Warren and Rudolph 1997; Birkle et al. 1998; González-Moran et al. 1999; Esteller and Díaz-Delgado 2002.

de la afectación directa, se advierte que la salinización del agua subterránea se puede propagar a otras zonas, si las condiciones actuales se mantienen en el largo plazo. Las zona norte se encuentra en riesgo, sobre todo en las delegaciones de Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza e Iztacalco, por ser las más cercanas (SACM-IMTA 2006 a).

Sin embargo, el problema traspasa la dimensión local, pues a nivel regional, el acuífero de la Ciudad de México se relaciona con los acuíferos de Texcoco y Chalco-Amecameca, que en su conjunto forman un sistema con una sobreexplotación generalizada (Tabla 4.3.1). La extracción por bombeo en el subsistema Acuífero de la Ciudad de México es de 14.13 m³/seg., en Texcoco de 5.48 m³/seg. y para Chalco-Amecameca de 5.72 m³/seg. El cambio de almacenamiento determinado para el Acuífero de la Ciudad de México fue de -10.852 millones m³/año que equivale a -0.344 m³/seg. Para el de Texcoco se estimó como de -15.843 millones m³/año que equivale a -0.502 m³/seg. En el Acuífero de Chalco-Amecameca el cambio de almacenamiento calculado fue de -5.671 millones m³/año, lo cual equivale a un valor de -0.180 m³/seg. De esta manera, el subsistema acuífero de la Ciudad de México se encuentra sobreexplotado en un 11%, el área de Texcoco en 17.8%, mientras que el Valle de Chalco en 9.5% (SACM-IMTA 2006c, p. 64).

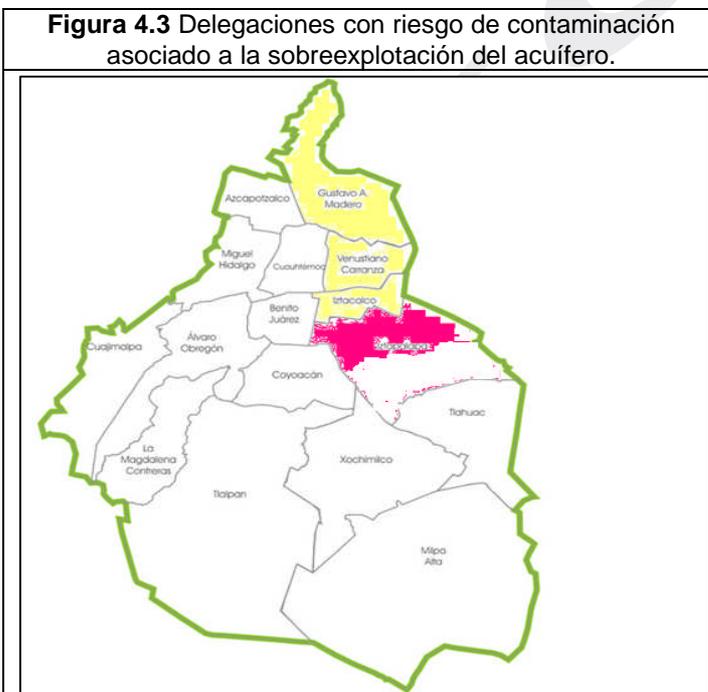


Tabla 4.3.1 Indicadores para los acuíferos de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca

Indicador	Acuífero de la Ciudad de México	Texcoco	Chalco-Amecameca
Extracción por bombeo	14.13 m ³ /s	5.48 m ³ /s	5.72 m ³ /seg
Cambio de	-10.852 Mm ³ /año (-	-15.843 Mm ³ /año (-	-5.671 Mm ³ /año

almacenamiento	0.344 m3/s)	0.502 m3/s)	(-0.180 m3/s)
Sobreexplotación	11%	17.8%	9.5%
Fuente: (SACM-IMTA 2006c, p. 64)			

El hecho de que los acuíferos del Estado de México presenten niveles altos de sobreexplotación, particularmente el de Texcoco, aumenta el riesgo de competencia del recurso proveniente de fuentes federales. A esto se debe sumar el crecimiento acelerado de la población del Estado de México, en donde los 10 municipios conurbados limítrofes al Distrito Federal crecen al 1.8% y los 24 conurbados no limítrofes lo hacen al 3.8% cada año (INEGI 2000).

En conjunto existe un riesgo alto derivado de la sobreexplotación del acuífero y la alta dependencia de fuentes externas que limitan el nivel de resiliencia de la ciudad frente a otro tipo de impactos tanto sociales como naturales, particularmente al cambio climático.

4.4 Sectores vulnerables de la población

Los impactos del cambio climático aumentan la vulnerabilidad de la población. La vulnerabilidad hace referencia a las “características físicas de una comunidad, con la estructura o área geográfica, que hace probable que sea afectada o no por el impacto de un peligro determinado, en función de su naturaleza, construcción y proximidad a un terreno peligroso o a una zona propensa a desastres. También designa la combinación de factores sociales y económicos que determinan hasta qué punto la vida y los medios de subsistencia de alguien están expuesto a pérdidas o daños debido a una amenaza concreta identificable o a sucesos naturales o sociales” (WB 2008, p. 279).

La literatura menciona que los impactos del cambio climático afectan a todos los habitantes de las ciudades, pero de manera desproporcionada a los pobres debido a las condiciones de sus viviendas y la provisión inadecuada de servicios básicos como el agua, drenaje, salud y recolección de basura. De esta forma, los pobres ven en riesgo sus vidas, pertenencias y prosperidad futura debido al aumento en el riesgo de tormentas, inundaciones, derrumbes y temperatura extrema. También son más propensos a obtener una distribución desigual de recursos escasos, en este caso, el agua, aumentando así su vulnerabilidad. Frente a eventos extremos, su recuperación es particularmente difícil ya que no tienen recursos o redes de seguridad adecuadas, y las políticas públicas frecuentemente priorizan la reconstrucción en otras partes de la ciudad (WB 2008).

En términos de la provisión del servicio de abasto de agua potable, existe el reconocimiento de

la ONU sobre la inequidad en su distribución, la cual afecta frecuentemente a las zonas periféricas de las ciudades. En algunos casos estas áreas son asentamientos informales, en donde la posibilidad de instalar el sistema de abasto se ve restringida por factores legales. Sin embargo, la inequidad no se explica exclusivamente por factores geográficos, pues varios estudios han documentado cómo los hogares de bajos ingresos están desproporcionadamente impactados por dificultades relacionadas al agua (Johnstone 1997; Zerah 1998; Wegelin-Schuringa 2001, Soto 2007). Dentro de la población de bajos ingresos, se ha reconocido que las mujeres y niños son los más afectados, porque frecuentemente les corresponde transportar agua y adaptar su rutina para asegurar las necesidades de abasto del hogar.

Por este motivo, la vulnerabilidad al cambio climático se puede exacerbar en zonas con pobreza y acceso desigual a recursos. “La vulnerabilidad se considera como una de las características principales de la pobreza y se define como el grado en el que las personas son vulnerables a los impactos perjudiciales de factores que perturban sus vidas y que están fuera de su control inmediato. Esto incluye las conmociones (cambios bruscos) y tendencias (por ejemplo, degradación gradual del medio ambiente). El reconocimiento de la vulnerabilidad requiere identificar a personas o comunidades vulnerables, que pueden soportar una carga negativa desproporcionada como resultado del desarrollo, incluido el de recursos hídricos” (ONU 2003, p. 7).

Como se mencionó antes, los impactos del cambio climático aumentan la vulnerabilidad de la población en general, pero particularmente la de personas con acceso desigual al servicio de agua. Para identificar a las comunidades vulnerables se presenta un análisis sobre las colonias que reciben el servicio por tandeo en el Distrito Federal.

Diez delegaciones han registrado colonias con tandeos: *Álvaro Obregón, Coyoacán, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpán, Xochimilco e Iztapalapa*. Como se puede observar en la (Tabla 4.4), 241 colonias se ven afectadas por el tandeo del servicio, en estas colonias habitan 1, 430,687 habitantes que en promedio reciben menos de 2 salarios mínimos. En color verde se destacan las delegaciones que cuentan con suelo de conservación; es irónico que muchos de los habitantes con problemas de escasez de agua sean justamente los que habitan en zonas donde se recarga el acuífero (Soto 2008).

Otro elemento del acceso al servicio se relaciona con la calidad del agua. Funcionarios del SACM señalaron a varias colonias en la delegación de Iztapalapa donde, además de tandeos,

existen problemas de calidad del agua. Los problemas son exceso de fierro y manganeso, por lo que el agua presenta tonalidades amarillas y a veces con olor desagradable. Las colonias que se identificaron son: Citlali, Ixtlahuacan, Lomas de la Estancia, Lomas de Zaragoza, la Polvorilla, Ampliación Emiliano Zapata, Campestre Potrero, Huitzico, La Cañada, La Poblana y Las Cruces.

Tabla 4.4. Colonias afectadas por tandeos en el Distrito Federal.

Delegación	Total de colonias que presentan tandeos*	Población total en la colonias afectadas por tandeos	% de población que recibe menos de 2 SM
Álvaro Obregón	11	70,579	55
Coyoacán	6	173,023	52
Cuajimalpa	16	50,437	54
Gustavo A. Madero	10	61,987	60
Magdalena Contreras	29	132,532	55
Iztapalapa	59	585,564	63
Milpa Alta	7	26,817	63
Tlalpán	82	275,591	52
Xochimilco	21	54,157	59
Totales	241	1,430,687	58

* El número de colonias que no están registradas por el Inegi son: con **una** colonia Coyoacán, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero y Milpa Alta. Magdalena Contreras con **dos** colonias. Xochimilco con **cinco** colonias. Iztapalapa con **dieciocho** colonias y Tlalpán con **treinta** colonias.

Fuente: Soto, 2008

4.5 Resumen de áreas de riesgo

El análisis agregado de la información antes mencionada permite diversas áreas de riesgo: 240 colonias actualmente son vulnerables por el acceso desigual al servicio de agua; un número significativo de habitantes en las delegaciones del poniente son vulnerables por la dependencia de fuentes externas y, finalmente, otras cuatro delegaciones del oriente se encuentran en riesgo de deterioro de la calidad del agua por las prácticas insustentables de explotación del acuífero (Ver Figura 4.5). Todo esto confirma el bajo nivel de resiliencia de la ciudad frente a los riesgos derivados del cambio climático.

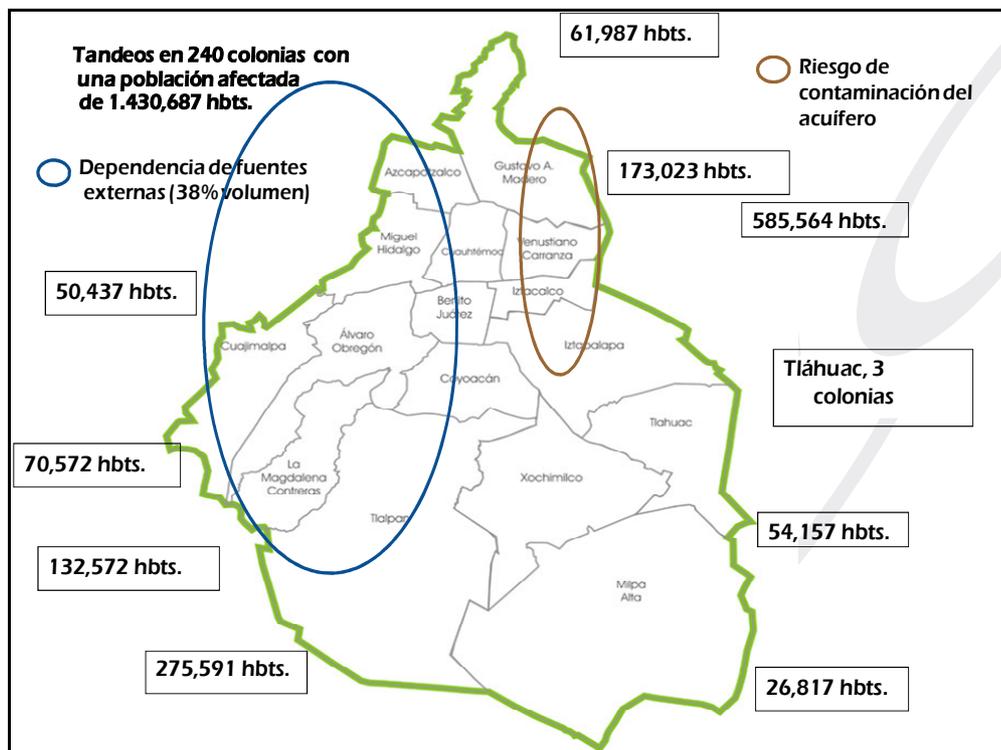
5. FUTUROS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO

5.1 Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero

Dado que no es posible predecir con gran precisión el clima futuro, es necesario construir

escenarios de cambio. Uno de los primeros pasos en este proceso es valorar las futuras emisiones de los gei. Para este efecto, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) comisionó el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES) para evaluar cómo las emisiones de gases de efecto invernadero pueden cambiar en el futuro.

Figura 4.5 Resumen de áreas de riesgo



Fuente SACM. 2008 a. Volumen anual de agua entregada de fuentes locales y federales, Dirección de sectorización y automatización, informe interno del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, INEGI 2000

El término IEEE designa los escenarios descritos en el Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IPCC, 2001). Esta serie de escenarios basan las proyecciones de emisiones futuras en supuestos básicos respecto de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica. Los escenarios IEEE están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 B2) que exploran vías de desarrollo alternativas.

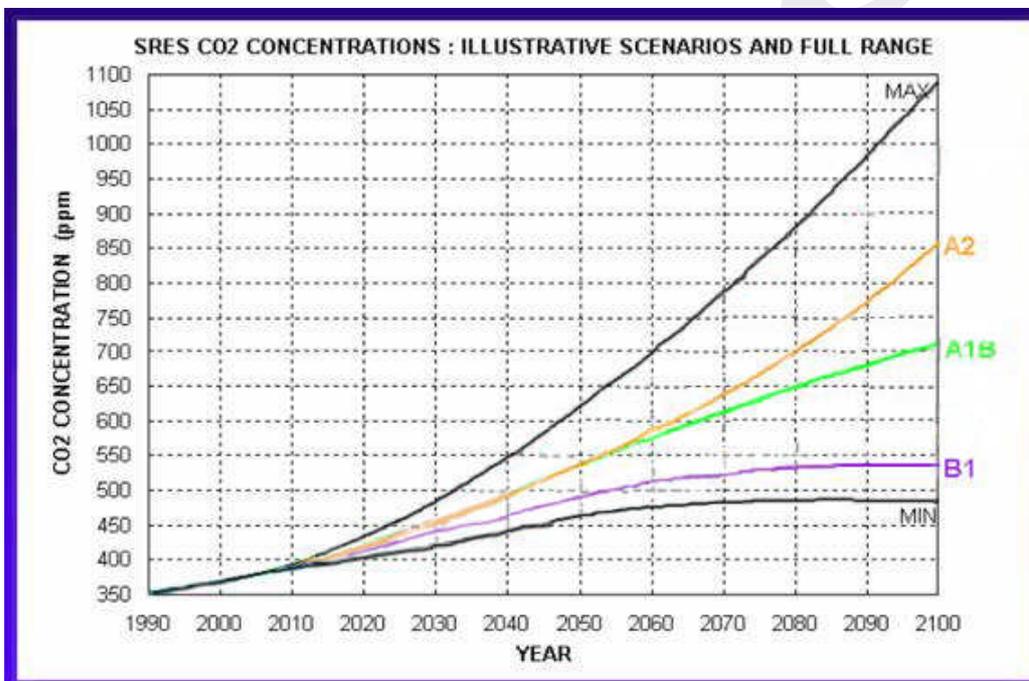
La familia A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).

La familia B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero

con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información. B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento. No se han asignado niveles de probabilidad a ninguno de los escenarios IEEE.

Del tipo de desarrollo que tenga el planeta y de la tecnología que se desarrolle para lograrlo, dependerán las emisiones de gei, que a su vez llevará a mayores o menores aumentos en la temperatura global (Figura 5.1).

Figura 5.1 Concentración proyectada de CO₂ atmosférico para 4 EEEI



Fuente: The National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.

Se ha proyectado que de proseguir las emisiones de GEI a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente mayores que los observados durante el siglo XX (Tabla 5.1). Aún cuando las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero se mantengan constantes, se espera que el calentamiento continúe a una tasa de aproximadamente 0,1°C por década.

Tabla 5.1 Proyecciones del intervalo probable de cambio de temperatura en superficie para finales del siglo XXI a finales del siglo XXI.

Escenario	Cambio de T (°C)
B1	1.2 - 2.9
A1T	1.4 - 3.8
B2	1.4 - 3.8
A1B	1.7 - 4.4
A2	2.0 - 5.4
A1F1	2.4 - 6.4

De acuerdo a los más recientes reportes del IPCC los mayores impactos estarán relacionados con cambios en el ciclo hidrológico. Un escenario posible se basa en el hecho de que el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) sea más frecuente e intenso. Bajo esta suposición es probable que la señal del cambio climático sea una marcada transición entre años con lluvias intensas y periodos con déficit severo de lluvia (IPCC, 2001; 2007). Los escenarios regionales de cambio climático para México y Centroamérica (IPCC, 2007) sugieren que la temperatura aumentará entre 2°C y 4°C para finales de siglo. Si bien los modelos numéricos presentan poca dispersión para las proyecciones de aumento en la temperatura, algunos modelos indican que la precipitación en la región aumentará, y otros que disminuirá. Aunque son más los que indican tendencia a disminución, la dispersión es grande y en general, los cambios proyectados son menores que la variabilidad interanual de las lluvias. En cambio, 2°C de aumento en la temperatura están fuera del rango de lo que hasta la fecha se considera una variación normal.

5.2 Modelos climáticos

El paso siguiente es la traducción de concentraciones del gas de efecto invernadero en cambio climático. Actualmente una de las principales herramientas de la ciencia moderna para generar futuros escenarios de cambio climático son los modelos de circulación global (GCMs) (Hulme et al., 2002; WMO, 2002). Los GCMs son modelos matemáticos tridimensionales que representan los procesos físicos y dinámicos que son responsables del clima del planeta. Un modelo climático es una representación matemática del sistema climático, la cual calcula las ecuaciones físicas que gobiernan el movimiento de energía y agua en tres dimensiones. Los GCMs se revisan y mejoran continuamente en diferentes centros de investigación en todo el mundo. Por ejemplo, en el Reino Unido el centro de Hadley desarrolló el HadCM, el cual es un modelo acoplado atmósfera-océano (AOGCM), que simula el cambio climático permitiendo la interacción dinámica y retroalimentación entre la atmósfera y los océanos (Gordon et al., 2000; Pope et al., 2000). En Canadá, el Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, (CCCMA) ha desarrollado un número de modelos de simulación para la predicción del clima y

el mejor entendimiento de los procesos que gobiernan el sistema climático. Su modelo acoplado de clima (CGCM3) pertenece a la tercera generación de modelos que integran los más recientes componentes de la atmósfera y el océano. En los Estados Unidos The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) han trabajado juntos durante los últimos 20 años desarrollando diferentes AOGCMs.

Para llevar a cabo esta investigación se utilizaron los resultados del modelo GFDLCM2, para el periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones SresA1B y SresB1, en los cuales las concentraciones de emisiones de gases de invernadero mundiales alcanzan concentraciones de 720 y 550 ppm respectivamente (Tabla 5.2). 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 que el Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México 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. El uso de datos diarios es para evitar subestimación en los cálculos de precipitación efectiva (Howard and Lloyd 1979). (http://www.cvccmatmosfera.unam.mx/cvcccm/index.php?option=com_content&task=view&id=72&Itemid=107)

Tabla 5.2 Características demográficas, sociales, económicas y tecnológicas de los EEEI Utilizados en esta investigación

Perfil	Escenario	
	SRESA1B	SRESB1
Crecimiento de la población	Bajo	Bajo
PIB	Muy alto	Alto
Uso de energía	Muy alto	Bajo
Cambio en el uso del suelo	Lento	Rápido
Uso de recursos	Moderado	Lento
Cambio tecnológico	Rápido	Moderado

Fuente: IPCC Special Report on Emissions Scenarios 2007

5.3 Escalamiento de Modelos climáticos

Los GCMs predicen con gran confiabilidad el aumento en la temperatura media anual del planeta (McCarthy y otros, 2001). Sin embargo, es menos cierto en qué medida las variables climáticas locales tales como precipitación, humedad, radiación solar, etc. serán afectadas.



Dado que la resolución de los modelos globales de circulación es demasiado gruesa, del orden de 2.5 latitud x 3.75° longitud, los estudios de investigación sobre los posibles efectos del cambio climático en los recursos hidrológicos han utilizados diferentes técnicas para integrar modelos hidrológicos con los resultados de Modelos Globales de Circulación. Por ejemplo Hughes, (2003) y Loaiciga, (2003) utilizaron Modelos Regionales de Circulación (MRCs), con una resolución del orden de 50 x 50 km . Wilby, (1998) y Mearns, (1999) utilizaron un escalamiento a una resolución de 5 x 5 km producida por un método de regresión. Herrera Pantoja y Hiscock (2007) utilizaron un generador estocástico de series de tiempo para lugares específicos.

En esta investigación el desarrollo de factores de escalamiento se llevó a cabo de acuerdo a la metodología utilizada por Arnel *et al.*, (1997) y Yusoff *et al.*,(2002). Los factores fueron aplicados a las series de futuros escenarios y con estas series corregidas se realizó cálculo de evapotranspiración potencial (EP) por el método Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1982), para posteriormente realizar los cálculos de evapotranspiración real (AE) y precipitación efectiva (Hxr) por medio de la versión modificada del balance de humedad del suelo (Herrera-Pantoja y Hiscock, 2008).

5.4 Impacto del cambio climático en los recursos hídricos

De acuerdo al modelo GFDL's CM2 bajo el escenario A1B de emisión de GEI, la temperatura promedio anual para el periodo 2046-2085 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 durante la época de lluvias y un incremento durante la temporada invernal (Figura 5.4). El análisis anual indicó que para algunos años la anomalía de temperatura para el escenario A1B podría estar cerca de los 2°C. También se observa un marcado incremento de la anomalía a partir de del segundo periodo de 20 años simulado, es decir, a partir de año 2067 (Figura 5.4.1).

De acuerdo al modelo GFDL's CM2 bajo 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 5.4). Este incremento no sólo se daría en la cantidad, sino también en la intensidad. Evento con intensidades mayores a 60 mm en 24 hrs podrían incrementarse entre 150 y 200% (Figura 5.4.1).

En general, los efectos del CC 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. Este incremento se daría durante la época de lluvias cuando la temperatura promedio podría disminuir (Figura 5.4.4). Los resultados de estas simulaciones se traducirían en un volumen 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 de $11 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para la zona de conservación (Tabla 5.4).

Figura 5.4 Temperatura promedio mensual para el periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones SresA1B y SresB1 de acuerdo al Modelo GFDL's CM2 con frecuencia diaria

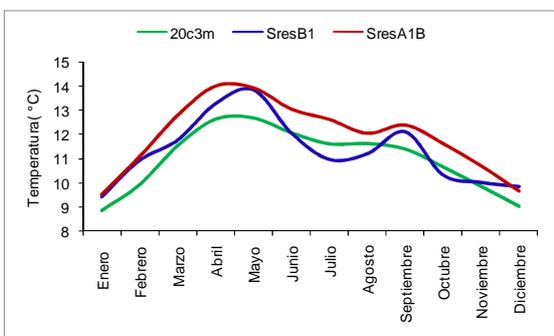


Figura 5.4.1 Anomalia de temperatura (°C) para el periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones SresA1B y SresB1 de acuerdo al Modelo GFDL's CM2 con frecuencia diaria.

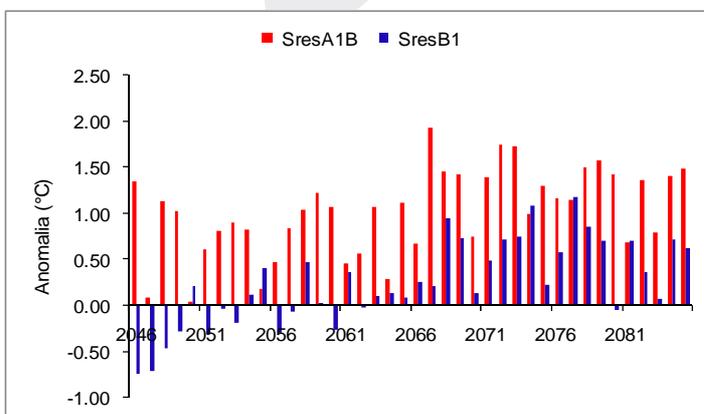


Figura 5.4.2 Precipitación promedio mensual para el periodo 2046-2085 simulado para los escenarios de emisiones SresA1B y SresB1 de acuerdo al Modelo GFDL's CM2 con frecuencia diaria

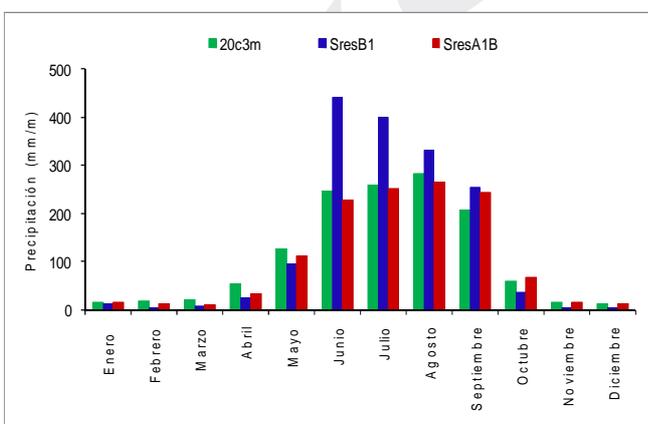


Figura 5.4.3 Porcentaje de cambio en el número de eventos extremos de precipitación para el periodo 2046-2085, para los escenarios de emisiones SresA1B y SresB1 de acuerdo al Modelo GFDL's CM2 con frecuencia diaria

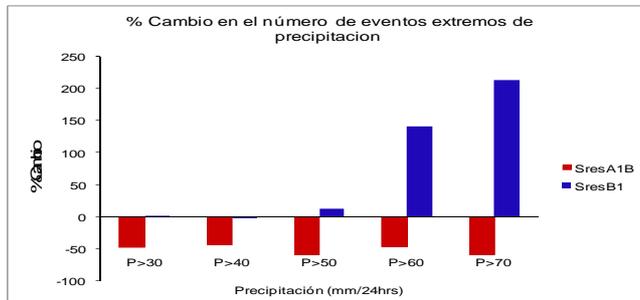


Figura 5.4.4 Porcentaje de cambio en la precipitación promedio anual, evaporación potencial y precipitación efectiva para el periodo 2046-2085, para los escenarios de emisiones SresA1B y SresB1 de acuerdo al Modelo

GFDLCM2 con frecuencia diaria.

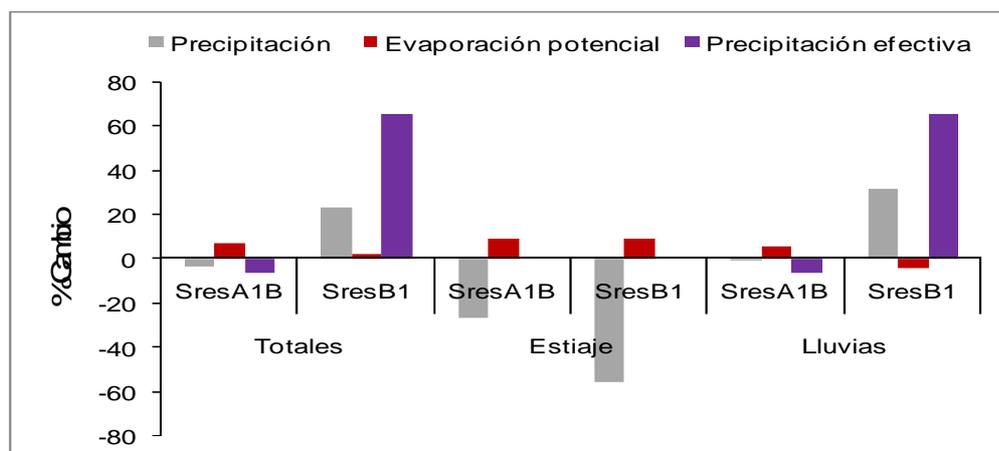


Tabla 5.4 Volúmenes de escurrimiento para la Zona Norte b) volúmenes de recarga natural para la Zona Sur para la línea base y el periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones SresA1B y SresB1, de acuerdo al Modelo GFDL's CM2 con frecuencia diaria.

Escenario	Precipitación efectiva ($m a^{-1}$)	Volumen ($m^3 a^{-1}$)	Volumen ($m^3 s^{-1}$)
Zona Norte			
Escurrimento			
Línea base	0.65	515,994,750	16.36
SresA1B	0.62	489,937,433	15.54
SresB1	0.80	636,151,050	20.17
Zona Sur			
Recarga natural			
Línea base	0.36	210,630,000	6.68
SresA1B	0.34	197,992,200	6.28
SresB1	0.59	349,645,800	11.09

6. IMPACTOS EN EL ABASTO DEL SERVICIO DE AGUA

A partir de los resultados que se obtuvieron de los modelos, se prevén 2 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 y
- 2) Cambio de las precipitaciones que afectarían de manera diferenciada en el suelo y en el 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.

6.1 El efecto del aumento de la temperatura en la demanda de agua

El consumo básico de agua de una vivienda depende de un conjunto de variables como las siguientes: el nivel de ingreso de sus habitantes, el número de personas por toma, los hábitos que tienen, el clima, la escolaridad de los jefes de familia, las edades de las personas que comparten la toma y el género de las mismas, así como de un factor que representa la tecnología utilizada (Renzetti 2002). De todas estas variables vamos a enfatizar la del clima.

Un incremento de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente produce un aumento de la demanda de agua, lo cual se evidencia en las costumbres observadas en ciudades con climas distintos. En ciudades mexicanas con mayores temperaturas promedio y mayor humedad relativa, la gente acostumbra bañarse dos y hasta tres veces al día. En la Tabla 6.1 se observa la incidencia de las diferentes variables en la demanda de agua con diferentes estructuras tarifarias. Como se puede observar, el aumento en la temperatura siempre incrementa la demanda de agua, independientemente del tipo de esquema de cobro utilizado.

Aunque teóricamente un aumento en la temperatura incrementa la demanda, el nivel en que lo hace varía significativamente. Scheffer *et al.* (1997) encontraron que el aumento de 1% en temperatura incrementa la demanda entre 0.02 y 3.8% (Citado en Renzetti 2002, p. 33). Pero los patrones cambian de acuerdo a las condiciones específicas; por ejemplo, el aumento de demanda de agua en verano en Tucson es 74%, en Raleigh 2.6% y en Toronto 3.6% (Gibbons 1986, p.18).

Una vez mencionado el efecto del clima en la demanda de agua, desde la perspectiva teórica y a través de algunos indicadores para otros contextos, ahora revisaremos los resultados de los escenarios de cambio climático para el DF. Como se explicó en la sección 5, la temperatura para el escenario SreB1 en el periodo 2046-2080 registraría un incremento al principio del año, en varios meses que coinciden con la temporada de estiaje y al final del año, aunque con reducciones en varios meses que coinciden con la temporada de lluvia. En el escenario SreA1B el incremento de la temperatura sería sostenido a lo largo del año, con aumentos en varios meses cercanos a un grado centígrado (Tabla 6.1.1).

Para determinar el impacto que podría tener el aumento en la temperatura en la demanda de agua se analizaron datos del consumo medido de agua del sector doméstico en el Distrito Federal. Sólo fue posible tener acceso a información de cinco años, de 2004 a 2008. Los datos

agregados no mostraron las tendencias esperadas, puesto que diversas delegaciones sufrieron reducciones en los volúmenes consumidos durante la época de estiaje. Según explicaron funcionarios del SACM, este fenómeno se explica porque frecuentemente las autoridades federales reducen el caudal hacia el DF para cubrir la demanda de los municipios conurbados. Adicionalmente, se puede observar cómo la reducción en los niveles de los caudales del sistema Cutzamala también ha tenido impacto en el abasto en la época de estiaje en 2009. Como se muestra en el Figura 6.1, los datos confirman que la demanda se ve limitada por la reducción en la oferta, eso sucedió justamente en varias de las delegaciones centrales, particularmente en Benito Juárez (2004 y 2006), Coyoacán (2004 y 2006) y Cuauhtémoc (2007, 2008).

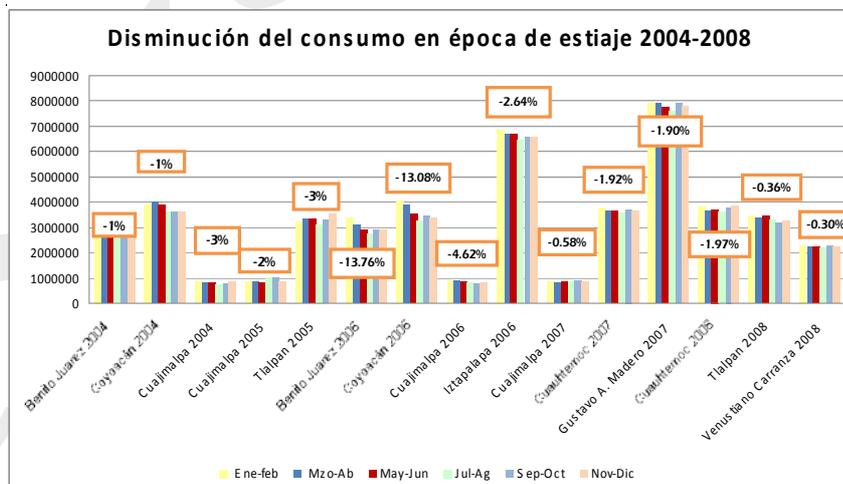
Tabla 6.1 Impacto de diversas variables que caracterizan la demanda de agua según tipo de tarifa

RANGOS DE CONSUMO	TIPO DE TARIFA APLICABLE	COSTOS DE TRANSACCIÓN	EFEECTO DE LA TARIFA SOBRE EL CONSUMO	EFEECTO DEL INGRESO SOBRE EL CONSUMO	EFEECTO DEL NÚMERO DE HABITANTES POR VIVIENDA	EFEECTO DE LOS HÁBITOS	EFEECTO DEL CLIMA	EFEECTO DE LA ESCOLARIDAD	EFEECTO DEL GÉNERO	EFEECTO DE LA EDAD
CONSUMO BÁSICO	POR CONSUMO MEDIDO	No significativos	Ninguno	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo	Incierto	Positivo
	POR CUOTA FLJA	No significativos	Ninguno	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo		Positivo
	POR DISTRIBUCIÓN CON PIPA	Altos	Negativo vía efecto ingreso y costos de transacción	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo		
CONSUMO EXCEDENTE	POR CONSUMO MEDIDO	No significativos	Negativo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo		Positivo
	POR CUOTA FLJA	No significativos	Ninguno	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo		Positivo
	POR DISTRIBUCIÓN CON PIPA	Altos	Negativo vía efecto ingreso	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo		

Tabla 6.1.1 Aumento promedio de la temperatura (°C)

Mes	SreB1	SreA1B
Enero	0.56	0.68
Febrero	0.99	1.18
Marzo	0.23	1.29
Abril	0.65	1.41
Mayo	1.18	1.28
Junio	-0.01	1.00
Julio	-0.64	1.04
Agosto	-0.42	0.45
Septiembre	0.72	1.02
Octubre	-0.34	0.98
Noviembre	0.16	0.87
Diciembre	0.81	0.65

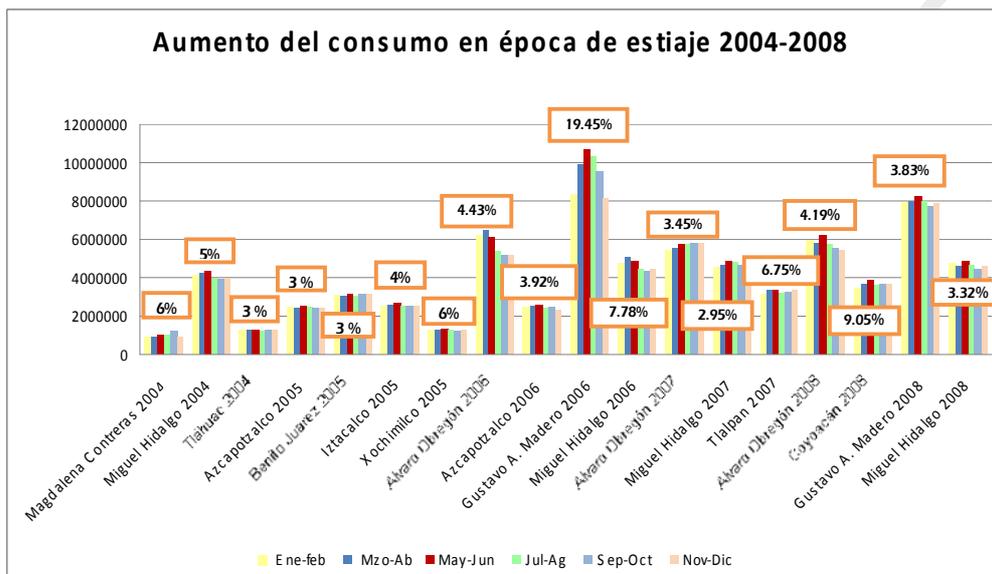
Figura 6.1 Disminución del consumo en época de estiaje para diversas delegaciones 2004-2008



Fuente: SACM 2004-2008

Sin embargo, para observar los patrones de aumento de consumo relacionado con la temperatura, se analizó la información del consumo en las delegaciones que sí presentaron la tendencia esperada en la época de estiaje. Como se muestra en La Figura 6.1.1, 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).

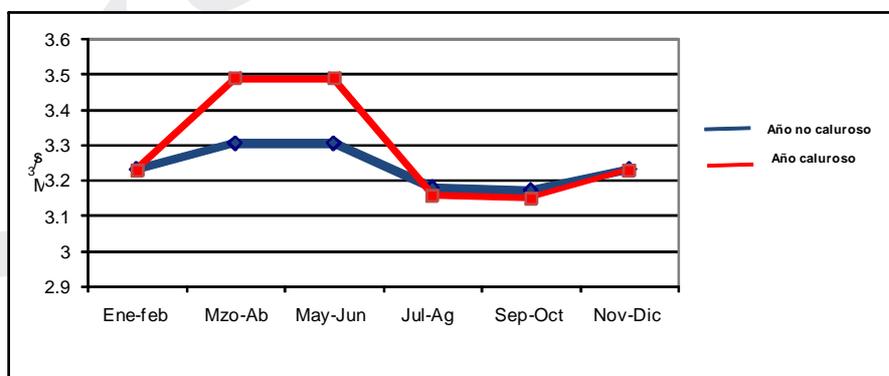
Figura 6.1.1 Aumento del consumo en época de estiaje para diversas delegaciones 2004-2008



Fuente: SACM 2004-2008

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 6.1.2). Pero es importante mencionar que en la Delegación Gustavo A. Madero la demanda aumentó 19% en 2006.

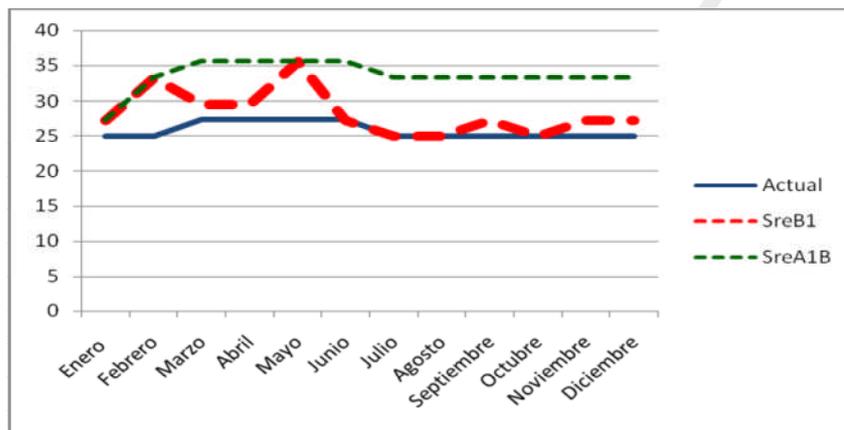
Figura 6.1.2 Comparación del consumo de agua ($m^3 s^{-1}$) en años calurosos y no calurosos.



Este impacto del aumento en la demanda de agua derivado del incremento en los patrones de temperatura local puede visualizarse desde la perspectiva optimista de que en los próximos

años se logra mejorar el servicio (con medidas como las mencionadas en la sección 6.3) y que los hogares estarían en la posibilidad de consumir más agua. En el escenario SreB1 se debería proyectar que habría un aumento probable de 30 millones de m³ anuales (9.83% adicional), con los mayores impactos en el primer semestre del año; mientras que para el escenario SreA1B el incremento sería de 93 millones de m³ (30.3 % adicional), con un incremento de la demanda sostenido a lo largo del año (ver Figura 6.1.3).

Figura 6.1.3 Patrones de consumo para los escenarios SreB1 y SreA1B



Desde otra perspectiva, se podría pensar que la reducción en la oferta que ahora se presenta en diversas delegaciones se puede generalizar y que los hogares se enfrentarían a recortes sistemáticos y severos del servicio en la época de estiaje para el escenario SreB1 y durante prácticamente todo el año para el escenario SreA1B.

6.2 El efecto del cambio en las precipitaciones

Otro impacto que puede tener el cambio climático es la modificación en precipitaciones. Aunque parece ser mucho más incierto el resultado en términos de precipitaciones, es interesante visualizar posibles cambios en los patrones de lluvias. Se observa que en el escenario SreB1 se presenta un aumento brusco en los niveles de precipitaciones en la época de lluvias, particularmente en los meses de junio, julio y en menor medida en agosto, mientras que el resto de los meses permanecen sin cambios significativos. Por otro lado, en el escenario SreA1B las precipitaciones prácticamente se mantienen sin cambios, aunque en varios meses se registran reducciones moderadas (Tabla 6.2).

En la ciudad de México, el agua de lluvia tiene 2 destinos principales: la recarga del acuífero en el suelo de conservación y el agua pluvial que se descarga al drenaje en el suelo urbano. Esto significa que para el escenario SreA1B, 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.

Tabla 6.2 Aumento promedio de la precipitación

Mes	20C	Sreb1	SreAb1
Enero	16.05	11.78	16.43
Febrero	17.16	4.48	12.32
Marzo	20.82	7.44	9.30
Abril	55.23	26.10	34.80
Mayo	126.05	94.86	110.67
Junio	246.13	440.40	228.30
Julio	259.71	398.04	250.79
Agosto	281.38	332.32	264.43
Septiembre	206.86	255.00	244.80
Octubre	60.49	37.51	67.58
Noviembre	14.99	5.10	14.70
Diciembre	13.38	6.20	12.71

Sin embargo, en el caso del escenario SresB1, 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. 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.

6.3 Medidas de adaptación

Para reducir los riesgos del cambio climático es necesario implementar medidas de adaptación. El tercer informe de evaluación del IPCC se refiere al término “adaptación” como cualquier ajuste en los sistemas naturales o humanos en respuesta al estímulo climático existente o esperado o sus efectos, que modera el daño o explota oportunidades de beneficio. El objetivo de la adaptación es reducir la vulnerabilidad al cambio climático y la variabilidad, para de esa

manera restringir sus impactos negativos. La adaptación también supone mejorar la capacidad de capturar cualquier beneficio del cambio climático⁴ (Stern, 2006). Los programas de adaptación tienen otras ventajas como aumentar la resiliencia de las sociedades a otros desastres.

La literatura reitera que existen sinergias entre la adaptación al cambio climático y el desarrollo local. En general, ciudades bien gobernadas reducen los riesgos del cambio climático. De hecho, la capacidad de adaptación de las sociedades generalmente está íntimamente relacionada con su desarrollo social y económico, aunque esta capacidad puede distribuirse desigualmente dentro de la sociedad (WB 2008, Pág. 25).

El IPCC diferencia entre adaptación autónoma y adaptación planificada. La adaptación autónoma es aquella que no constituye una respuesta consciente a los estímulos del clima, sino que se deriva de cambios introducidos para satisfacer nuevas demandas, objetivos y expectativas que, aunque no hayan sido ideados expresamente para compensar el cambio climático, pueden reducir las repercusiones de ese cambio. La adaptación planificada es el resultado de decisiones de política deliberadas, y toma en cuenta específicamente el cambio y variabilidad del clima; hasta ahora, rara vez ha sido implementada.

Algunos países han empezado a hacer evaluaciones del impacto del cambio climático en el abasto del servicio y en el manejo de las inundaciones, entre ellos Países Bajos, Australia, Reino Unido, Alemania, EU y Bangladesh (IPCC, 2008). En particular, existen varias experiencias documentadas para el caso de organismos operadores en Estados Unidos (Ver Miller y Yates 2005). El IPCC recientemente publicó un informe técnico sobre el tema de agua (IPCC 2008). Para el caso de ciudades, existe un análisis para ciudades asiáticas (WB 2008).

Entre las medidas de adaptación frente al cambio climático que han contemplado en las evaluaciones de algunas ciudades en materia de gestión del agua, se encuentra ampliar la recolección de agua de lluvia, planes de conservación de agua; reuso de agua, desalinización; así como eficiencia en el uso del agua en general y para riego. Por ejemplo, en las ciudades de Londres, Venecia y Yakarta se optó por un nuevo drenaje para agua pluvial; en Tokio se diseñó estanques bajo las carreteras y parques para mantener temporalmente las corrientes de agua y evitar las inundaciones (Tabla 6.3).

En la literatura se reitera la importancia de revisar los sistemas de protección civil,

⁴ La adaptación, junto con la mitigación, son estrategias de respuesta importantes. Sin estrategias de mitigación tempranas y fuertes, el costo de la adaptación aumentará, y la capacidad de los países e individuos para adaptarse efectivamente se verá limitada

particularmente mejorar sistemas de alertas de desastres hidrometeorológicos, tomar medidas de preparación de la comunidad, o bien limitar el crecimiento de la población debido a restricciones en el abasto de agua que prohíban la emisión de permisos para construcciones (ver Tabla 6.3) (WB 2008, Stern, 2006).

Tabla 6.3 Oportunidades de adaptación en zonas urbanas.

Sector	Opción de adaptación/Estrategia	Marco Político Subyacente	(-)Limitaciones y (+)Oportunidades para implementación
Agua. (ej. King County/Seattle, Singapore)	Ampliar la recolección de agua de lluvia : Almacenamiento de agua y técnicas de conservación; agua tratada; desalinización; uso del agua y eficiencia en riego.	Políticas Nacionales de agua y gestión integrada de los recursos hídricos; riesgos relacionados con la gestión del agua.	(-) Finanzas de los recursos humanos y barreras físicas; (+) Recursos de manejo de agua integrados; gestión integrada de recursos hídricos sinergias con otros sectores
Infraestructura y asentamientos (incluye zonas de costa) (ej. Venecia, Londres, Nueva York)	Reubicación de malecones y mareas aumentando barreras; refuerzos de dunas; adquisición de tierras y creación de humedales; barreras contra inundaciones; protección de barreras naturales existentes	Estándares y regulaciones de integración y consideraciones del cambio Climático ; uso de la tierra; códigos de construcción; seguros	(-) Barreras Tecnológicas y Financieras; (+)Disponibilidad de reubicación de espacios ; Políticas integradas y manejos de sinergias con metas de desarrollos sustentable.

Fuente: IPCC, 2007.

Desde una perspectiva integral, estas medidas de adaptación deben estar incluidas en las políticas nacionales de agua y gestión de recursos hídricos y en las políticas de uso de suelo y códigos de construcciones.

Generalmente, para la implementación de medidas de adaptación existen barreras en términos de recursos financieros, humanos, tecnológicos y físicos. Sin embargo, también pueden existir oportunidades a partir de las sinergias que se establezcan con otros sectores que busquen políticas encaminadas al desarrollo sustentable. Por este motivo, en las ciudades la reducción de la pobreza, incluyendo la mejora de las viviendas y la infraestructura básica y de los servicios, es un elemento básico de la adaptación.

6.4 La adaptación del organismo operador de agua

Como mencionamos al inicio de este informe, cuando se elaboran análisis sobre los impactos del cambio climático se debe contemplar que existe un nivel de incertidumbre alto derivado de diversos factores, pero que aumenta en los niveles locales/sectoriales, debido a las limitaciones de los modelos climáticos, la información que se pierde cuando las proyecciones climáticas son

llevadas a la resolución de cuencas hidrológicas, imperfecciones en los modelos hidrológicos o la limitación de información con que cuentan muchos países, sobre todo aquellos en desarrollo (Miller y Yates, 2005).

En la gestión de los recursos hidráulicos se reconoce que los tomadores de decisiones están habituados a la incertidumbre derivada de las diferencias en los resultados de modelos hidrológicos en términos de caudal, de recarga subterránea, de calidad del agua, etc. (Boorman and Sefton 1997). Sin embargo, se advierte que estas diferencias son pequeñas en comparación con la incertidumbre atribuida al cambio climático reflejada en los resultados de los modelos GCMs. Miller y Yates (2005) comentan que dada la naturaleza de esta incertidumbre, podría ser tentador ignorar el cambio climático en el análisis de decisiones. Sin embargo, se enfatiza que los costos de ignorarlo serían muy altos, por lo que recomiendan utilizar un enfoque de Gestión Integrada del Recurso del Agua, el cual considera un rango de procesos y acciones de oferta y la demanda que incorpora la participación de las partes interesadas en procesos de toma de decisiones, de manera que pueda obtenerse una perspectiva equilibrada de las estrategias a seguir.

La vulnerabilidad de los sistemas de agua al cambio climático depende de la gestión del agua a nivel nacional e internacional. Todo esto hace que las proyecciones sean complejas de dimensionar. El cambio climático es un desafío conceptual para los gestores hídricos, pues significa que podría ser necesario tomar decisiones de adaptación antes de conocer claramente cómo están evolucionando realmente los sistemas hidrológicos. Los escenarios plantean posibles situaciones futuras, pero a menudo se presentan grandes diferencias entre unos y otros impactos, como en este estudio ya lo hemos confirmado. En este sentido, la recomendación es llevar a cabo acciones de política paulatinas que se vayan ajustando a los avances en el conocimiento y a las condiciones reales.

6.5 Los costos de las estrategias de adaptación

Como mencionamos antes, el IPCC diferencia entre adaptación autónoma y adaptación planificada. La adaptación planificada se enfoca en bajar los costos haciendo frente a los problemas ex ante y la adaptación autónoma hace frente a los impactos adversos ex post. Lecocq y Shalizi (2007) explican que la adaptación autónoma es reactiva y debe considerar entre sus costos la combinación de gastos de sobrevivencia y gastos de reconstrucción. Es decir, utiliza recursos para hacer frente a eventos en el momento que ocurren. Se debe considerar que este tipo de adaptación no es suficiente para reestablecer completamente el

status quo por los aspectos irrecuperables; por ejemplo pérdidas que son imposibles de reestablecer (tales como paisajes, pérdida de biodiversidad o desaparición de bienes culturales) ó económicamente muy costosos de reparar. Estas pérdidas pueden ser referidas como daños residuales. De esta manera, para la adaptación autónoma, el costo total del cambio climático consistirá de cuatro componentes: costos de mitigación, costos de adaptación proactiva, costos de adaptación reactiva y daños residuales (Lecocq y Shalizi 2007)⁵.

A diferencia de la adaptación autónoma, la planificada se basa en la prevención, por lo que utiliza recursos ahora para prevenir posibles crisis en el futuro. El problema es que, en la práctica, cambios en el comportamiento y en las decisiones de política son frecuentemente más fáciles de ejecutar una vez que la crisis ha ocurrido que como anticipación a una crisis. Pero, desde el punto de vista económico, los costos preventivos suelen ser menores en comparación con los costos de acciones reactivas (Lecocq y Shalizi, 2007).

Para el caso del DF, revisamos en la sección 4 la serie de problemas que enfrenta en torno al manejo del servicio de abasto de agua y que lo colocan en un bajo nivel de resiliencia. En los programas de inversiones de las autoridades federales y de las propias autoridades locales aparecen una serie de medidas diseñadas para mejorar la eficiencia del sistema actual. Desafortunadamente, a más de la mitad de la presente administración, tanto federal como local, muchas de estas medidas aún no reciben los recursos necesarios para implementarse. Varias de las medidas programadas pueden suponer un tipo de adaptación autónoma; es decir, los ajustes no constituyen una respuesta consciente al cambio climático, sino que se deriva de evaluaciones para resolver problemas actuales, pero pueden reducir los impactos negativos del cambio climático.

En el Tabla 6.5 aparecen las principales inversiones que se consideran necesarias para reducir la vulnerabilidad de la región en materia de agua. Desde la perspectiva regional, se estima que se requiere una inversión de 50,000 millones de pesos para atender temas tanto de abasto de agua como de saneamiento, drenaje y ordenamiento. El monto de inversión que le correspondería al DF es de más de 22,000 millones de pesos (44%).

Tabla 6.5 Inversiones necesarias para reducir la vulnerabilidad de la región en materia de Agua

⁵ El Plan de Acción Nacional de Olas de Calor fue adoptado como una reacción a la ola de calor de 2003 (adaptación reactiva ex post). Pero ha sido adoptado anticipadamente para eventos repetitivos (adaptación proactiva ex ante). El plan explícitamente menciona al cambio climático como el motivo (Lecocq y Shalizi 2007).

Programa de Manejo sustentable del agua para el Valle de México a 2015					
Proyecto	Caudal (m3/s)	Inversión (millones de \$)	Costo Unitario* (\$/m3)	Año 2030	Año 2050
Abastecimiento de agua:					
Reducir niveles de pérdidas y desperdicio	7	4,000	2.31		
Frenar la sobre explotación de acuíferos e impulsar proyectos de recarga	6	4,500	8.03		
Tratamiento de aguas residuales (incremento reuso)	4	1,000	3.16		
Nuevos aprovechamientos de agua superficial en la cue	4	2,000	3.52		
Mezquital: reuso intensivo	6	5,500	9.46		
Cutzamala					
a) Rehabilitación y adecuación	3.5	3,000	7.97		
b) Temascaltepec	4.5	1,500	5.85		
Sub-total	35	21,500	4.98		
Ordenamiento, drenaje y saneamiento:					
Ordenamiento territorial y restauración de cuencas		4,000			
Reforzamiento del Sistema de Drenaje del Valle de México		16,500			
Saneamiento de las descargas del Valle de México	50	8,000	1.42		
Sub-total	50	28,500	1.42		
<i>Demanda adicional por crecimiento de la población</i>				11.41 (m3/s)*	

* Población estimada de 23.72 millones de habitantes en la ZMVM

Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México al 2012

Abastecimiento de agua:					
1. Suelo de conservación (protección) y recarga del acuífero (agua pluvial y tratada)	2.77	3,851			
2. Consumo de agua potable. (Desarrollo de nuevas fuentes con la participación en el Plan Hidráulico del Valle de México.	10	2,028			
2.1 Consumo de agua potable. Mejoramiento del sistema comercial-medición y tarifas.	2.2	2,728			
3. Detección y supresión de fugas	3	2,970			
4. Parques Lacustres y Áreas de Alto Valor Ambiental	1	436			
Sub-total	18.97	12,013			
Drenaje y saneamiento					
5.1 Construcción del emisor oriente		2,999			
5.2 Plantas de Tratamiento y Reuso de Agua Residual Tratada	40	4,170			
5.3 Otras obras de drenaje, tratamiento y reuso (emisor central, plantas de bombeo, etc)		2,955			
Sub-total	40	10,124			
<i>Demanda adicional por incremento de la temperatura</i>					

Fuente: elaborado con base en GDF 2007 y CONAGUA 2005

Este monto de inversión hace referencia a los costos de reducir la vulnerabilidad de la ciudad y de resolver sus problemas inmediatos. Sin embargo, también es necesario considerar los costos que pueden derivar del cambio climático. Como mencionamos antes, en términos de precipitaciones el escenario SresB1 supondría un aumento del 23% de las descargas de agua pluvial hacia el drenaje, con el consecuente riesgo de inundaciones y problemas relacionados.

En Tabla 6.5.1 aparecen indicadores que muestran los volúmenes de descargas al drenaje bajo diferentes ángulos. El volumen que se descarga en época de secas es de 64 m3/s, en los meses de lluvia las descargas de agua pluvial suman 128 m3/s, lo que representa un total de 192 m3/s para esos meses. Según la CONAGUA, el déficit del drenaje es de 150 m3/s para evitar riesgo de inundaciones graves en la ciudad en caso de que hubiera una falla en el emisor central durante la época de lluvia. Con esta racionalidad se están iniciando acciones para construir el emisor oriente con una capacidad para 150 m3/s. Sin embargo, en caso de presentarse el escenario SresB1, el aumento en precipitaciones generaría un incremento de descargas pluviales de cerca de 30m3/s, por lo que la infraestructura que se proyecta construir sería insuficiente para canalizar el excedente de descargas.

Tabla 6.5.1 Volúmenes de descargas al drenaje

	2008			2012	2046-2080
	Secas	Lluvias	Total		
Descargas al drenaje	64 m ³ /s	128 m ³ /s	192 m ³ /s		
Déficit de drenaje			150 m ³ /s		
Emisor Oriente				150 m ³ /s	
Déficit de drenaje con escenario SresB1					29.4 m ³ /s

Fuente: Elaborado con base en CONAGUA-SEMARNAT 2008

Una tema que ha sido escasamente analizado es la conveniencia de construir un drenaje pluvial. De acuerdo con el SACM, esto supondría construir una red de 6,000 km, con un costo aproximado de 15,000 millones de pesos. Para tener una referencia, el costo del emisor central para aumentar la capacidad de drenaje de la ciudad costará 13,000 millones de pesos. En época de lluvias existe un potencial actual de capturar agua en el drenaje de 128 m³/s, con el escenario SresB1, el aumento en precipitaciones generaría un incremento de descargas pluviales de cerca de 30m³/s; lo cual suma 158 m³/s. La pregunta a plantar es si el costo de aprovechar esta agua pluvial excede el precio unitario de la siguiente fuente de abasto externo, que está proyectado en 9.46 pesos por metro cúbico del Valle del Mezquital. Adicional a la ventaja de aumentar la oferta de agua al construir un sistema de captación de agua pluvial, se debe considerar el aspecto socio-político, pues se reduciría la dependencia de fuentes externas y se atendería a aspectos de equidad regional.

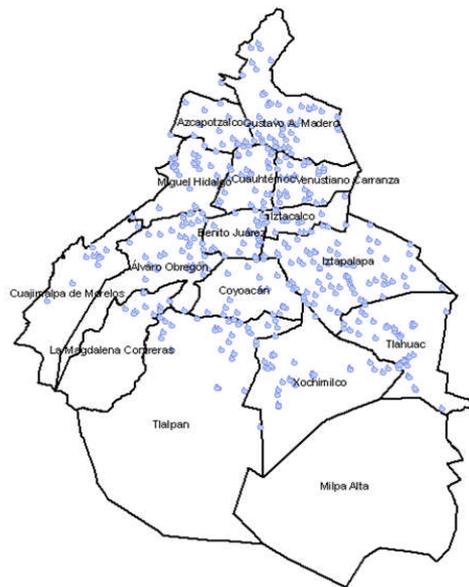
Respecto al riesgo de inundaciones y de afectaciones a la infraestructura urbana y seguridad de la población, existe información que actualmente procesa el área de protección civil con datos del H. Cuerpo de Bomberos. En la base de datos de este organismo se procesan datos sobre eventos de inundaciones y derribo de árboles. Es importante que se sistematice información para conocer con precisión zonas de riesgo y tomar las acciones pertinentes (PAOT 2009). En la Figura 6.5 aparecen el mapa con los sitios que presentaron eventos de inundación en 2008.

7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se espera que el cambio climático produzca un gran impacto en los recursos hídricos. En México los efectos del cambio climático se han manifestado con una secuencia de desastres de origen hidrometeorológico con graves daños sociales, materiales y ecológicos. En muchas ciudades de nuestro país los problemas de disponibilidad y contaminación del recurso son cada

vez más graves, lo que pone en riesgo la provisión del servicio y hace vulnerable a la población frente a posibles problemas de acceso al servicio en el futuro. En la ZMCM dado el deterioro del servicio 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 vital generar escenarios futuros de cambio climático que permitan conocer la vulnerabilidad a condiciones anómalas en el clima y proponer estrategias para enfrentar dichas situaciones adversas.

Figura 6.5 Mapa de eventos de inundación en 2008



Fuente: PAOT, 2009

Desde principios de 1990, los Modelos de Circulación Global han sido desarrollados y mejorados por centros especializados del todo el mundo para modelar los impactos del cambio climático. Los resultados de dichos modelos han sido utilizados para realizar investigaciones en muchos países del planeta incluyendo México (Landa *et al.*, 2008; Martínez-Austria y Aguilar-Chávez, 2008, Gomez *et al.*, 2008; CICC, 2007).

En este estudio se ha evaluado los posibles impactos del cambio climático en el servicio de abasto de agua potable en la ZMCM. Usando datos de un modelo de circulación global acoplado de la atmósfera y el océano (GFDL CM2) se simularon futuros escenarios de cambio climático para 2 escenarios de emisiones de GEI el A1B y el B1 para el periodo 2046-2085. Los efectos del cambio climático en la precipitación efectiva fueron investigados utilizando una versión modificada del balance de humedad del suelo. 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.

En este estudio como en muchos otros estudios de cambio climático se han presentado escenarios que han llevado a una dualidad recurrente: 'inundación-sequía'. Por ejemplo, Yussoff *et al.* (2002) usando la base de datos del UKCIP98 encontró tendencias contrarias de recarga entre los escenarios de emisiones Medio-alta y Medio-baja. Mendoza *et al.* (1997) evaluaron la vulnerabilidad de 12 zonas hidrológicas de México usando the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Model (GFDL-R30) del Canadian Climate Center Second Generation Model (CCCM), y un modelo termodinámico de clima (CTM) del Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para determinar la vulnerabilidad de las cuencas de México al cambio climático. Ellos encontraron que las predicciones en los escenarios de precipitación eran sumamente diferentes para cada modelo. Mientras el CCCM predecía una disminución, el GFDL presentaba un incremento substancial. Stratus Consulting (2004) usando los resultados de diferentes MCGs encontró que para el Estado de Sonora algunos modelos sugerían un escenario más lluvioso mientras que otros indican mayor probabilidad de menos lluvias para el 2050.

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 las supuestos realizados en cada paso del proceso.

A pesar de las incertidumbres, el estudio presenta evidencia que confirma que la ZMVM es una ciudad con 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 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 y en el 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. 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. Esto llevaría a una adaptación autónoma, es decir, reducir el nivel de resiliencia de la ciudad. Una vez implementadas estas medidas, 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. Así, enfatizamos 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.

Bibliografía.

- 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.
- Castelan, 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 DF.
- 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 acuifera. *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. (2007a). 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. (2008a). 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 DF y ZMVM 2002. [En línea]. Disponible http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/inegi/productos/integracion/sociodemografico/medambodf/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, DF, 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 Martinez, 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.Shiley, 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/monitoring2000jobs1.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. (2001). 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, Gloria (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, Gloria, (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(34), 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.