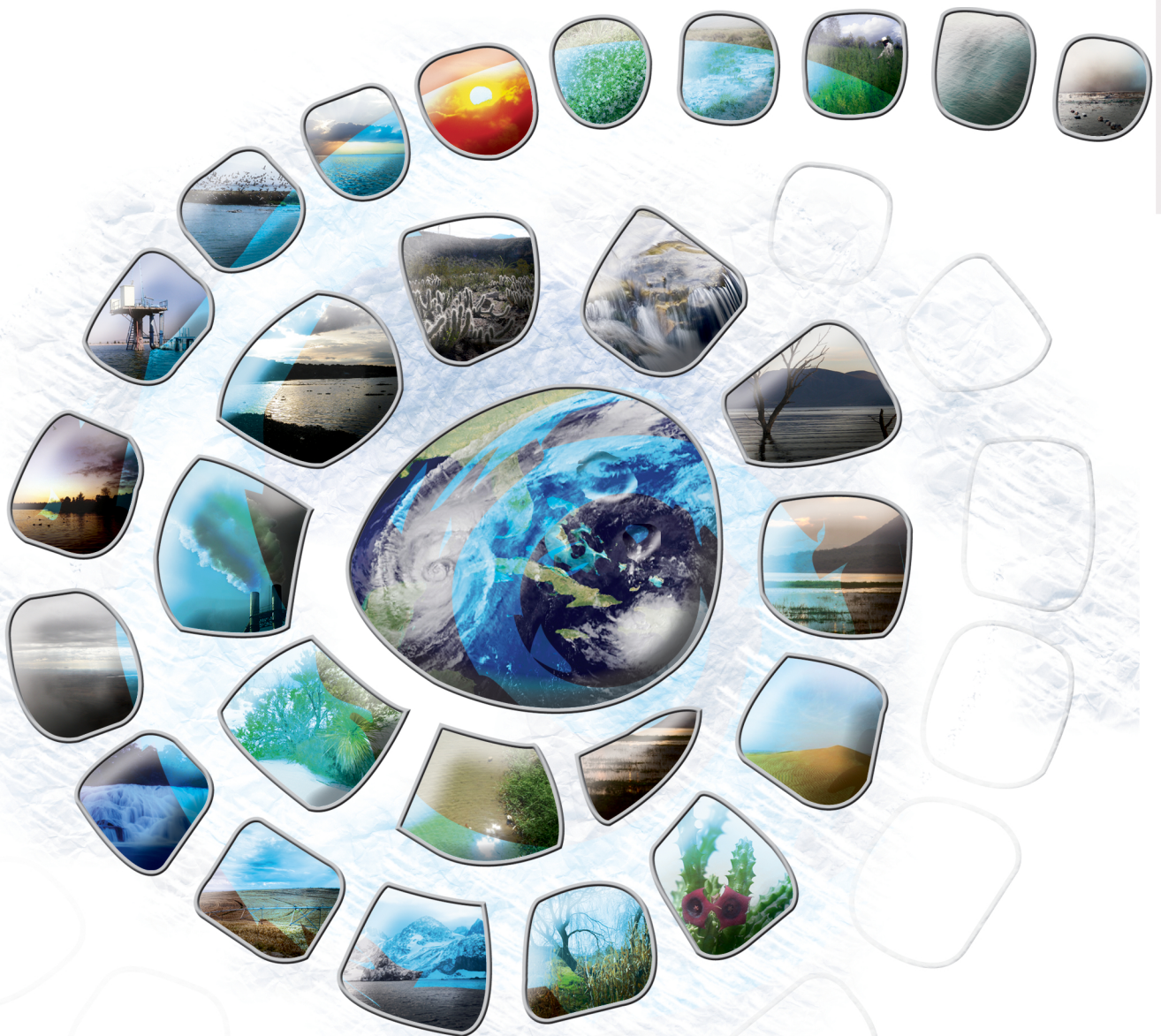


Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México



**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN LOS RECURSOS HÍDRICOS
DE MÉXICO**

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE MÉXICO

Polioptro F. Martínez Austria

SEMARNAT

SUBSECRETARÍA DE PLANEACIÓN

INSTITUTO MEXICANO DE
TECNOLOGÍA DEL AGUA

Septiembre

México, 2007

551.6 Martínez Austria, Polioptro F.
M33 *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México.*
 Polioptro F. Martínez Austria – Jiutepec, Mor.: IMTA, © 2007.
 76 pp. 21.5 x 28 cm
 ISBN 978-968-5536-91-2

1. Calentamiento global 2. Cambio climático 3. Recursos hídricos 4. Efectos del clima 5. México

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación editorial

Jorge Martínez Ruiz
Coordinación de Comunicación,
Participación e Información

Marco Antonio Sánchez Izquierdo
Subcoordinación de Vinculación, Comercialización
y Servicios Editoriales

Cuidado de edición:
Jesús Hernández Sánchez

Diseño:
Gema Alín Martínez Ocampo

Primera edición: 2007

© 2007, Polioptro F. Martínez Austria

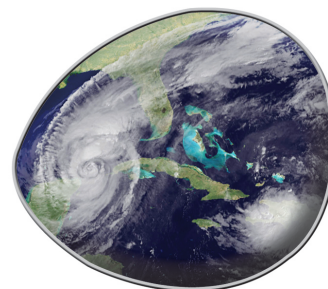
D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
Progreso, Jiutepec, Morelos
CP 62550
MÉXICO

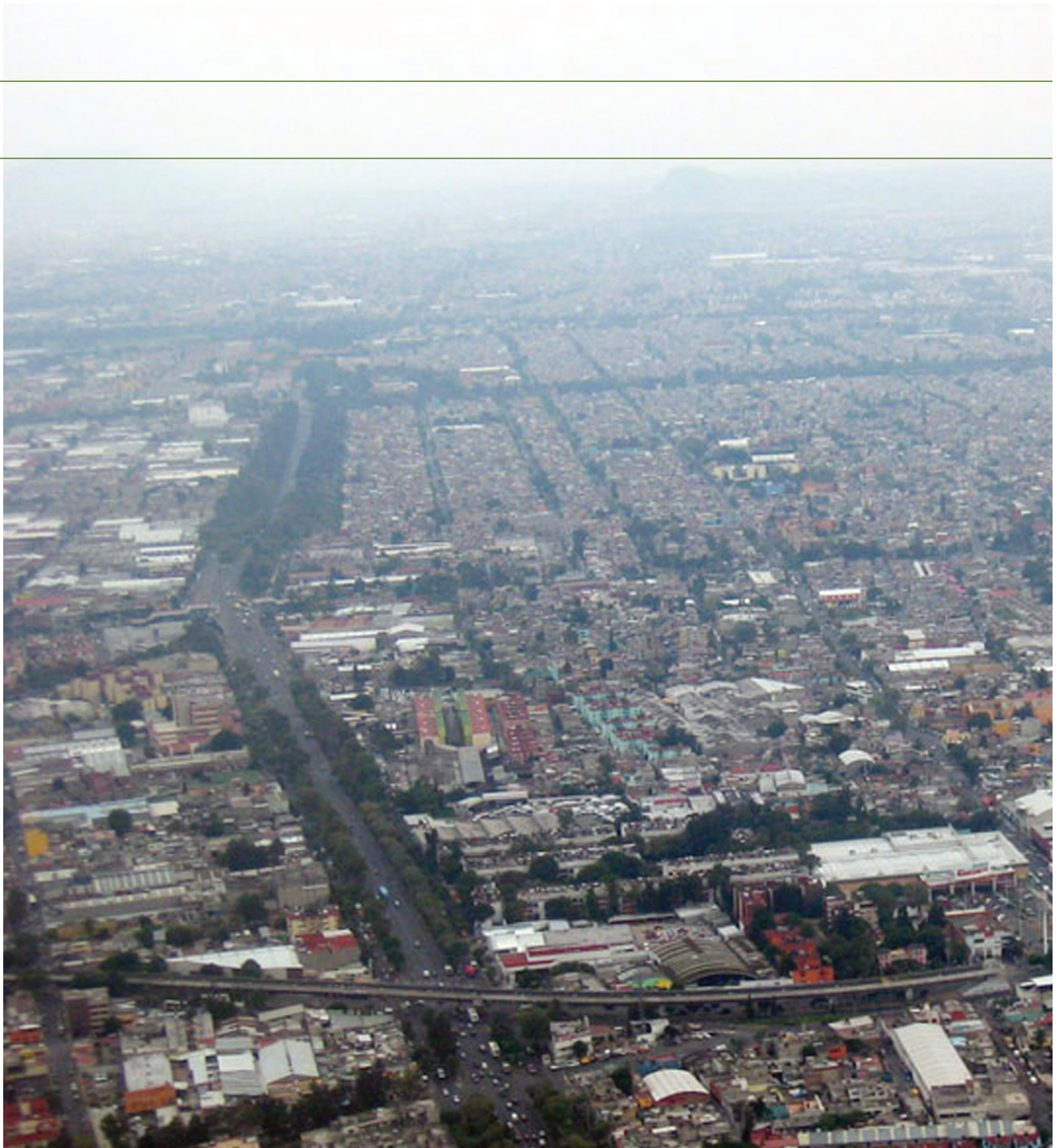
ISBN 978-968-5536-91-2

Impreso en México – *Printed in Mexico*

Índice

Prefacio	7
Antecedentes	11
El calentamiento global	17
Escenarios de cambio climático	25
Efectos del cambio climático en los recursos hídricos	31
Efectos en los recursos hídricos de México	39
Cambios en la demanda de agua	60
Gestión del agua y cambio climático	64
Consideraciones finales	69
Referencias	73





Prefacio

Sobre la base de evidencias reconocidas por la comunidad científica internacional, el cambio climático es ya una realidad incontrovertible, cuyos primeros efectos empiezan a ser medidos. Las proyecciones y los modelos climáticos disponibles permiten anticipar consecuencias potenciales de gran alcance para los procesos de desarrollo. La transformación del clima impactará al medio ambiente, en especial a la biodiversidad y a los recursos hídricos, pondrá en riesgo numerosos procesos productivos y representará una amenaza para la salud pública, entre muchas otras consecuencias. El cambio climático empieza a perfilarse como el problema ambiental de mayor trascendencia en el siglo XXI y uno de los más importantes desafíos globales que enfrenta la humanidad.

El origen de este fenómeno climático es antropogénico, derivado de aquellas actividades humanas que utilizan la atmósfera como vertedero de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), producto sobre todo de la quema de combustibles fósiles y de la destrucción de la cobertura vegetal. Urge incrementar los esfuerzos de mitigación para reducir las emisiones de GEI y desarrollar capacidades de adaptación ante sus impactos adversos previsibles, algunos de los cuales son ya inevitables.

En respuesta a este desafío, México firmó en 1992 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático y en 1997 el Protocolo de Kioto, ratificando ambos instrumentos multilaterales en 1993 y en 2000, respectivamente. Nuestro país ha realizado tres Inventarios Nacionales de Emisiones de GEI, conforme a los lineamientos y metodo-

logías del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), y presentado tres Comunicaciones Nacionales; la última de ellas en noviembre de 2006. Más recientemente, en el mes de mayo de 2007, el Presidente de la República, licenciado Felipe Calderón Hinojosa, presentó la Estrategia Nacional de Cambio Climático.

Por su ubicación geográfica y sus condiciones socioeconómicas, México muestra una elevada vulnerabilidad al cambio climático. Las afectaciones al ciclo hidrológico, en particular, determinan la necesidad de revisar los modelos vigentes de gestión de los recursos hídricos. Pese a la importancia del problema, no existe en México un texto que resuma el conocimiento actual de las implicaciones del cambio climático, las condiciones de vulnerabilidad, las necesidades de adaptación en el ámbito de los recursos hídricos y de su gestión.

Mediante el presente libro, el doctor Polioptro Martínez Austria, director general del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, contribuye a subsanar dicha carencia. Basándose en una sólida información técnica, presenta en forma sencilla y clara la realidad de las condiciones climatológicas que prevalecen hoy día en el planeta y particularmente en México, su relación con el valioso recurso agua y la manera en que el cambio climático impactará nuestro entorno, de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático desarrollados por el IPCC. El enfoque del documento es eminentemente práctico, al articular la información requerida para revisar las políticas públicas y facilitar la toma de decisiones para la planeación a mediano plazo. Nos permite pensar el tema del cambio climático desde la perspectiva de las cuencas hidrográficas y de la especificidad de cada una de ellas.

Señala también el autor la necesidad de llevar a cabo estudios más detallados, centrados en zonas de particular vulnerabilidad al cambio climático. A partir del valioso texto que se presenta aquí, se deberán realizar estudios regionales que permitan reducir la incertidumbre en los pronósticos, localizar los efectos, definir las medidas de adaptación y priorizar su aplicación. El trabajo del doctor Martínez Austria apunta así hacia el desarrollo de una estrategia específica para los recursos hídricos de

nuestro país que se insertará en el Programa Especial de Cambio Climático, actualmente en elaboración.

Aunque la dimensión del desafío es global, necesitamos enfrentarlo como sociedad organizada y como ciudadanos. Ninguna respuesta tecnológica, por muy avanzada que sea, bastará si no somos capaces de transformar con rapidez nuestros patrones de producción y de consumo, de ocupación del territorio y de conductas individual y colectiva en relación con los recursos naturales y, en particular, con el agua.

Dr. Fernando Tudela



Antecedentes

Durante el Primer Foro Mundial del Agua, celebrado en Marruecos en marzo de 1997, el profesor Godwin O. P. Obasi, secretario general de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), escogió como tema de su conferencia magistral “El cambio climático y la gestión del agua” (Obasi, 1997). Esta elección, adoptada en una coyuntura tan especial como la primera reunión planetaria del agua no fue, desde luego, casual. Obedece a una realidad irrefutable: el cambio climático es la principal amenaza, en el largo plazo, que se cierne sobre los recursos hídricos del mundo y, por tanto, sobre la sociedad humana.

Hoy en día, poco más de un lustro después, las observaciones del profesor Obasi se han confirmado con nuevas evidencias empíricas y un mejor conocimiento de la dinámica atmosférica global logrado, sobre todo, a partir de los esfuerzos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). En aquel entonces el secretario general de la OMM, citando

las conclusiones del segundo reporte del Panel Intergubernamental, afirmaba que “...el balance de la evidencia sugiere que existe una perceptible influencia humana en el clima” (IPCC, 1995). En 2001, el Tercer Reporte para Responsables de Políticas (IPCC, 2001) estableció que durante el siglo XX se incrementó la temperatura global en $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, que es mayor que el aumento registrado en los últimos diez mil años y que habrá un calentamiento global aún mayor en el periodo 1990 - 2100, de entre 1.4 y 5.8°C . Otro reporte del Grupo I del IPCC (2001a) anotó que “...es ampliamente reconocido que las emisiones de gases de invernadero influenciadas por el hombre tienen el potencial de alterar el clima terrestre”. Finalmente, el Informe 2007 para Responsables de Políticas del IPCC, establece con claridad que “El calentamiento del sistema climático es ahora inequívoco, como resulta evidente de las observaciones de incrementos en las temperaturas promedio global del aire y de los océanos, derretimiento de hielo y nieve e incremento del nivel promedio del mar” (IPCC, 2007).





El calentamiento global, al mantener una mayor cantidad de energía en el sistema atmosférico, intensificará el ciclo hidrológico. Uno de los principales efectos será la modificación en los patrones de precipitación y escurrimiento. En consecuencia producirá cambios en la disponibilidad de agua así como en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos.

México es especialmente vulnerable al calentamiento global que ocasionará notables modificaciones en su ciclo hidrológico, ya que se encuentra sujeto a sequías recurrentes en algunas regiones o a fuertes

precipitaciones estacionales, ocasionadas por huracanes y tormentas tropicales en otras. Además dos terceras partes de su territorio están caracterizadas como áridas o semiáridas por lo que, según la mayoría de los modelos de circulación global, es previsible que esa superficie sufra una sensible disminución en la precipitación y el escurrimiento.

Si a lo anterior se suma que en muchas de las principales cuencas y acuíferos de México la explotación de los recursos hídricos disponibles se acerca a sus límites, o éstos han sido rebasados, podrá comprenderse

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés)

Es un grupo intergubernamental de expertos en cambio climático creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Se trata de un grupo abierto a todos los miembros de las Naciones Unidas y de la Organización Meteorológica Mundial.

La función del IPCC consiste en analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus factibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo. El IPCC no realiza investigaciones ni controla datos relativos al clima u otros parámetros pertinentes, sino que basa su evaluación principalmente en la literatura científica y técnica revisada por homólogos y publicada.

Una de las principales actividades del IPCC es hacer una evaluación periódica de los conocimientos sobre el cambio climático. El IPCC elabora, asimismo, informes especiales y documentos técnicos sobre temas en los que se consideran necesarios la información y el asesoramiento científicos e independientes, y respalda la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) mediante su labor sobre las metodologías relativas a los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.





mejor la importancia de analizar los posibles efectos del calentamiento global en la gestión del agua.

Por otra parte, los criterios de diseño de obras y sistemas hidráulicos se basan en la consideración de que la información climática registrada sirve de orientación confiable para el futuro, es decir las variables climáticas e hidrológicas obedecen a procesos que no se modifican en el tiempo¹.

No obstante, existen ahora razones de peso para estimar que el clima variará durante la vida útil de muchas de las grandes estructuras hidráulicas y los criterios de diseño en el futuro tendrán que adaptarse al cambio previsto en las condiciones climáticas e hidrometeorológicas en relación con la vida del proyecto (Linz H., *et. al.*, 1990). Es posible que incluso hubiera necesidad de revisar los diseños hidrológicos de obras ya construidas.

¹ En términos estadísticos, que son procesos estacionarios y ergódicos.

Desde 1994, en que se elaboró el Estudio de País, México ha venido desarrollando un esfuerzo continuo de análisis del cambio climático y sus efectos en su territorio. El Estudio de País abarcó tres aspectos principales: inventarios de gases de invernadero, escenarios de cambio climático y estudios de vulnerabilidad en siete diferentes áreas entre las que se contaron la agricultura y los recursos hídricos.

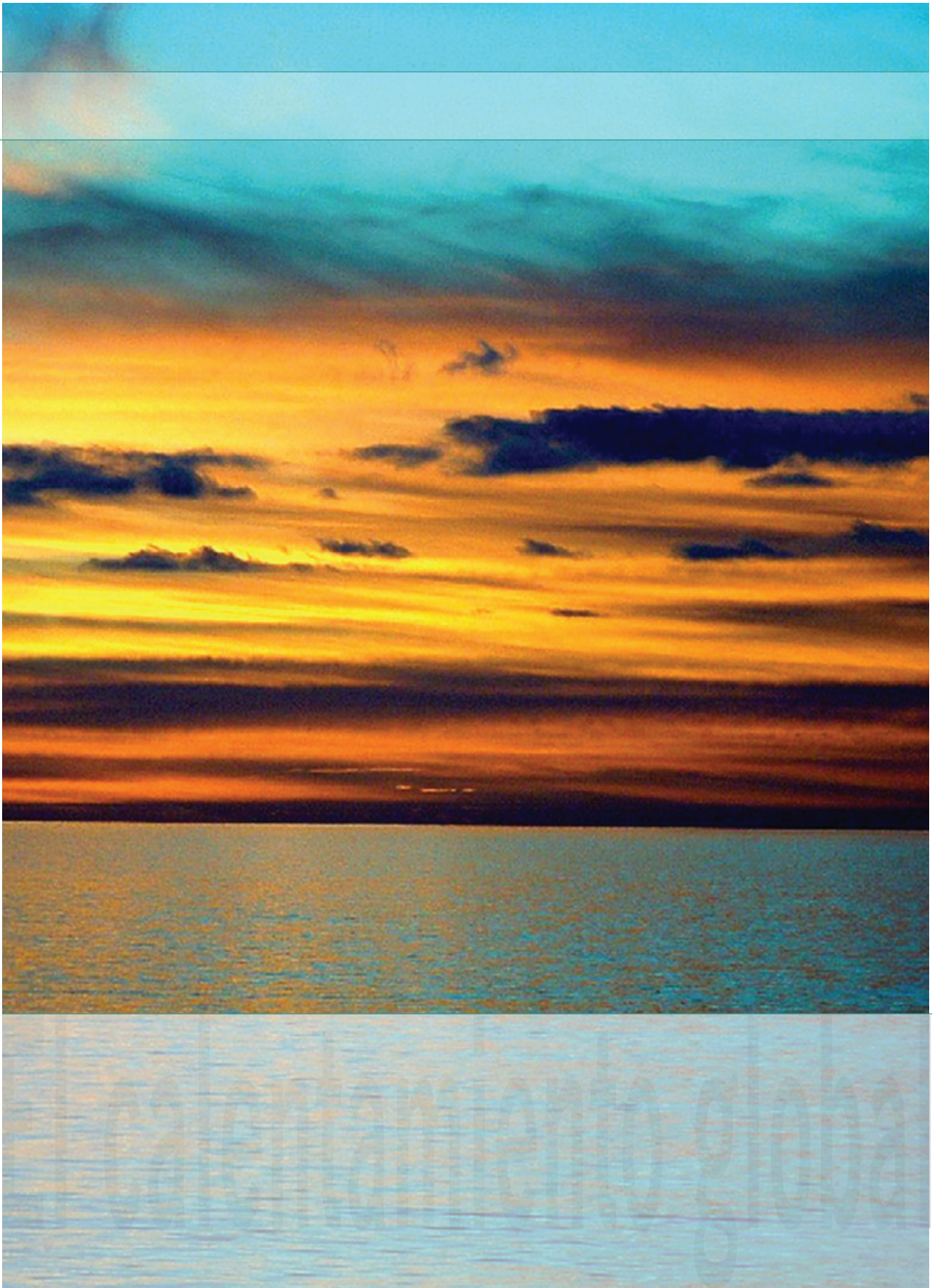
México ha presentado además tres extensas Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; la primera publicada en 1997, la segunda en julio de 2001 y la tercera a finales de 2006 (Semarnap, 1997; Semarnat, 2001; Semarnat, 2006). La primera reportó, en lo que respecta a vulnerabilidad y mitigación, esencialmente, los resultados del Estudio de País.

El segundo documento se centró en los avances en el inventario de gases de invernadero y en acciones de mitigación en el área forestal y en el sector energético. No abordó acciones de mitigación en los recursos hídricos. En la tercera comunicación se actualizó el inventario de gases de inverna-

dero y se centró en acciones de mitigación del calentamiento global. También vale la pena destacar los contenidos del Programa Nacional de Acción Climática (Semarnap, 1999).

Recientemente, se publicó la Estrategia Nacional de Acción Climática, documento que coloca a México a la vanguardia de los países que enfrentan los retos del calentamiento global. Este documento, coordinado por la Semarnat pero resultado del trabajo de siete secretarías de estado, resume las estrategias de mitigación y de adaptación propuestas por cada sector. Mismas que habrán de concretarse en un programa nacional de acción climática.

A pesar de la importancia de los esfuerzos realizados en México para el estudio del cambio climático, no existe un texto que resuma el conocimiento actual de efectos, vulnerabilidad y adaptación de los recursos hídricos y su gestión. El presente documento tiene como propósito ayudar a subsanar esta carencia; y de este modo acercar a los responsables de políticas públicas y tomadores de decisiones a la información que necesitan para la planeación de medio plazo.

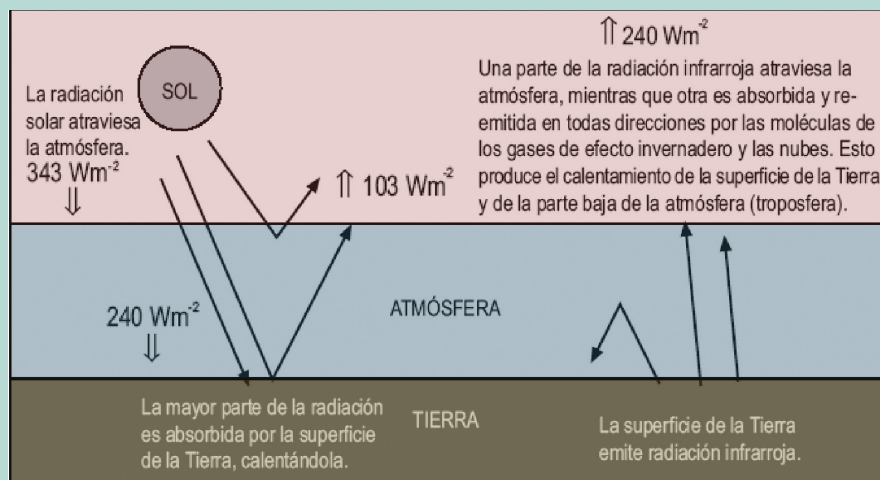


El calentamiento global

El efecto invernadero, capaz de producir el calentamiento global, es ocasionado por la presencia en la atmósfera de gases que retienen la radiación de onda larga que emite la Tierra al disipar el calor recibido del Sol. En efecto, como muestra la figura 1, una parte del total de la radiación que llega a la Tierra procedente del Sol ($\sim 343 \text{ W/m}^2$) es inmediatamente reflejada al espacio exterior

($\sim 103 \text{ W/m}^2$), otra es absorbida por la Tierra ($\sim 240 \text{ W/m}^2$) que se calienta y reemite algo de esta energía en forma de radiaciones de frecuencia infrarroja. No obstante, antes de alcanzar el espacio exterior, una porción de esta radiación es capturada por algunos gases en la atmósfera, cuyas capas bajas (la tropósfera) se calientan mediante este proceso, aumentando la temperatura planetaria.

Figura 1. Representación esquemática del calentamiento global (Semarnap, 1997).



Los gases que retienen el calor en la atmósfera, conocidos como gases de invernadero son, entre los más importantes, el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los cloro-fluorocarburos (CFC). Estos gases, excepto los últimos, existen de manera natural en la atmósfera y son los responsables, en buena medida, de crear condiciones para la vida en nuestro planeta. No obstante, aún pequeñas variaciones en su cantidad, pueden incrementar de manera sensible la temperatura atmosférica, con las consecuencias que ello implica.

De entre los gases de invernadero el CO_2 es el más abundante y la principal causa del calentamiento global de origen antrop-

génico, es decir, el producido por las modernas actividades humanas que lo liberan a la atmósfera mediante la quema de combustibles fósiles. En la era preindustrial la concentración de CO_2 era de 280 ppm, en 2005 alcanzó las 379 ppm (IPCC, 2007b) y, desafortunadamente, en nuestros días continúa en aumento.

En la tabla 1 se reproducen las concentraciones preindustriales, las de 1998 y la tasa de crecimiento de la concentración de los principales gases de invernadero, calculada con información del periodo 1990 -1999.

En la figura 2 se presenta la variación, durante los últimos mil años, de tres de los principales gases de invernadero. Los da-

Tabla 1. Principales gases de invernadero, concentraciones y tasas de crecimiento (IPCC, 2001a).

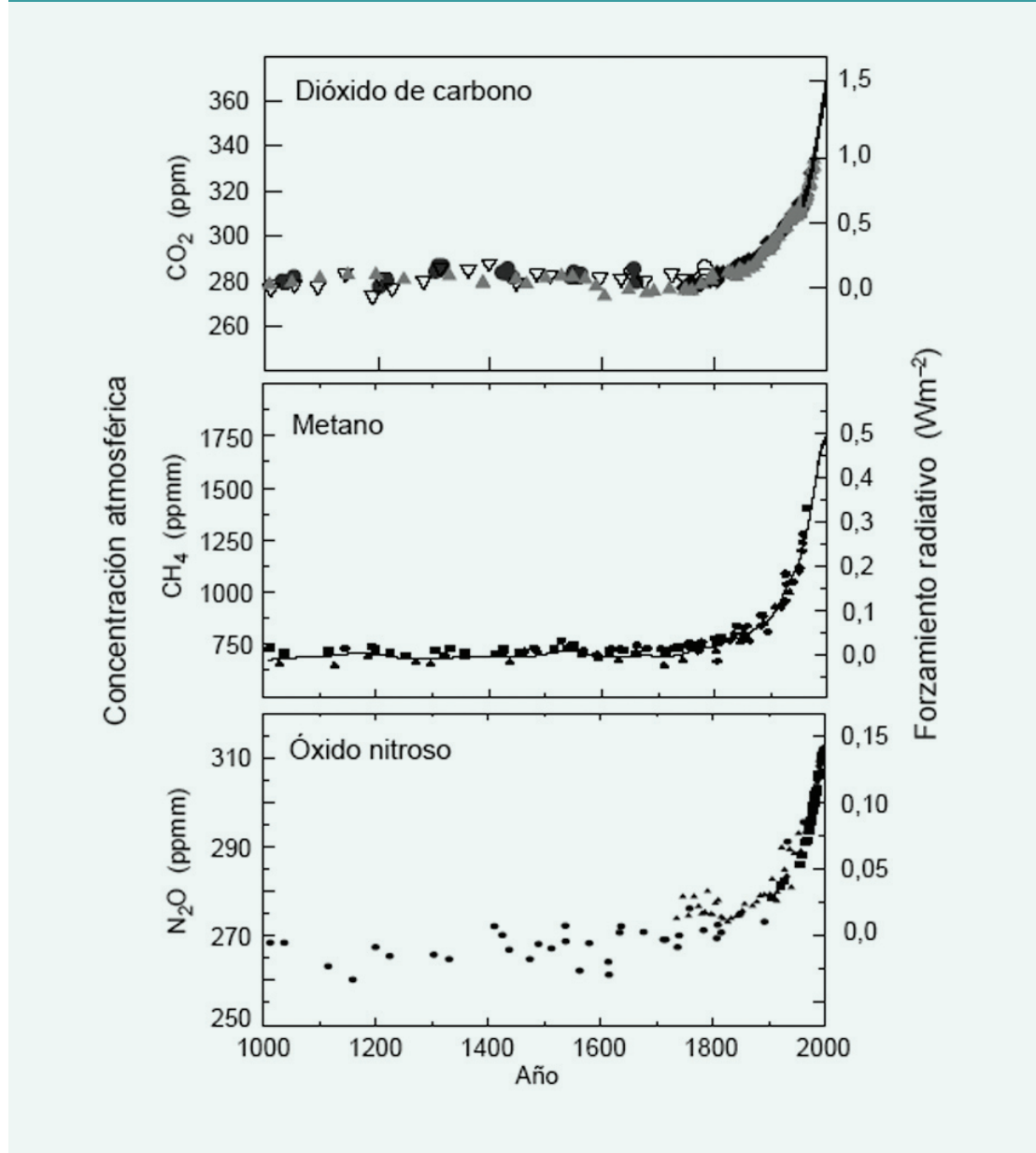
	CO_2 Bióxido de carbono	CH_4 Metano	N_2O Óxido nitroso	CFC-11 Cloro-fluoro- carbón 11	HCF-23 Hidrofluoro - carbón -23	CF_4 Perfluorocarbón
Concentración preindustrial	280 ppm	700 ppb	270 ppb	cero	cero	40 ppt
Concentración en 1998	365 ppm	745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Tasa de crecimiento anual	1.5 ppm	7.0 ppb	0.8 ppb	- 1.4 ppt	0.55 ppt	1 ppt
Años de vida en la atmósfera	5 - 200	12	114	45	260	> 50.000



tos más antiguos, antes de que se tuvieran mediciones directas, se deducen de observaciones en corazones de hielo extraídos en la Antártida o de nieve en Groenlandia. Estos valores se complementan con otros medidos directamente durante las últimas décadas. En el eje izquierdo se muestra el

valor del forzamiento radiativo (en *watts* por metro cuadrado) que se calcula producirán estos gases en la atmósfera. Es muy importante notar que su incremento coincide con el inicio de la era industrial y que durante el siglo XX su crecimiento fue prácticamente exponencial.

Figura 2. Incremento atmosférico de los principales gases de invernadero en los últimos mil años (IPCC, 2001b).



En clara correlación con estos cambios en los gases de invernadero en la atmósfera, se ha registrado un incremento notable en la temperatura media, como se observa en la figura 3. Si se reconstruye el registro de los últimos mil años, el

resultado será el presentado en la figura 4, en la que se percibe un incremento de temperaturas a partir del inicio de la era industrial, que se torna más notorio, casi exponencial, en las últimas décadas del siglo XX.

Figura 3. Variación medida de la temperatura atmosférica de 1860 a 2006, respecto del promedio del periodo 1961 a 1990 (Universidad East Anglia, U.K.).

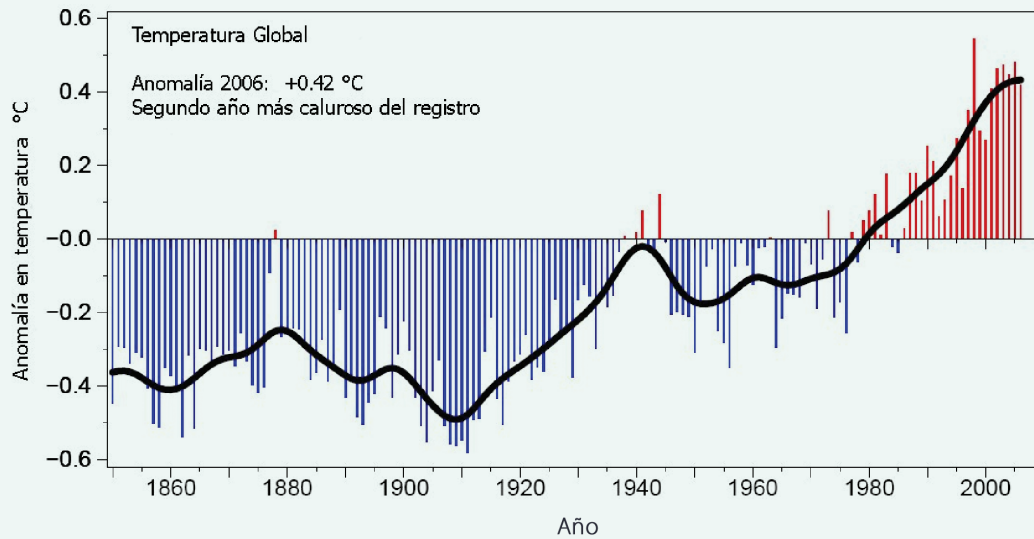
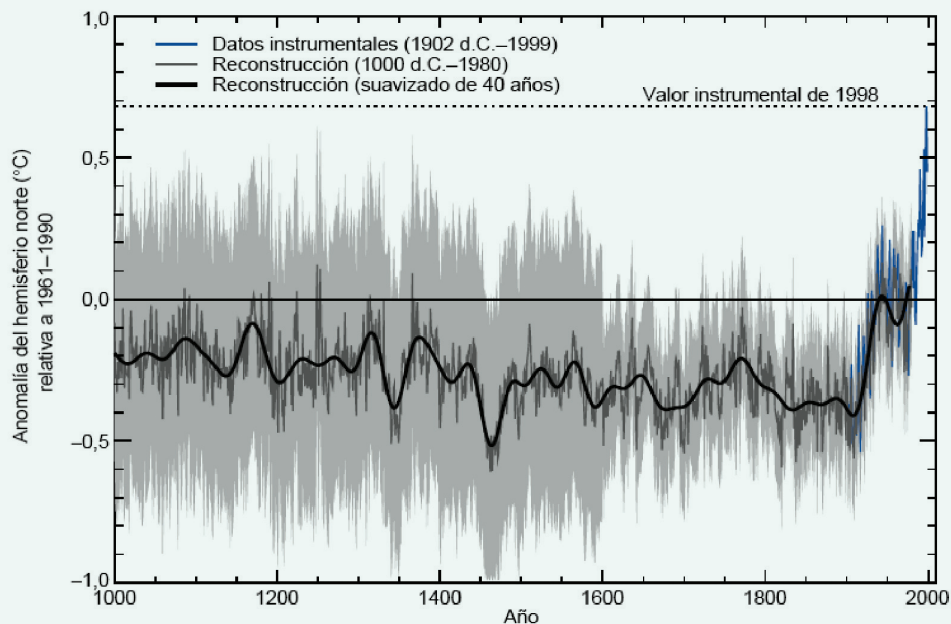


Figura 4. Anomalía de temperatura durante los últimos mil años, respecto del promedio del periodo 1961 - 1990.





Cuando comenzaron a realizarse los estudios de cambio climático, hubo una fuerte controversia respecto del origen de las modificaciones observadas en la temperatura: natural o antropogénico. Hoy esa discusión está superada y si bien se

considera que existe una componente natural, ésta es, sin embargo, muy pequeña para justificar los cambios percibidos en la temperatura terrestre en el periodo estudiado. El calentamiento atmosférico es producido por las actividades humanas.

Las actividades humanas incrementan las concentraciones de gases de invernadero

El bióxido de carbono CO_2 constituye el enlace indispensable que une al Sol con la Tierra por el intercambio bioquímico que permite que la energía luminosa se “incorpore” a los sistemas vivos. A partir de la energía solar y con la intervención de moléculas como la clorofila y el agua, participa en la construcción de alimentos a través de la fotosíntesis en las plantas verdes (autótrofos).

La energía contenida en los alimentos puede ser aprovechada dentro de la célula de la misma planta o de cualquier otro organismo (heterótrofo) mediante procesos de oxidación que permiten “quemar” esos compuestos a través del proceso de respiración y así, el CO_2 regresa a la atmósfera.

La fotosíntesis y la respiración son los procesos metabólicos que ha utilizado la Tierra por miles de años para hacer que circule el CO_2 (ciclo del CO_2). Se estima que, en condiciones naturales, el CO_2 tarda alrededor de trescientos años para completar este ciclo.

Buena parte del ciclo del carbono tiene lugar en el agua, donde enormes cantidades de organismos acuáticos fotosintéticos lo fijan en moléculas orgánicas, mientras que otros lo liberan mediante la respiración. El bióxido de carbono liberado pasa a formar compuestos como los carbonatos. Algunos científicos calculan que la mitad del CO_2 que circula se encuentra absorbido por el océano. Una gran cantidad de estos carbonatos se encuentra sobre el fondo marino “arrastrada” por los organismos que mueren y caen a las profundidades.

Una serie de reacciones carbonato \rightleftharpoons bicarbonato ocurren constantemente en el agua. Los sedimentos calcáreos contienen mucho de esos compuestos y así, el carbono permanece depositado en el fondo marino, pues estos compuestos se disuelven muy lentamente.

El ciclo natural del carbono, como sabemos, se ha alterado considerablemente como producto de la contaminación ambiental y la velocidad e intensidad con la que las plantas pueden utilizarlo en la fotosíntesis, por lo que no se puede evitar que este gas se acumule en la atmósfera.

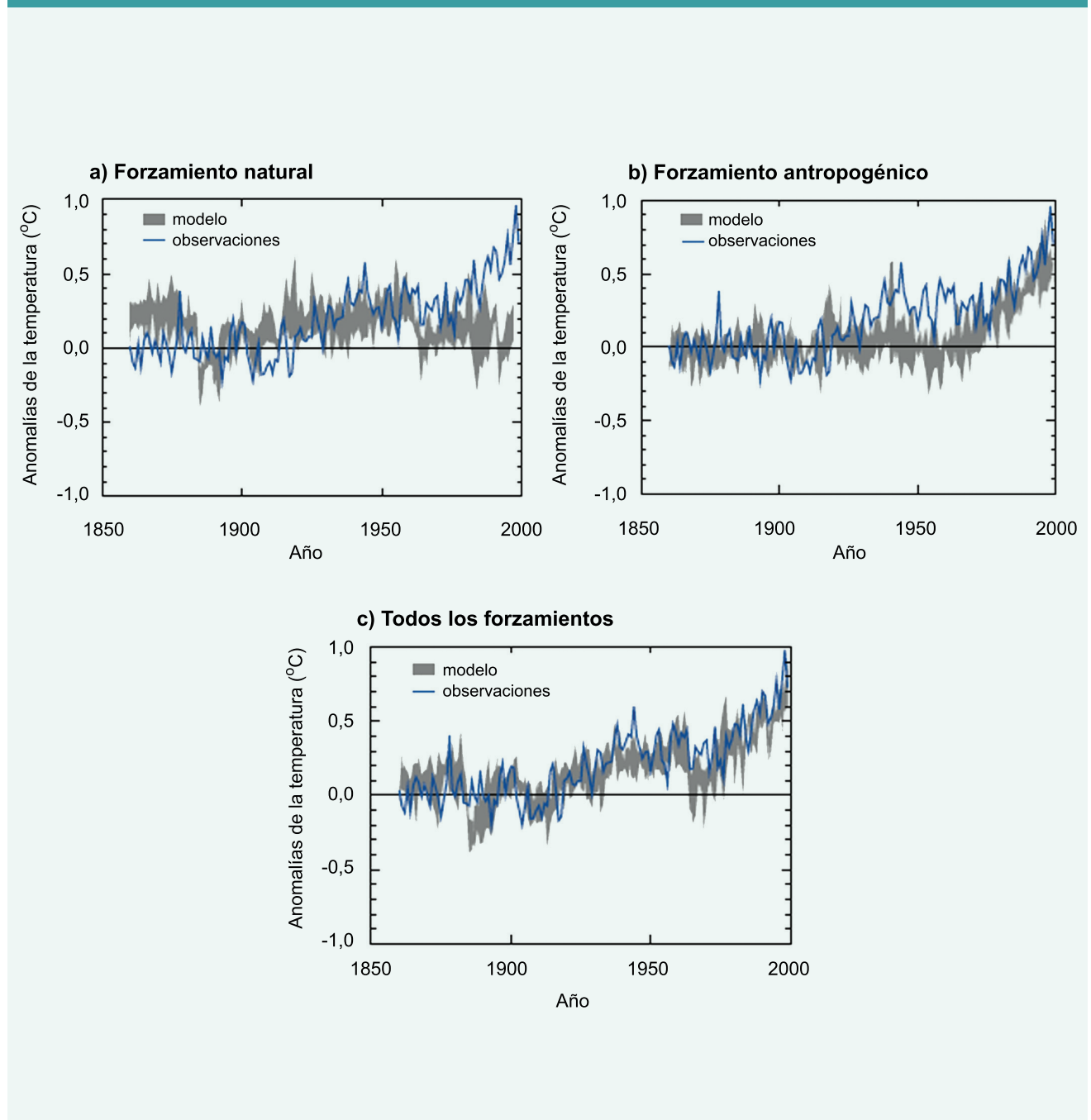
La quema de combustibles fósiles que mantuvieron por miles de años al carbono sedimentado en las profundidades y que ahora son utilizados como gas, petróleo y gasolina, ha puesto en circulación (en la atmósfera) enormes cantidades de carbono.



En la figura 5 se presenta una comparación, elaborada en el IPCC, de las variaciones predichas de acuerdo a los modelos de circulación global cuando son ocasionadas por: procesos naturales (a), efectos antropogénicos (b), y la suma de ambos efectos

(c). Puede observarse que los modelos de variación natural no explican los cambios de temperatura observados, lo cual ocurre cuando se suma el efecto del incremento de los gases de invernadero producido por las actividades humanas.

Figura 5. Simulación del cambio climático según sus causas (IPCC, 2001b).





Escenarios de cambio climático

Si los cambios en la temperatura global registrados desde la era preindustrial son producidos principalmente por el incremento en los gases de invernadero, es evidente que en el futuro inmediato, al final del presente siglo, el clima global dependerá de la capacidad de las sociedades de limitar o disminuir el consumo de combustibles fósiles y, en general, de controlar las emisiones de los gases de invernadero, así como de crear condiciones para que sean absorbidos mediante procesos naturales, principalmente aquellos relacionados con la actividad desarrollada por la vegetación.

Como no es factible determinar con precisión cuál será la modificación de los volúmenes de gases de invernadero en el futuro, debido a que esta depende de variables sociales y económicas imposibles de prever con exactitud, se suelen construir escenarios que tomen en cuenta las condiciones probables para entonces. Cada escenario es, desde este punto de vista, una visión de un mañana asequible, obtenida de manera científica, sobre la base de modelos conocidos y de las combinaciones más probables

de emisiones de gases de invernadero en el porvenir.

En 1996 el IPCC inició el desarrollo de nuevos escenarios de emisiones, para actualizar los preparados en 1992, conocidos como Escenarios IS92.

Se construyeron cuatro familias de escenarios, cada una de ellas fundamentadas en una descripción de las condiciones en las que posiblemente se encuentre el mundo en un futuro. En inglés se utiliza el término *storylines*, cuyo concepto se refiere a la trama de un relato. Estos nuevos escenarios son conocidos en términos genéricos como Escenarios IE-EE.

La familia A1 de escenarios describe un mundo caracterizado por un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su máximo a mediados del presente siglo, empieza a declinar a partir de entonces y adopta tecnologías más eficientes. Esta familia de escenarios se subdivide conforme a las tecnologías a usar: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), con fuentes alternas de energía (A1T), y con un



balance entre diferentes fuentes de energía (A1B). Este último escenario es uno de los más utilizados en las simulaciones, pues se le considera entre los más probables.

La familia A2 de escenarios se refiere a un mundo venidero caracterizado por un incremento continuo de la población, aunque con un crecimiento económico mucho menor que en los escenarios A1. Los escenarios A2 son pesimistas en cuanto a que se mantiene un elevado aumento de las emisiones de gases de invernadero, en particular de dióxido de carbono.

La familia B1 de escenarios describe un mañana en el que la población, como en los escenarios A1, alcanza su máximo a mediados del siglo XXI, con un crecimiento económico acelerado, pero orientado a los servicios y las tecnologías de la información, con un uso menor de materias primas y con un aprovechamiento sustentable de los recursos, pero aún sin tomar medidas específicas respecto del clima.

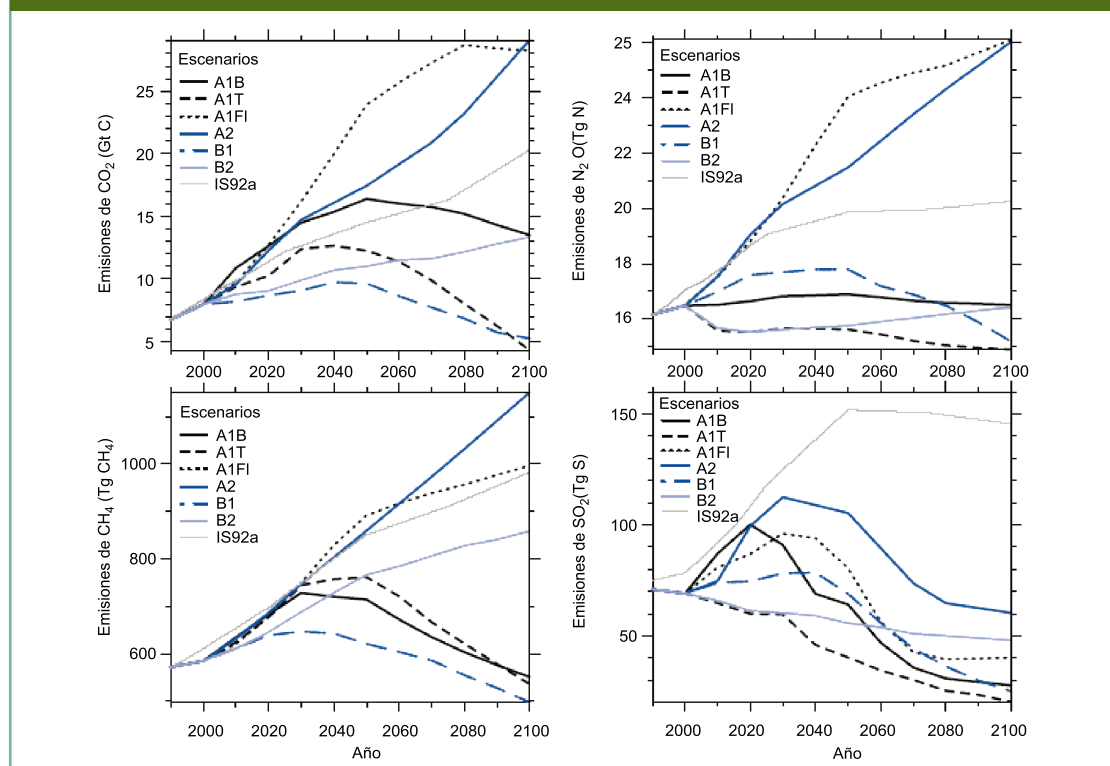
Finalmente, la familia B2 de escenarios describe un porvenir en el que se asumieron

previsiones locales y regionales, para la protección del medio ambiente, con un crecimiento de la población menor que en los escenarios A1 y B1. Este escenario se percibe muy optimista, tal como se han observado las tendencias hasta ahora.

Para ninguno de los escenarios se asume el cumplimiento pleno de los compromisos tanto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, como de los de Kyoto.

En los informes de 2001 del IPCC, no se tomaron en cuenta todas las combinaciones de escenarios, pues estas estuvieron aprobadas hasta el año 2000, así que se realizaron cálculos y simulaciones para un escenario de referencia de cada uno de los grupos, A1B, A2, B1 y B2. Posteriormente, para incluir posibles cambios favorables en la tecnología, también se hicieron simulaciones con otras dos variaciones de la familia A1, denominados A1F I y A1T. En las simulaciones del reporte 2007 del IPCC, como se verá más adelante, se analizaron sobre todo los escenarios A1B y A2.

Figura 6. Emisiones futuras de gases de invernadero, según los escenarios IE-EE del IPCC. Se incluye también el escenario IS92a, con fines de comparación (IPCC 2001b).



En la figura 6 se presentan las emisiones pre-
visibles de gases de invernadero, conforme a
estos escenarios de cambio climático.

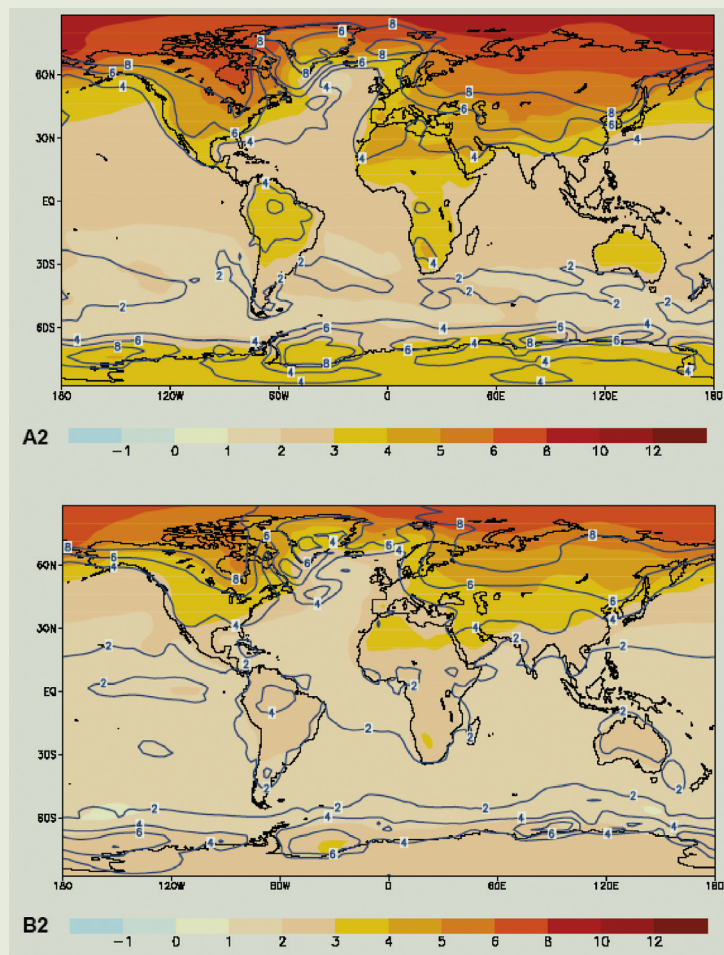
Como puede observarse, las variaciones po-
sibles de emisiones de gases de invernadero
son muy amplias, desde situaciones en que
disminuirán respecto a los valores actuales,
como en los escenarios A1T y A1F I, hasta
otras en las que irán a la alza de manera im-
portante, como en el escenario A2. Los ex-
pertos piensan que la variación probable de
temperatura media del planeta hacia el año
2100 será de entre 1.5 y 4.5°C, correspon-
diente a un incremento del 100% en la con-
centración atmosférica de CO₂. La diferencia
entre ambos extremos de temperatura se
debe a la incertidumbre en los modelos de
simulación cuya principal causa es el efecto
que tendrá el aumento de vapor de agua en

la atmósfera ocasionado por el calentamien-
to global y que, a su vez, lo retroalimenta en
una magnitud difícil de calcular.

Conforme al reporte 2007 del IPCC, la tem-
peratura global crecerá, en el escenario
A1B, entre 1.7 y 4.4°C al final del siglo XXI;
y entre 2.0 y 5.4°C en el escenario A2 (IPCC
2007b).

Naturalmente, el cambio en la temperatu-
ra no será uniforme, sino que afectará más
severamente a las regiones que se encuen-
tran en latitudes altas, produciendo en al-
gunos sitios situaciones de calor muy supe-
riores al promedio esperado. En la figura 7
se muestran los resultados de temperatura
obtenidos de la simulación con un modelo
de circulación general para los escenarios A2
y B2.

Figura 7. Cambios en la temperatura previstos conforme a los escenarios A2 y B2. Se comparan los promedios de temperaturas de 1970-1990 con los estimados en 2070-2100, calculados con un modelo de circulación general (IPCC, 2001b).

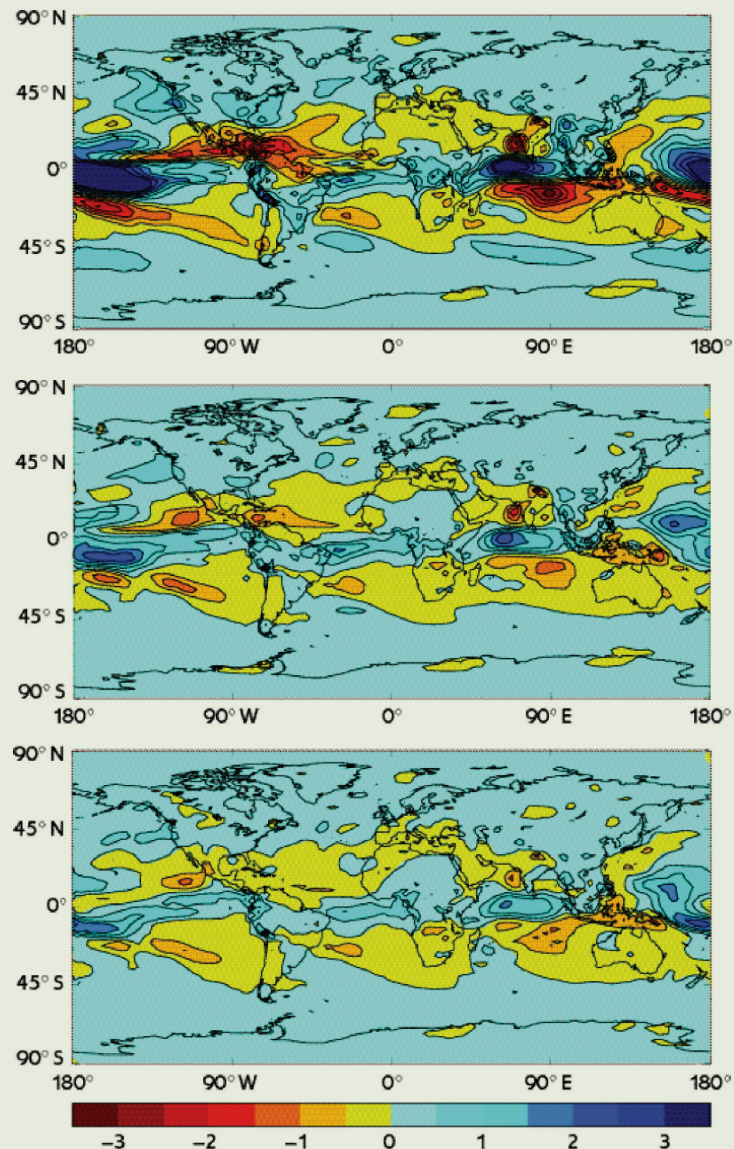


Es de notar que en ambos casos, las temperaturas previstas para México son más altas a las registradas, en promedio, en el resto del mundo. En el caso del escenario B2 las temperaturas en México se incrementarían entre 2 y 4°C, y en el caso del escenario A2, entre 4 y 6°C. Desde luego, estos elevados valores tendrían efectos muy importantes sobre el comportamiento hidrológico de la mayoría de las cuencas y sobre los usos del agua.

Con los resultados de los modelos de temperatura, se calculan los posibles cambios en

la precipitación. En general es previsible un aumento en la precipitación y en la cantidad de vapor de agua en la atmósfera en latitudes altas y una disminución en latitudes medias. Es decir, en el ámbito regional habrá de registrarse alzas en algunos sitios, y disminuciones en otros, por lo que, en este aspecto, es necesario proceder a estudios más detallados a escala regional. Como se muestra en la figura 8 (Met Office, 1999) los cambios esperados son de diferente magnitud, dependiendo de los niveles de estabilización del CO₂ que se alcancen en el futuro.

Figura 8. Cambios hacia 2080 en la precipitación (en mm/día) para escenarios sin mitigación (arriba) y con estabilización a 750 ppm (en medio) y 550 ppm (abajo) de CO₂ (Met. Office, 1999).



Protocolo de Kyoto y Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático

El Protocolo de Kyoto de 1997 tiene los mismos objetivos, principios e instituciones que la Convención Marco, pero se refuerza a ésta de manera significativa, ya que a través de él las Partes –países– se comprometen a lograr objetivos individuales y jurídicamente vinculantes para limitar o reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Sólo las Partes en la Convención que sean también Partes en el Protocolo (es decir, que lo ratifiquen, acepten, aprueben o se adhieran a él) estarán obligadas por los compromisos del mismo. Los objetivos individuales para las Partes se enumeran en el Protocolo de Kyoto. Entre todos suman un total de recorte de las emisiones de gases de efecto invernadero de al menos el 5% con respecto a los niveles de 1990 en el periodo de compromiso de 2008-2012.

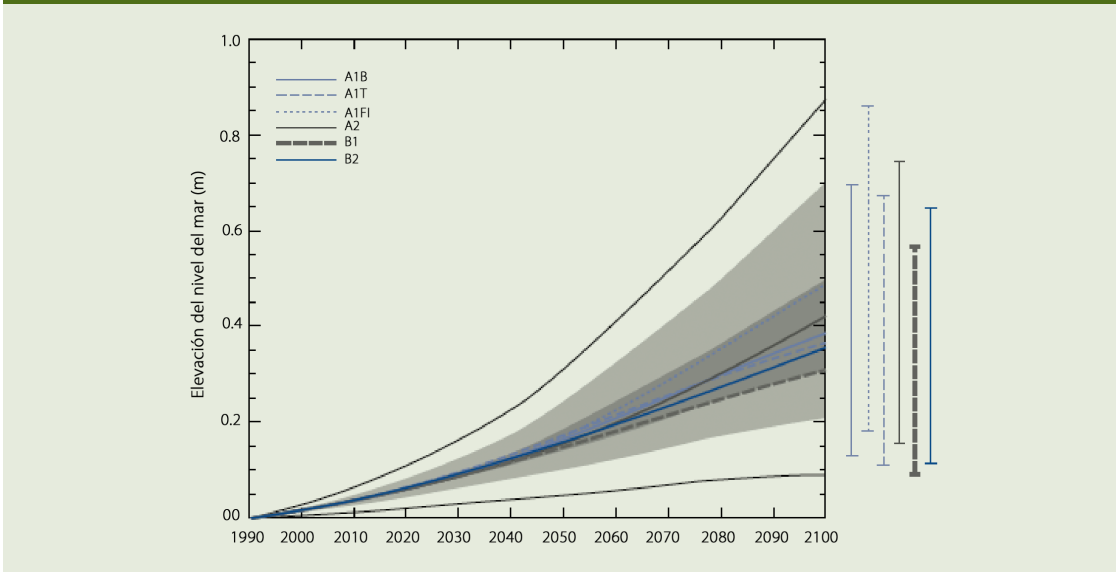
Esta figura es útil también para demostrar la dificultad de predecir los efectos del calentamiento global en la precipitación en México, pues dependiendo del nivel de estabilización del CO₂ la precipitación puede disminuir más en diversas zonas de nuestro país.

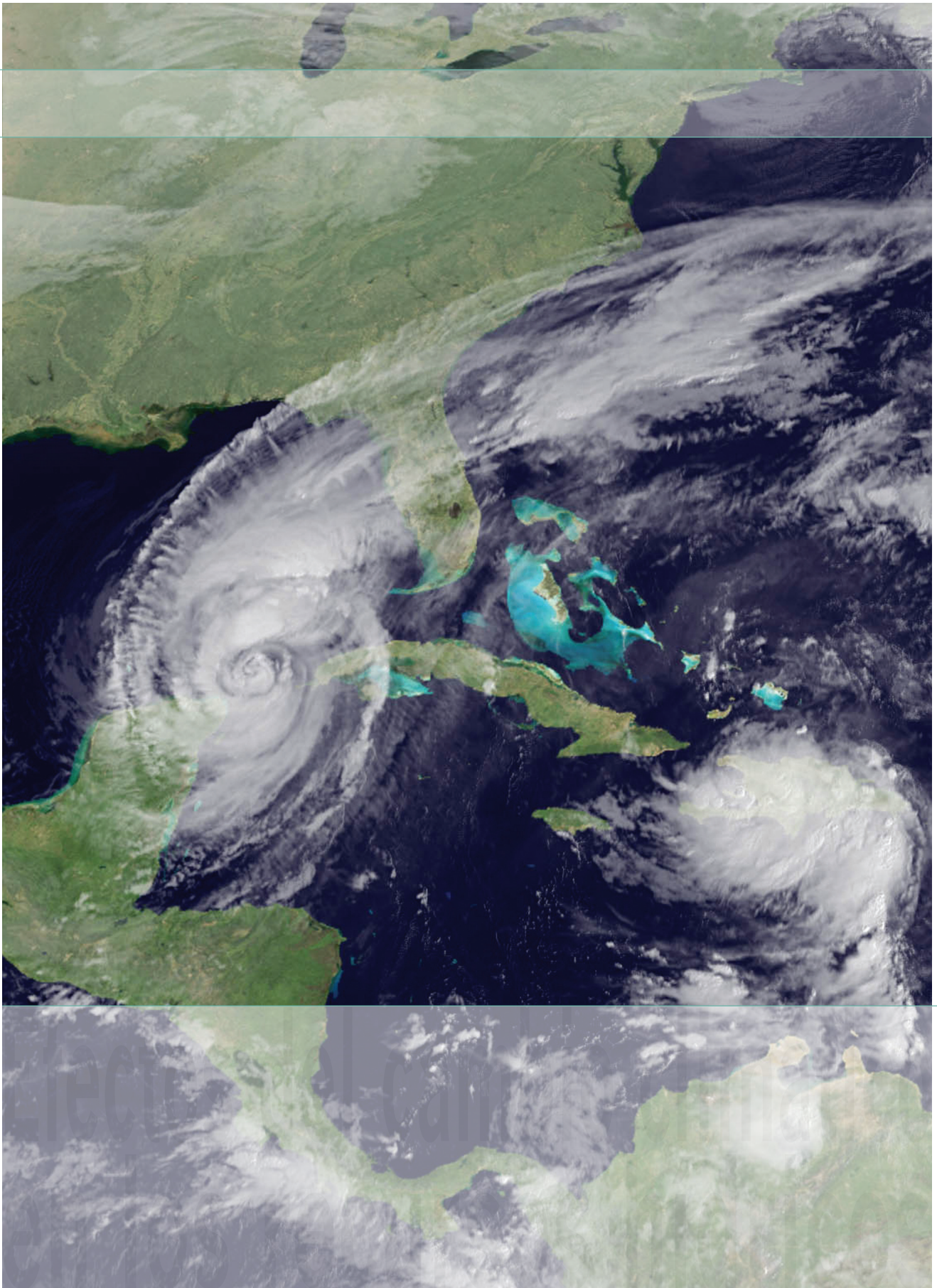
En el escenario sin mitigación, se registrarían disminuciones de precipitación de hasta 3 mm/día en algunas regiones; mientras que en los escenarios de balance de CO₂, desafortunadamente más improbables, estas declinaciones serían menos significativas.

Por ser uno de los propósitos principales de este texto, el tema se abordará con mayor detalle más adelante.

Otro de los efectos previsibles del cambio climático que afectará a los recursos hídricos y a los ecosistemas acuáticos en las zonas costeras, será la sobreelevación del nivel del mar. De acuerdo con las estimaciones del IPCC, que se presentan en la figura 9, el mar incrementaría su nivel entre 0.4 y 0.8 m sobre el valor de 1990, debido principalmente a la expansión térmica.

Figura 9. Sobreelevación prevista del nivel medio del mar entre los años 1990 y 2100, conforme a estimaciones del IPCC (2001b).





Efectos del cambio climático en los recursos hídricos

Desde el principio de las investigaciones sobre cambio climático, se observó que la modificación de la temperatura media del planeta acarrearía importantes impactos en el ciclo hidrológico ya que de ella dependen varias de sus principales componentes como son la precipitación y la evaporación, mismas que a su vez tienen efectos en el escurrimiento, en el contenido de humedad de los suelos y en la recarga de los acuíferos, principalmente.

Asimismo, el cambio climático afectará la demanda de agua, sobre todo la de los ecosistemas y la de la agricultura que es, actualmente, el principal usuario en el mundo. También se observarán cambios en la calidad del agua en los ríos y, con mayor intensidad, en los lagos, humedales y ecosistemas costeros.

Puesto que el agua es el motor de la vida, es de esperarse que los cambios en el ciclo

hidrológico produzcan a su vez modificaciones de consideración en los ecosistemas y en la salud, cuyos efectos están fuera del alcance de este trabajo y se mencionarán ocasionalmente, cuando se asocien directamente con alguno de los impactos esperados sobre los recursos hídricos.

La magnitud de estos cambios a escala regional, conviene asentarlo desde ahora, es objeto aún de controversia, debido a la falta de datos y modelos apropiados y que carecen de la suficiente calibración.

Es necesario anotar también, antes de entrar en detalle, que los recursos hídricos están ya sujetos a grandes presiones debido, fundamentalmente, al crecimiento poblacional; al desarrollo social y económico que genera mayores demandas, sobre todo de uso industrial y de servicios; y a los cambios en el uso del suelo y alteraciones en las zonas de captación de las cuencas, ocasionados principalmente



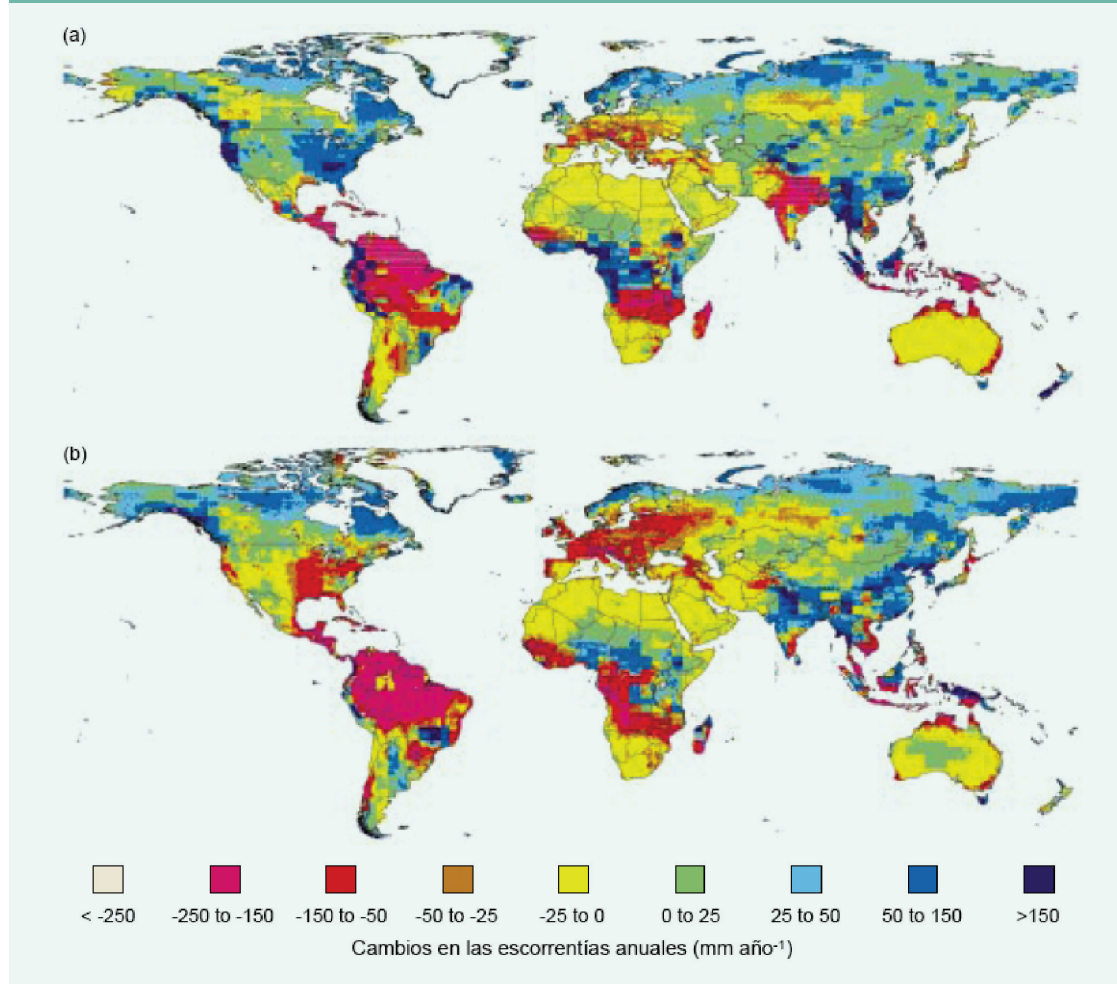
por la deforestación y la erosión. A estos efectos hay que añadir la incapacidad institucional en amplias zonas del planeta para lograr una razonable gobernabilidad de los recursos hídricos. Por todo ello, los probables efectos del cambio climático serán un ingrediente más que dificultará, de manera definitiva en muchos casos, el uso sustentable del agua.

El primer efecto del calentamiento global en una variable hidrológica ya ha sido mencionado: los cambios calculados en la precipitación que se muestran en la figura 8. Estos resultados se obtienen de modelos de circulación general que no tienen la resolución necesaria para obtener conclusiones en cuencas hidrológicas específicas,

pero permiten estimar de forma cualitativa las tendencias generales. Así, aunque existen diferentes tendencias en cada región del mundo, se puede decir que en general se espera un incremento de la precipitación en las latitudes altas del hemisferio norte y un decremento de la precipitación en las latitudes medias, zonas tropicales y subtropicales. Una vez más ha de enfatizarse la gran diferencia en los valores esperados entre un escenario sin medidas de mitigación y aquellos en que se limita el incremento de gases de invernadero.

Como consecuencia de las variaciones en la precipitación, combinadas con cambios en la temperatura, en la humedad del suelo y en la evaporación; son de esperarse mo-

Figura 10. Efectos del cambio climático en el escurrimiento, en mm/año. Cambios proyectados al año 2050, respecto de los valores medios registrados entre 1961-1990 (IPCC, 2001c).





dificaciones de consideración en el escurrimiento. En la figura 10 se presentan las alteraciones previstas en el escurrimiento hacia el año 2050, con respecto a las observadas en el periodo 1961-1990; calculadas con un escenario de incremento anual del CO₂ del 1 %, que es menor al actual. Sin que sea una correspondencia lineal, se esperan cambios en el escurrimiento semejantes a los previstos en la precipitación. De esta manera, se prevén incrementos en el escurrimiento en las latitudes altas y en la región del subcontinente índico y en Indochina. En Norteamérica se visualizan disminuciones generales de menor magnitud del escurrimiento en la región central continental y, de mucha mayor relevancia, en la cuenca del Mississippi, en el sur de México y en América Central.

También es de llamar la atención la drástica disminución del escurrimiento esperada en la región norte del subcontinente de

América del Sur, así como prácticamente en toda Europa.

Desde luego, estas disminuciones serán de mayor o menor relevancia según sea la condición en que se encuentre cada una de las cuencas, algunas de ellas ya en franco estado de escasez. Asimismo, será muy importante la capacidad de los países e instituciones para enfrentar estas disminuciones mediante acciones de adaptación, como por ejemplo el manejo de la oferta y la demanda de agua.

La figura 10 reproduce los cálculos de Arnell (1999), citados por el IPCC, quién obtuvo estos resultados utilizando un modelo hidrológico a macro-escala, con una resolución espacial de 0.5x0.5°, que no reproduce adecuadamente la compleja fisiografía de las cuencas hidrológicas. Al respecto, el IPCC ha recomendado, desde su segundo reporte, que se reali-

cen esfuerzos de modelación a escala de cuencas, a fin de disminuir la incertidumbre que introducen los cálculos basados en la escala utilizada por los modelos de circulación global. En México no se ha realizado aún este tipo de estudios.

Debido a las dificultades inherentes a la modelación del proceso lluvia-escurrimiento y al costo de calibración de estos modelos, se han llevado a cabo muy pocos estudios en cuencas específicas. En el capítulo 4 del informe de impactos y adaptación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001: páginas 203-204), se presenta una tabla-resumen de los estudios de impacto verificados en la cuenca de algunos de los ríos más importantes del mundo. Es de notar que prácticamente no existen documentos de este tipo para Latinoamérica.

Otra de las variables del ciclo hidrológico que se verá afectada por el cambio climático es la evaporación, que incluye tanto la que se produce desde el suelo, como la que se origina en los lagos o en la vegetación. Se acepta que la evaporación depende, entre otros factores, de la temperatura, por lo que la primera se incrementará conforme aumente la segunda. No obstante, la magnitud de estos cambios dependerá también de otras variables, tales como la cobertura vegetal, el viento, el albedo y el contenido de humedad del aire, excepto en zonas áridas, donde estas condiciones afectan muy poco a la evaporación.

El contenido de humedad del suelo también se verá significativamente influido por el cambio climático. En general, disminuirá con el aumento de la temperatura ambiente, pero la magnitud precisa de este fenómeno depende de otras varia-

bles, fundamentalmente del tipo de suelo y de la cobertura vegetal. La disminución del contenido de humedad es de particular importancia en las regiones áridas o semiáridas, ya que a menor humedad del suelo, menor capacidad de la cuenca para convertir la lluvia en escurrimiento. Dicho en otros términos, menor volumen de lluvia efectiva y menor cantidad de agua disponible tanto en los cauces como en los acuíferos. Finalmente, la recarga de los acuíferos, de la que depende el abastecimiento de agua de casi todas las ciudades en México, cambiará siguiendo, en general, el mismo patrón de la precipitación, pero en mayor o menor magnitud de acuerdo a su tipo (más o menos torrencial), de la humedad del suelo y de la cobertura vegetal, principalmente.

Los cambios en la precipitación no serán, desde luego, perceptibles solamente en su valor medio anual, sino también en sus patrones de ocurrencia temporal: habrán de registrarse variaciones en los escurrimientos torrenciales o avenidas, así como en la frecuencia e intensidad de las sequías. Los modelos disponibles prevén más tormentas y lluvias torrenciales en algunas regiones, sequías en otras y, en general, una mayor variabilidad climática (*US National Assessment, 2003*).

Si bien el incremento en la frecuencia de avenidas e inundaciones es posible en algunas regiones del mundo, no se pueden aún determinar cuantitativamente los efectos por cuenca. No obstante, la naturaleza misma parece dar la razón a los modelos que proponen un incremento de tormentas e inundaciones. Basta citar el número de huracanes de gran intensidad que se produjo en el Atlántico norte en 2004 y, aún más, la aparición por primera vez en la historia de un huracán en el





Atlántico sur, que impactó las costas de Brasil en marzo del mismo 2004¹. Científicos de la Organización Nacional para los Océanos y la Atmósfera de los Estados Unidos (NOOA, por sus siglas en inglés) han encontrado evidencia de la intensificación del ciclo hidrológico, como previsiblemente ocurrirá cada vez más con el calentamiento global. No obstante, estas conclusiones no pueden considerarse aún como definitivas, dado que la cantidad de registros analizados es aún pequeña (Easterling *et al*, 2000).

Es de esperarse que las sequías hidrológicas aumenten en las regiones en las que se

prevén disminuciones en la precipitación media. Los resultados de las simulaciones indican que se producirían cambios en la frecuencia, intensidad y duración de los fenómenos extremos. Los modelos predicen, por ejemplo, un aumento en los días calurosos, en las olas de calor y en las precipitaciones torrenciales, así como una disminución de los días fríos y heladas. De acuerdo con el Resumen para Responsables de Políticas del IPCC (2001c), "...una gran cantidad de los cambios proyectados podrían provocar un aumento del riesgo de inundaciones y sequías en muchas regiones e impactos predominantemente adversos en los sistemas ecológicos, los sectores socioeconómicos y en la salud humana".

1 Hasta ahora, se creía prácticamente imposible la ocurrencia de un huracán en el hemisferio sur.

Figura 11. Efectos del cambio global de eventos extremos y su probabilidad (IPCC, 2001 d).

Cambios proyectados durante el siglo XXI en fenómenos climáticos	Ejemplos representativos de los impactos proyectados ^b (Todos de confianza alta en que se producirán en algunas zonas ^a)
Extremos simples	
Temperaturas máximas; más días calientes y olas de calor en casi todas las zonas continentales (muy probable ^a)	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor incidencia de muertes y enfermedades graves en grupos de personas de edad avanzada y pobres de zonas urbanas • Mayor estrés térmico en el ganado y la vida silvestre • Cambios en los destinos turísticos • Mayor riesgo de daños a diversos cultivos • Mayor demanda de refrigeración eléctrica y menor fiabilidad del abastecimiento energético
Temperaturas mínimas mayores (en aumento); menos días fríos, días de heladas y olas de frío ^d en casi todas las zonas continentales (muy probable ^a)	<ul style="list-style-type: none"> • Menor mortalidad y morbilidad humanas relacionadas con el frío • Menor riesgo de daños a diversos cultivos, y mayor riesgo para otros • Alcance y actividades ampliados de algunos vectores de plagas y enfermedades • Menor demanda energética para calefacción
Sucesos de precipitaciones más intensos (muy probable ^a en muchas zonas)	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores daños de crecidas, desprendimientos y deslizamientos de tierras y avalanchas • Mayor erosión del suelo • Las mayores escorrentías de las crecidas pueden aumentar la recarga de algunos acuíferos de llanuras inundables • Mayor presión sobre los sistemas gubernamentales y privados de seguros contra crecidas y de socorro en casos de desastre
Extremos complejos	
Veranos más secos en la mayor parte de las zonas continentales interiores de latitud media y riesgos conexos de sequías (probable ^a)	<ul style="list-style-type: none"> • Menor rendimiento de los cultivos • Mayores daños a los cimientos de los edificios causados por degradación de los terrenos • Menor cantidad y calidad de los recursos hídricos • Mayores riesgos de incendios forestales
Aumento de la intensidad pico del viento en casos de ciclones tropicales, y en la intensidad media y pico de las precipitaciones (probable ^a en algunas zonas) ^e	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores riesgos para la vida humana, de epidemias de enfermedades infecciosas y muchos otros • Mayor erosión de las costas y daños a los edificios y la infraestructura costeros • Mayores daños a los ecosistemas costeros, como arrecifes de coral y manglares
Intensificación de las sequías y las crecidas relacionadas con sucesos de El Niño en muchas regiones diferentes (probable ^a) (véase también sucesos de precipitaciones intensas y sequías)	<ul style="list-style-type: none"> • Menor productividad de tierras agrícolas y de pastoreo en regiones susceptibles a crecidas y sequías • Menor potencial hidroeléctrico en regiones susceptibles a sequías
Mayor variabilidad de las precipitaciones monzónicas de verano en Asia (probable ^a)	<ul style="list-style-type: none"> • Crecidas y sequías de mayor magnitud y mayores daños en zonas templadas y tropicales de Asia
Mayor intensidad de las tempestades en zonas de latitud media (hay poco acuerdo entre los modelos actuales) ^d	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores riesgos para la vida y la salud humanas • Mayores pérdidas de bienes e infraestructura • Mayores daños a los ecosistemas costeros

a El término *probable* se refiere a un juicio de la estimación de la confianza utilizando en el TIE GT I: muy probable (de 90% de posibilidad); probable (de 66% a 90% de posibilidad). A menos que se indique otra cosa, la información sobre fenómenos climáticos está tomada del Resumen para Responsables de Políticas del TIE GT I.

b Estos impactos se pueden atenuar aplicando medidas de respuestas apropiadas.

c En base a información de capítulos del presente informe; confianza *alta* se refiere a probabilidades entre 67 y 95%, como se describe en la nota 6 del Resumen para Responsables de Políticas del TIE GT I.

d Información tomada de TIE GT I, Resumen técnico, sección F.5.

e Es posible que se produzca cambio en la distribución regional de los ciclones tropicales, pero no se ha establecido.

En la figura 11 se reproduce la tabla-resumen del IPCC donde se muestran los principales efectos de eventos extremos.

Puede notarse que entre los muy probables, entendidos estos como los que tienen entre 90 a 99% de posibilidad de

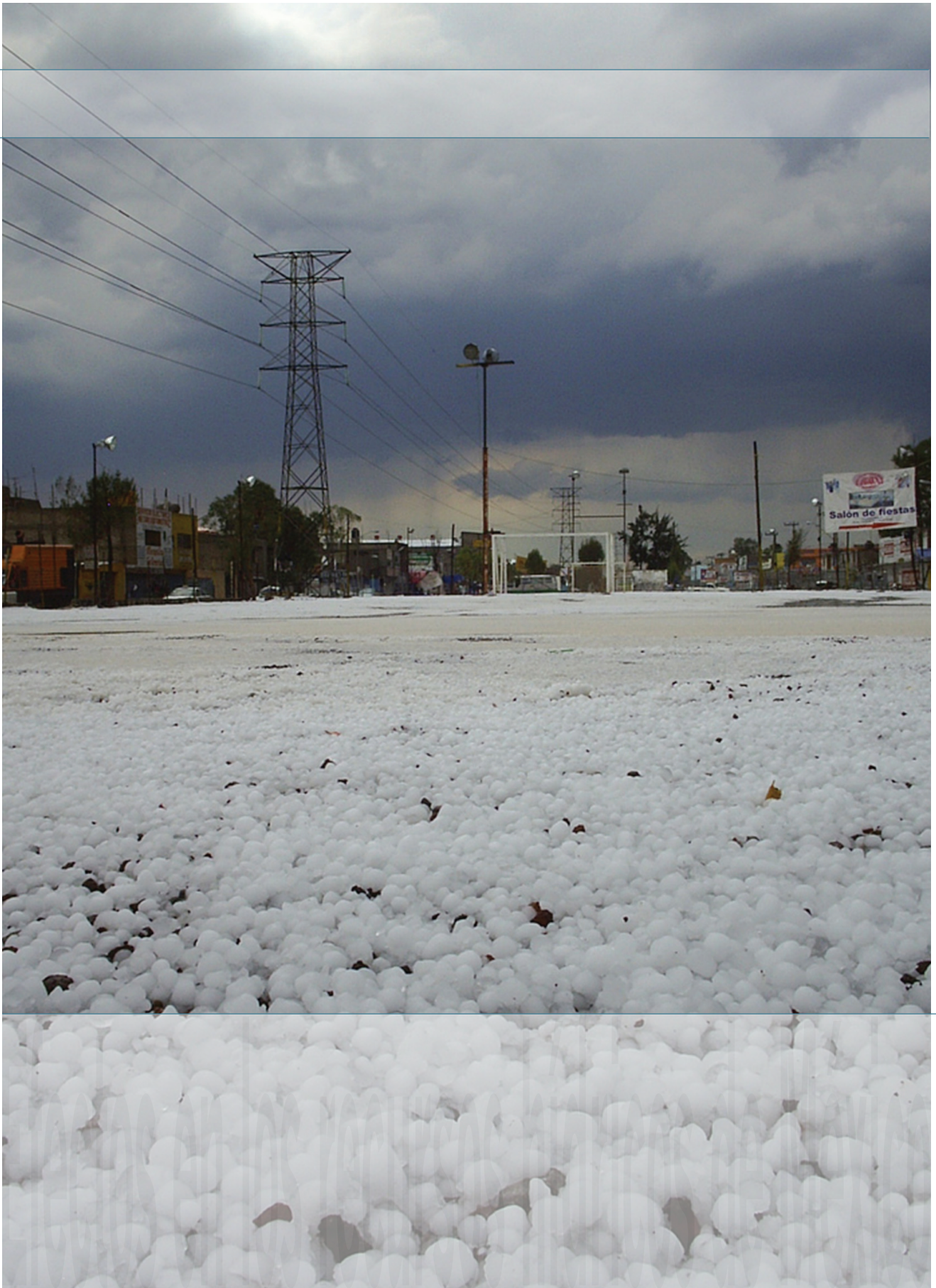


ocurrencia, en el caso de calentamiento global, se encuentran las precipitaciones intensas. Entre los probables, es decir con una factibilidad de entre 66 y 99% de ocurrencia, se prevén veranos más secos en latitudes medias (donde se encuentra México), con el riesgo de sequías más frecuentes e intensas. Asimismo, se multiplicaría el poder destructivo de los ciclones tropicales, aunque no así su número.

Además de los efectos en la disponibilidad de agua, se prevén impactos importantes en su calidad. En primer término, aquellos ocasionados por la disminución de escurrimiento y, en segundo lugar, los provocados por el incremento de la temperatura, que disminuye la capacidad de los cuerpos de agua para retener oxígeno. Una menor cantidad de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua significa una mayor eutroficación, lo que de hecho ya es un problema por el exceso de nutrientes

que la actividad humana ha vertido a la mayoría de los lagos y ríos del planeta. La calidad del agua bajaría también debido al mayor consumo de oxígeno por parte de las plantas, inducido por una mayor temperatura ambiente.

Uno de los principales y más notorios efectos del calentamiento global, que ya se observa en diferentes regiones, será la disminución de las capas de nieve más voluminosas del planeta, en primer lugar de los glaciares. A primera vista, esto no afectaría a México, sin embargo varios de los flujos transfronterizos que recibe nuestro país desde las cuencas estadounidenses, provienen de esta fuente de escurrimiento. En particular, el del río Colorado, del que depende la economía del estado de Baja California, se genera en las montañas Rocallosas en los Estados Unidos cuyas capas de hielo, por cierto, se han reducido en las últimas décadas.



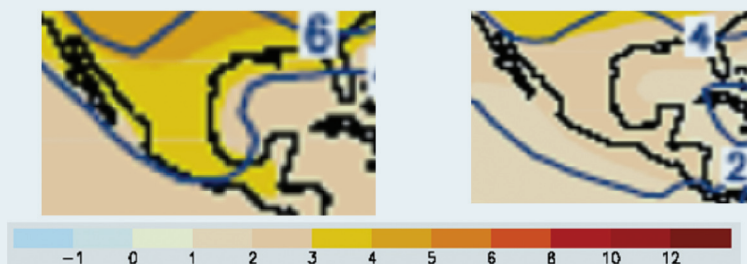
Efectos en los recursos hídricos de México

Una primera aproximación al análisis de los efectos del calentamiento global en los recursos hídricos de México, es la observación de los resultados de los modelos de cambio global (MCG), en particular los publicados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

Conforme a los resultados de los modelos antes apuntados, en México se prevén in-

crementos significativos en la temperatura, mismos que ocurrirán durante el presente siglo. Así, en el escenario A2 (alto), se verían incrementos de entre 4 y 6°C y en el escenario B2 (medio), de entre 2 y 4°C como se muestra en la figura 12, obtenida con una ampliación de los resultados de la figura 7, para mostrar la limitada resolución de los modelos de escala global para simular efectos regionales. En ambos escenarios estos incrementos en la temperatu-

Figura 12. Cambio en la temperatura en México, en °C. Ampliación de resultados de la figura 7, previstos conforme a los escenarios A2 (izquierda) y B2 (derecha). Se comparan los promedios de temperaturas de 1970-1990 con los estimados en 2070-2100, calculados con un modelo de circulación general (IPCC, 2001b).



ra son lo suficientemente elevados como para ocasionar efectos severos en el escurecimiento y en el consumo de agua de cultivos y ecosistemas. Si, además, se observa que las mayores alteraciones ocurrirán en la región norte, donde solo se practica la agricultura de riego, se puede anticipar la gravedad de los efectos del calentamiento global en México. Como ya se ha mencionado, un defecto de estos modelos es la baja resolución de los resultados, que impiden un análisis regional más detallado. Posteriormente se presentarán resultados con mayor resolución.

Los escenarios A2 y B2 han sido construidos tomando en cuenta ciertas tendencias económicas, demográficas y tecnológicas, que pueden considerarse más o menos probables. Otro enfoque en la construcción de escenarios futuros es prever que se presentará algún grado de mitigación en la emisión de gases de invernadero, sin tomar en cuenta las condiciones sociales que lo producirán. Así, se establece simplemente un nivel de estabilización en la concentración de CO₂ y se calculan, mediante modelos de circulación global, los cambios esperados

en las variables climáticas en diferentes horizontes en el tiempo.

En la figura 12a se reproducen las más recientes estimaciones publicadas por el IPCC para Norteamérica. Como puede observarse, con mayor resolución, para el escenario A1B, las temperaturas promedio anual en México se incrementarían entre 3.5 y 4°C en la región norte hacia el final del siglo XXI. Los valores extremos registrados en verano serían mayores.

De acuerdo con los resultados del Met Office (Met Office, 1999), reproducidos en la figura 13, en el caso de un escenario sin mitigación, el incremento esperado de temperatura en el territorio mexicano sería de entre 5 y 6°C. En el caso de adoptarse algunas medidas de mitigación que establezcan el contenido de CO₂ atmosférico en 750 ppm (aproximadamente el doble del registrado en 1990), en el año 2080 la temperatura en México se incrementaría en alrededor de 4°C, lo cual es consistente con las predicciones recientes del IPCC. Finalmente, si se estabilizara el contenido de CO₂ atmosférico en 550 ppm, lo que

Figura 12a. Incrementos estimados en la temperatura de los Estados Unidos de América para el periodo 2080-2099 respecto del periodo 1980-1999. Promedio anual (izquierda), invierno (centro) y verano (derecha) (IPCC 2007a).

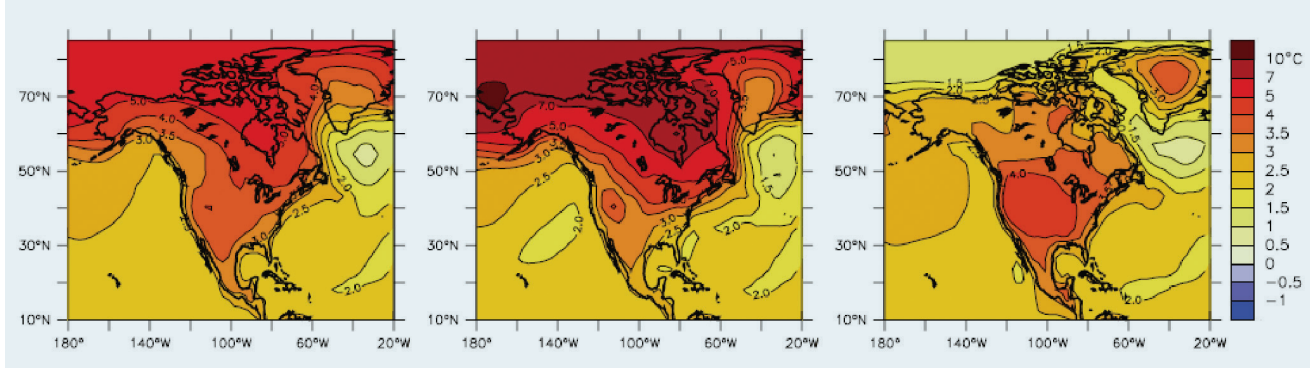
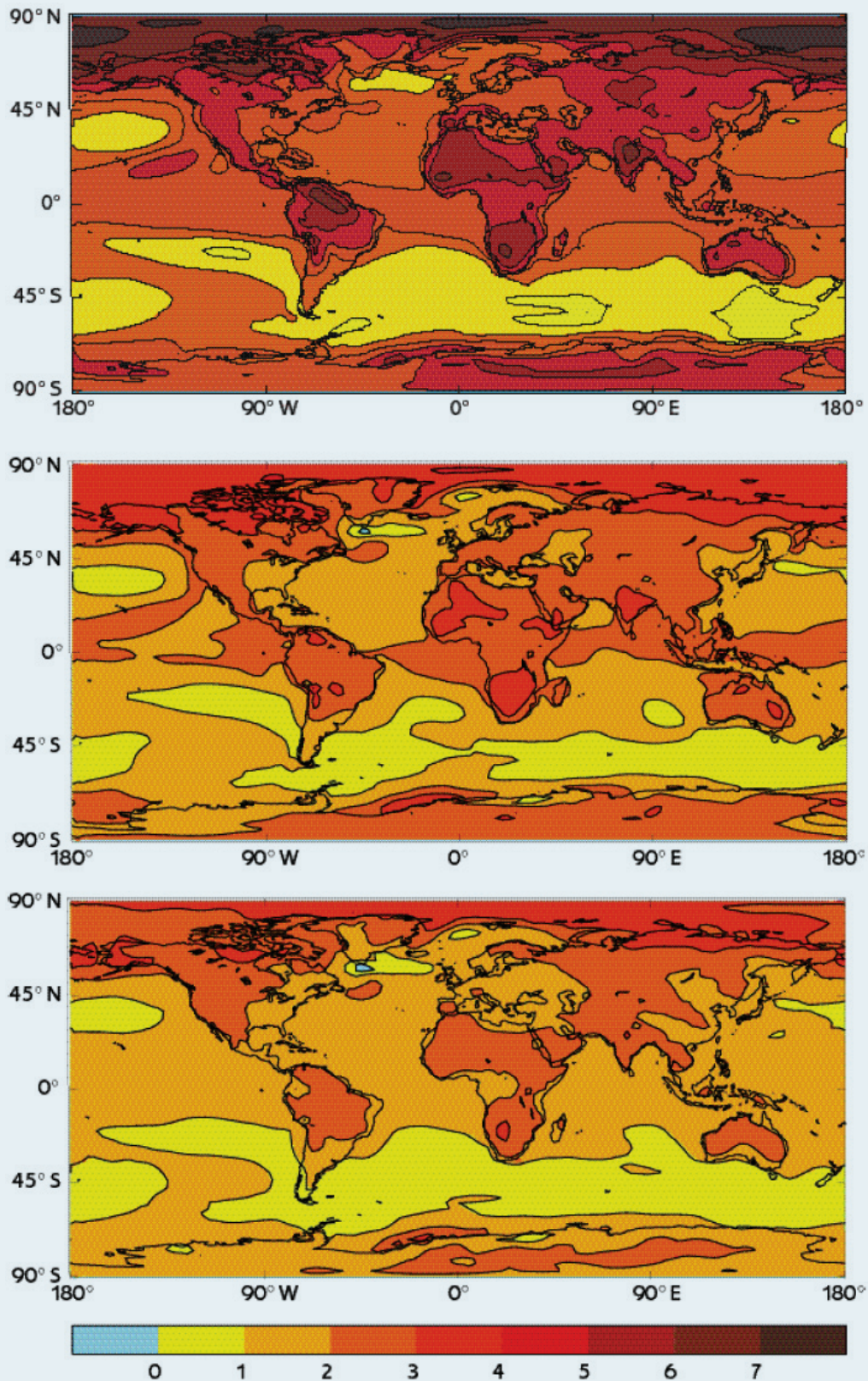


Figura 13. Incrementos previstos de temperatura, en °C hacia el año 2080, resultado de escenarios sin mitigación (arriba), con estabilización a 750 ppm de CO₂ (en medio) y a 550 ppm de CO₂ (abajo), (Met Office, 1999).



parece demasiado optimista, la temperatura en México se incrementaría entre 2 y 3°C en la región norte y entre 1 y 2°C en la región centro sur.

El Met Office predice, como se puede apreciar en la figura 8, que en cualquier escenario se espera para México una disminución de la precipitación, que puede ser más o menos severa. Así, según el diagnóstico sin mitigación, la precipitación puede disminuir hasta 3 mm/día en el sur, mientras que en la visión más favorable, con una estabilización de CO₂ atmosférico en 550 ppm, el descenso de la precipitación en México sería prácticamente uniforme: alrededor de un milímetro por día.

En la figura 13a se reproducen las estimaciones más recientes del IPCC para Norteamérica en un escenario A1B. Puede observarse que la precipitación en México disminuirá 10 y 15% en el norte y en el noroeste, respectivamente. En esas regiones se encuentran los principales y más extensos distritos de riego de nuestro país.

Por supuesto que el decrecimiento de la precipitación tendrá efectos muy diferen-

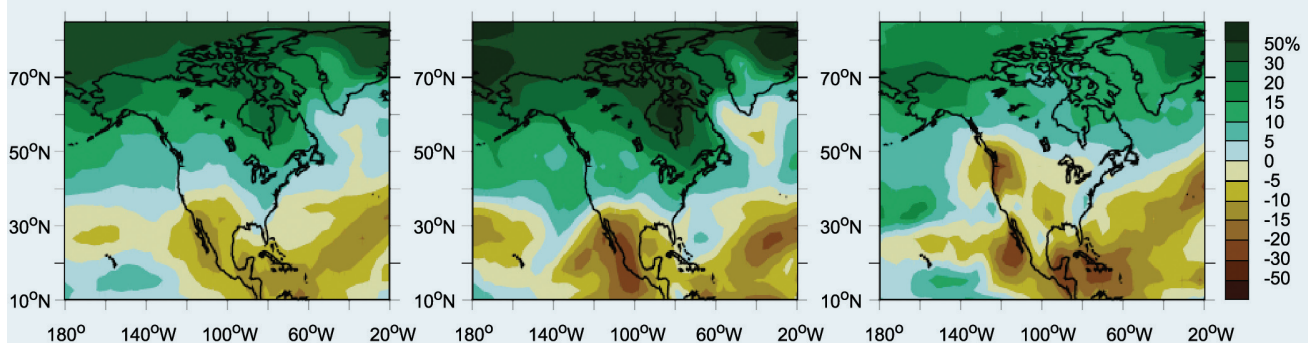
tes en el sureste, donde la disponibilidad natural es más elevada que en el norte, región caracterizada marcadamente como árida y sin disponibilidad.

Resulta evidente la necesidad de contar con resultados más precisos que los aportados por las simulaciones típicas con modelos de circulación general. Se trata no solo de un problema de tamaño de malla de cálculo, sino también de incorporar situaciones de meso-escala, es decir fenómenos atmosféricos locales.

A solicitud de la Conagua Morales *et al* (2001) llevaron a cabo un estudio regional más detallado sobre los cambios en la precipitación y temperatura en México. Con este propósito, realizaron un ejercicio de escalamiento de los resultados de un modelo de circulación global.

Morales *et al* (2001) efectuaron corridas con modelos de circulación general GCM, y seleccionaron como el más apropiado para sus fines el del German Climate Center Research, European Center/Hamburg Model #4, conocido como ECHAM4, por ser el que menor desviación estándar registró de

Figura 13^a. Cambios estimados en la precipitación en los Estados Unidos de América para el periodo 2080-2099 respecto del periodo 1980-1999. Promedio anual (izquierda), invierno (centro) y verano (derecha) (IPCC 2007a).



entre los que se probaron en simulaciones con datos históricos.

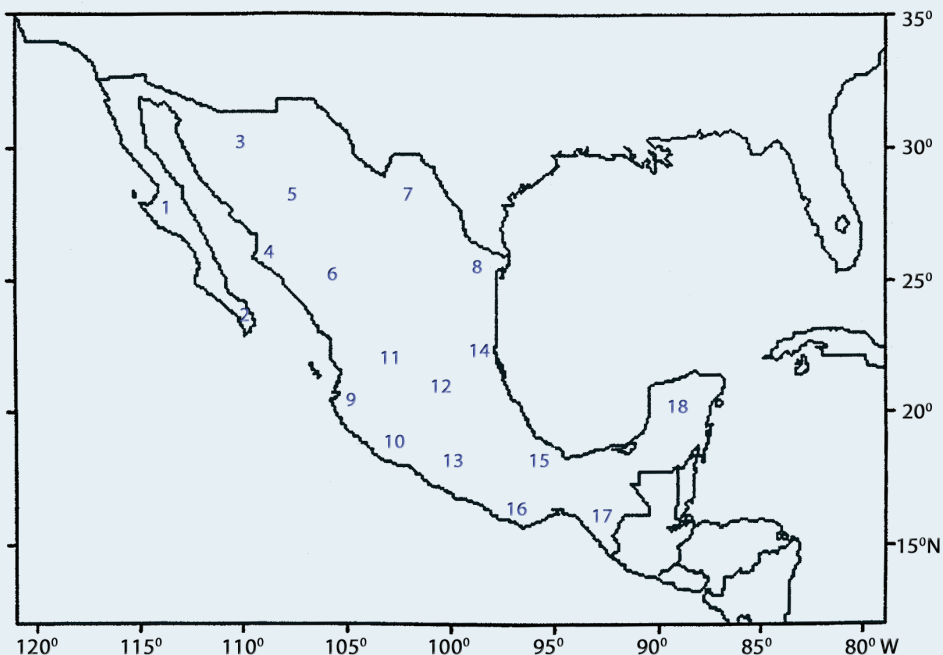
Una vez determinado el modelo GCM a utilizar, se realiza el procedimiento de escalamiento el cual, dicho brevemente, consiste en encontrar una regresión lineal multivariada entre el parámetro a modelar y las variables (de gran escala que resultan del modelo ECHAM4) de las que depende ésta. En el estudio referido se establecieron dos ecuaciones de regresión: una para la temperatura y otra para la precipitación. Este procedimiento requiere que se establezcan las principales variables que gobiernan el fenómeno. En este caso se utilizó como variable solamente la temperatura de superficie de gran escala del modelo ECHAM4, correspondiente a la simulación de los años 1961-1990, lo cual resta exactitud a los resultados.

Morales *et al* (2001) utilizaron en sus cálculos las 18 regiones climáticas propuestas

por Douglas (1966), mismas que se muestran en la figura 14. En las figuras 15 a 18 se presentan los resultados del escalamiento del modelo ECHAM4 desarrollado por estos autores.

El incremento de temperaturas previsto para el verano (figura 16) es cualitativamente consistente con los cálculos presentados anteriormente de modelos GCM. No obstante son aún mayores, llegando a valores de entre 4 y 6°C en la región noroeste y en la zona de Chiapas-Tabasco y de entre 2 y 4°C en la región central de México, en el norte de Sonora y en el sur de la península de Yucatán. En las costas de esta región y en las del noroeste los cambios de temperatura son menores. Es evidente que si se produjeran los incrementos previstos en las regiones áridas del norte, se alcanzarían en verano temperaturas diarias máximas muy elevadas, con graves efectos en los recursos hídricos y en la salud humana.

Figura 14. Regiones climáticas propuestas por Douglas.



Los incrementos calculados de temperatura en invierno (figura 15) están más distribuidos y son en general mucho menores que los de verano. Llama la atención el caso de la península de Baja California, donde se esperan temperaturas de menor graduación en invierno.

Los resultados del modelo de escalamiento de Morales *et al* (2001) para la precipitación, como era de esperarse, por la diferencia de resolución y la metodología empleada, no son completamente consistentes con los otros modelos GCM que se han presentado antes. En ellos se predicen disminuciones generalizadas de la precipitación.

Así, como se presenta en las figuras 17 y 18, se estiman incrementos en la precipitación en prácticamente todo el territorio mexicano en verano e invierno: de entre 80 y 100% en la zona norte-centro noroeste, y de entre 60 y 80% en la península de Baja California. Estas son modificaciones sobre valores absolutos de precipitación muy bajos porque

en México la mayor parte de la época de lluvia ocurre en verano.

Se registraría un aumento en la precipitación de verano entre 20 y 40% en las zonas centro y noreste, así como en Chiapas, Tabasco y Yucatán, con un ligero decremento de alrededor del 10% en la región centro-este, que parece coincidir con la Huasteca. En la región noroeste se prevén decrementos de 20% en la precipitación y de hasta 40% en la costa noroeste y en la península de Baja California.

Un enfoque alternativo al escalamiento con regresión lineal, es el que se realiza a través de simulaciones con modelos GCM pero con un tamaño de malla mucho menor. Con este método Hulme y Sheard realizaron una muy útil modelación, para los propósitos de este texto, de una sub-región que se denominó Mesoamérica (Hulme, M. y Sheard, N., 1999). Conviene aclarar que la zona de estudio que para

Figura 15. Cambio en °C de la temperatura en invierno, 2070-2099 (Morales *et al*, 2001).

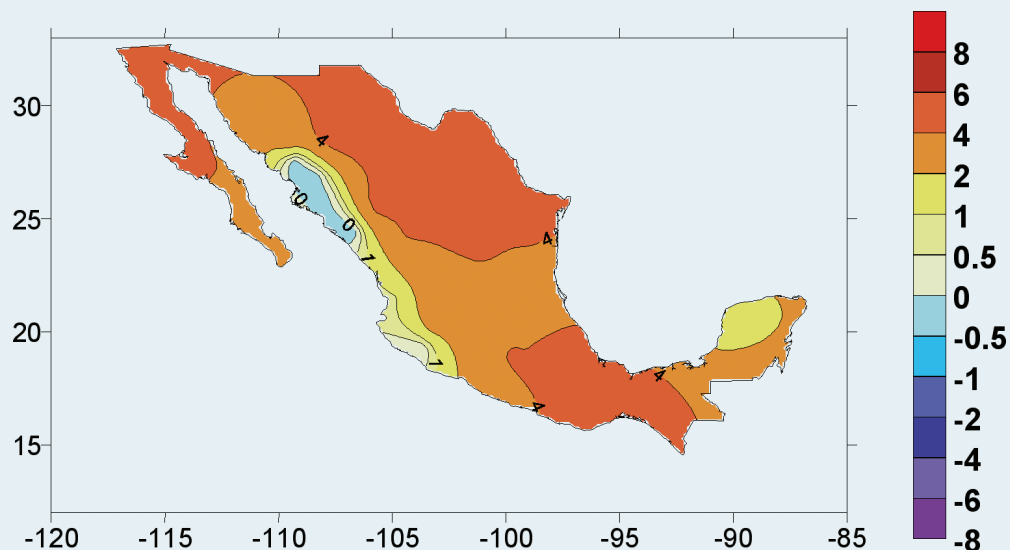
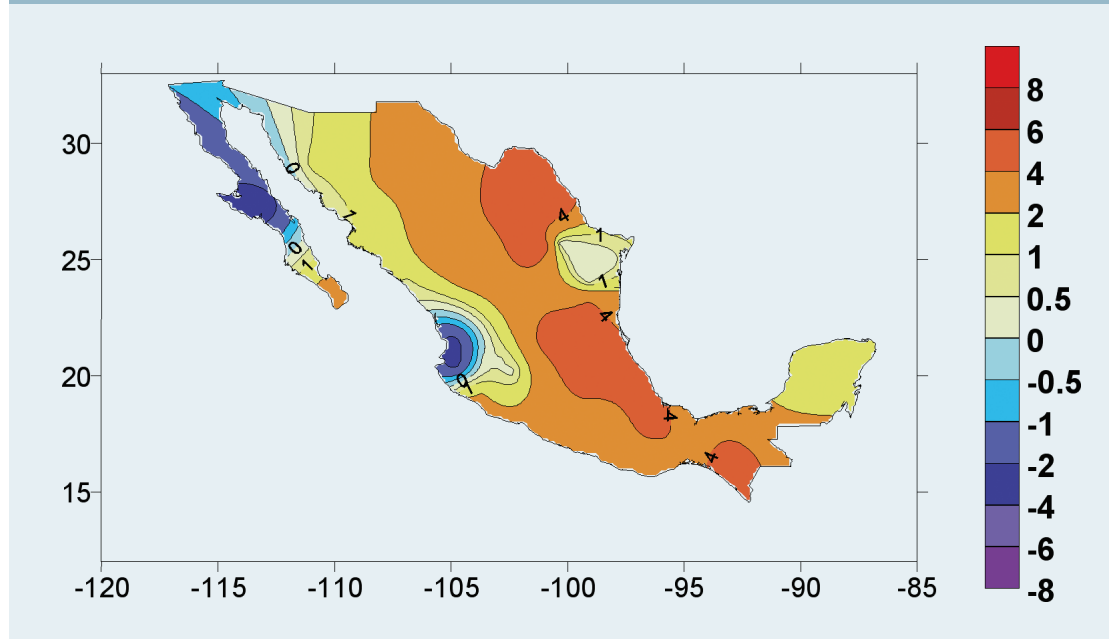


Figura 16. Cambio en °C de la temperatura en verano, 2070-2099 (Morales et al, 2001).



este caso consideró todo el territorio de México, Centroamérica y el Caribe no corresponde a la Mesoamérica donde florecieron las más importantes civilizacio-

nes prehispánicas y que abarca la region centro-sureste de México y la zona norte de Centroamérica, Los resultados de este estudio han sido publicados por la Uni-

Figura 17. Cambio porcentual de la precipitación en invierno, 2070-2099 (Morales et al, 2001).

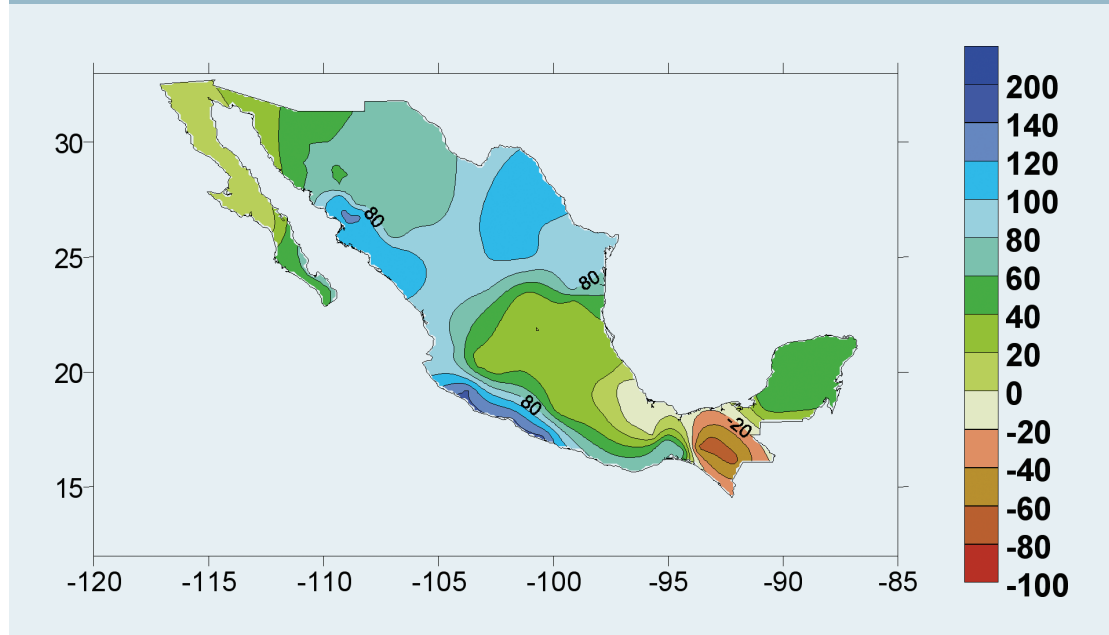
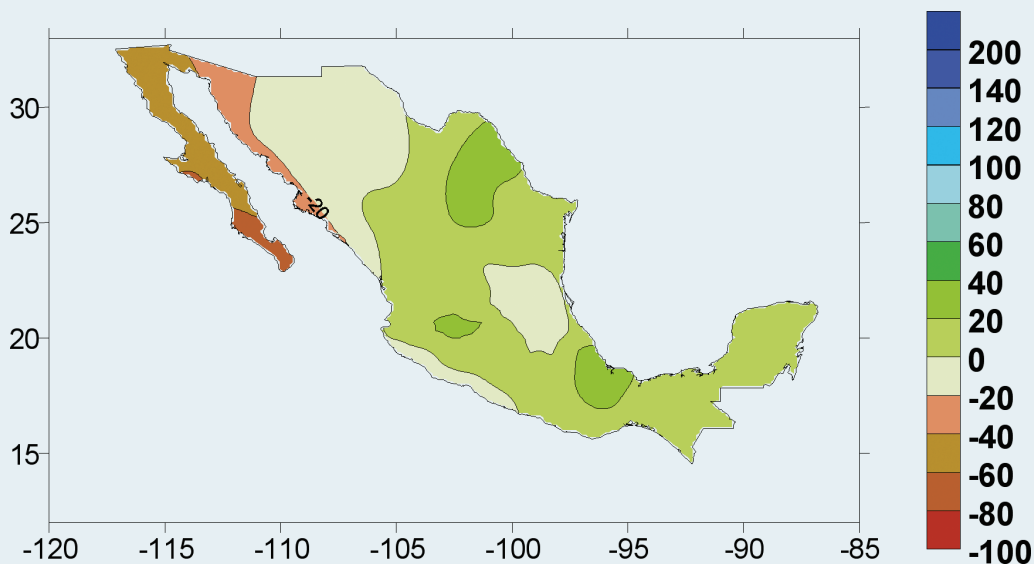


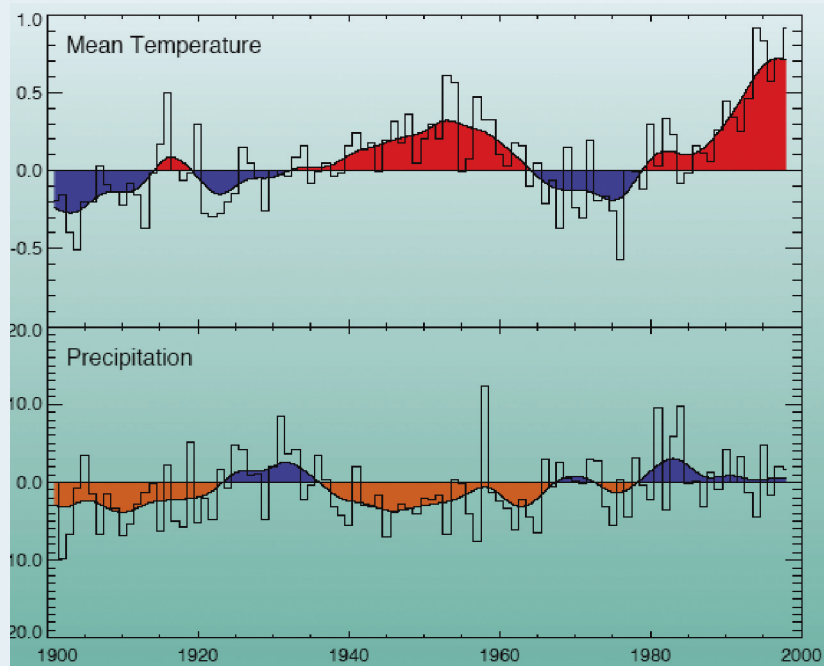
Figura 18. Cambio porcentual de la precipitación en verano, 2070-2099 (Morales et al, 2001).



dad de Investigación Climática (CRU, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Norwich del Reino Unido.

Hulme y Sheard (1999) presentan los resultados del promedio de simulaciones con diez modelos GCM, con una malla más

Figura 19. Anomalía observada respecto de la temperatura media anual (22. °C, arriba) y precipitación media anual en porcentaje (abajo) en Mesoamérica, (Hulme,M. y Sheard,N.,1999),



refinada, por lo que sus datos son confiables, en el sentido de que producen una de las mejores evaluaciones posibles con las herramientas actuales. En este estudio regional, en primer término, se presentan las anomalías observadas en la temperatura (1901-1998) y la precipitación (1901-1996) con respecto a los valores medios de temperatura y precipitación: 22.1°C y 1,215 mm anuales, respectivamente.

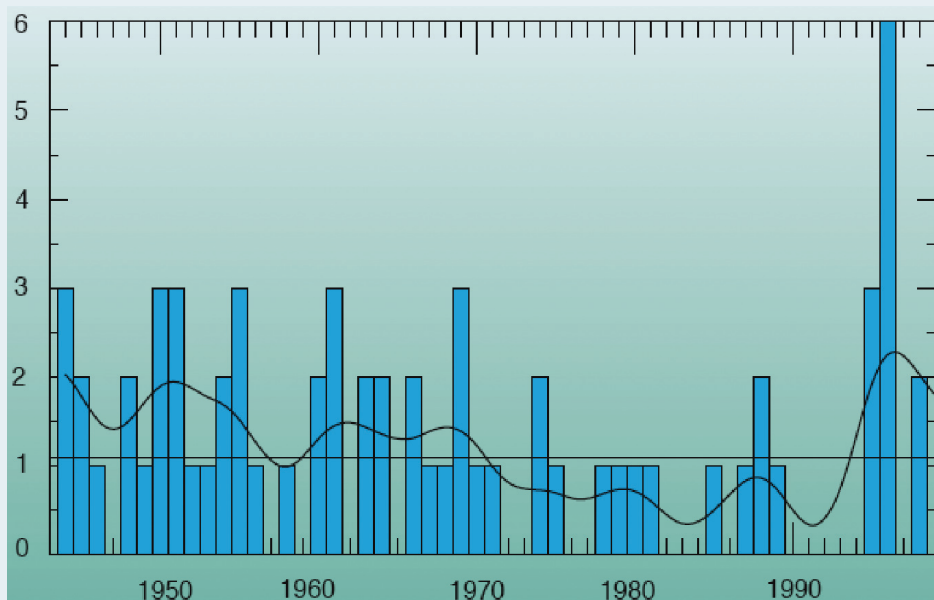
En la figura 19 se muestran las variaciones de temperatura y precipitación observadas de acuerdo a los valores medios de la región, 22.1°C y 1,215 mm, respectivamente, en un periodo que abarca el siglo XX. Puede observarse que la temperatura ya se ha elevado casi 1°C respecto a la de 1901, que es mayor al promedio mundial de 0.6°C para el mismo periodo. La precipita-

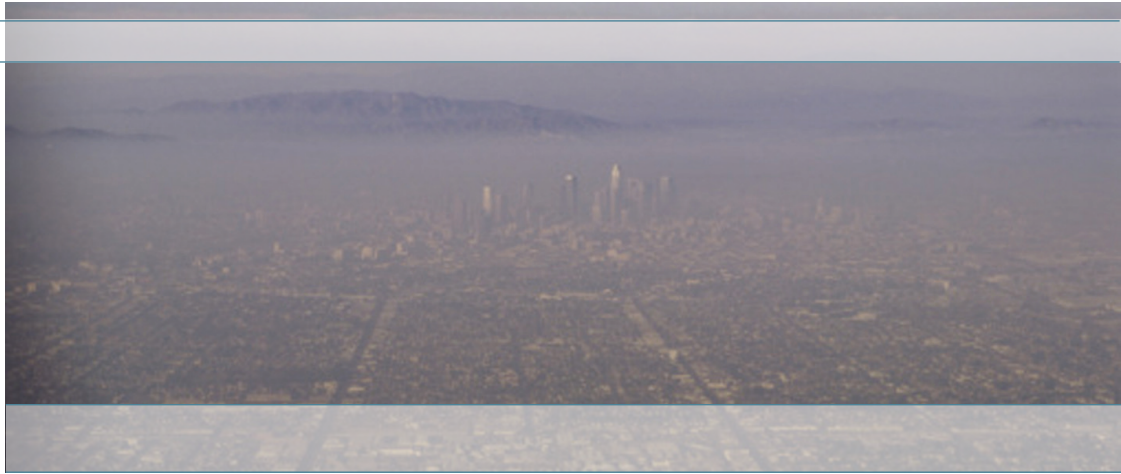
ción, por su parte, solo se ha incrementado ligeramente, sobre todo en el verano, que es cuando ocurre la estación de lluvias en la región.

Es notable, como puede verse en la figura 20, el incremento en el número de huracanes registrado en la zona cada temporada, que tenía un promedio anual de 1.1 a principios del siglo XX, mismo que ha sido rebasado con creces durante los últimos años, con las consecuencias desastrosas bien conocidas en Centroamérica y el Caribe.

Para analizar los efectos del calentamiento global en Mesoamérica, Hulme y Sheard realizaron proyecciones del clima para el año 2100, valiéndose de diez modelos de circulación general, en siete laboratorios climáticos localizados en seis países.

Figura 20. Frecuencia anual de huracanes en el mar Caribe 1944-1998 (Hulme, M. y Sheard, N., 1999).





En las simulaciones se utilizaron cuatro escenarios climáticos, mismos que son consistentes con los propuestos en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IEEE) del IPCC (2001). Se escogieron aquellos pertenecientes a las familias A y B: B1, B2, A1 y A2. Un resumen de sus características se puede consultar en la tabla 2. Como se aprecia en estos escenarios, se considera que la concentración atmosférica de CO₂ para el año 2080, tomando en cuenta el escenario B1, aumentará su valor de 370 ppm a una concentración cercana a

los 550 ppm y para el año 2100, teniendo en cuenta el escenario A2, se elevará por encima de los 830 ppm. Las concentraciones de otros gases invernadero también aumentarían.

El efecto del aumento de los gases invernadero sobre el cambio climático global depende en gran parte de la sensibilidad del clima de la Tierra a este aumento de concentraciones. Se escogieron tres valores diferentes para la sensibilidad climática: bajo (1.5°C), mediano (2.5°C) y alto (4.5°C). Me-

Tabla 2. Resumen de los cambios en el medio ambiente global para las décadas 2020, 2050 y 2080 para los cuatro escenarios. Los cambios han sido calculados con respecto al promedio de 1961-1990 (Hulme y Sheard, 1999).

1980*	1990*		2020			2050			2080		
Temp. °C	Temp. °C		CO ₂ ppm	Temp. °C	Nivel del mar (cm)	CO ₂ ppm	Temp. °C	Nivel del mar (cm)	CO ₂ ppm	Temp. °C	Nivel del mar (cm)
0.13	0.28	B1-bajo	421	0.6	7	479	0.9	13	532	1.2	19
0.13	0.28	B2-med.	429	0.9	20	492	1.5	36	561	2.0	53
0.13	0.28	A1-med.	448	1.0	21	555	1.8	39	646	2.3	58
0.13	0.28	A2-alto	440	1.4	38	559	2.6	68	721	3.9	104



diante la combinación de las tres sensibilidades climáticas con los cuatro escenarios de emisiones del IEEA, se calcularon las variaciones en las curvas de cambio climático global (figura 3.5) que muy probablemente comprenden aproximadamente el 90% de las posibles fluctuaciones de los climas futuros. Estos varían de B1-bajo (el escenario con menos emisiones combinado con el de menor sensibilidad) a A2-alto (el escenario con emisiones más altas combinado con la mayor sensibilidad). Los resultados de las simulaciones descritas se reproducen en las figuras 21, 24 y 25.

Como se aprecia en la figura 21, la variación promedio de la temperatura media espera-

da en toda la región aumentaría entre 1.3 y 4°C, lo que es consistente con los estudios del IPCC y de otras investigaciones. Los resultados de Hulme y Sheard concuerdan con el resto de los modelos analizados en este documento.

Por otra parte, las temperaturas máximas en Mesoamérica son ya muy elevadas en el norte (lugar que los historiadores llaman más acertadamente "Aridamérica"), como se puede apreciar en la figura 22, las temperaturas máximas para el verano son actualmente superiores a los 35°C. Si se hace una corrida con el modelo GFDL, para el año 2080, utilizando las facilidades de cálculo del Centro de Distribución

Figura 21.- Cambios previstos en la temperatura global y en Mesoamérica, para el año 2100, respecto de los cuatro escenarios, (Hulme,M. y Sheard,N., 1999). Código de colores A2 Alto, A1 medio, B2 medio y B1 Bajo).

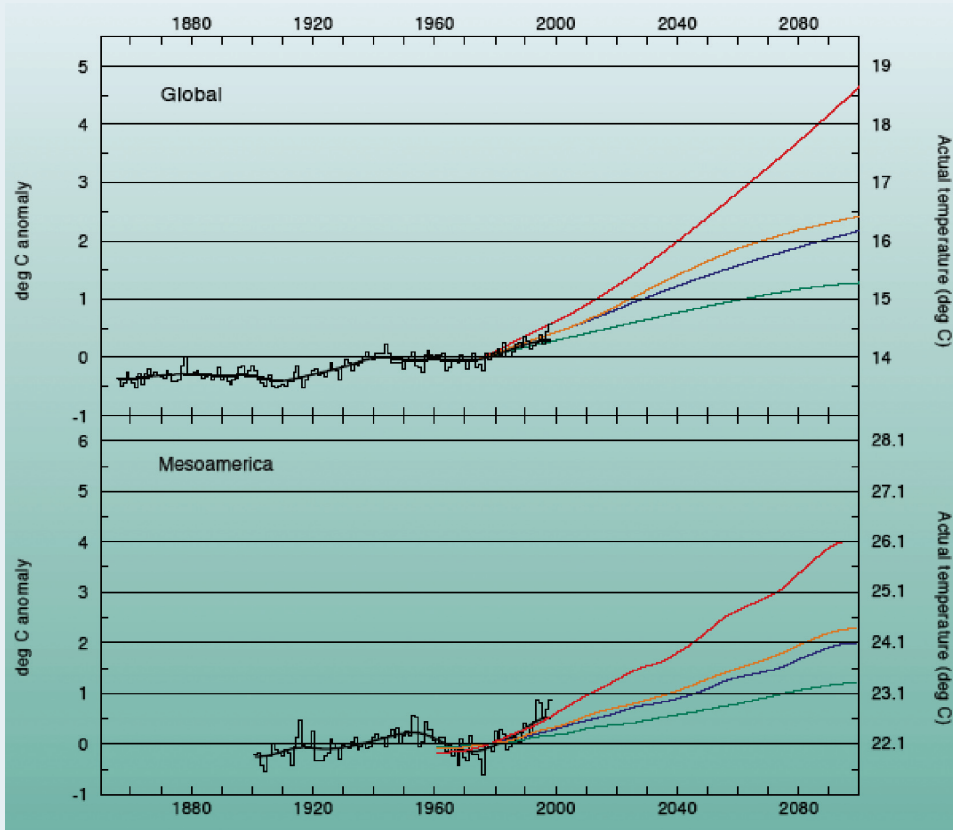


Figura 22. Temperatura observada en verano, junio-agosto (elaboración propia con los datos y facilidades gráficas del servidor del Centro de Distribución de Datos del IPCC).

Observed Mean temperature (°C) June to August 1961-1990

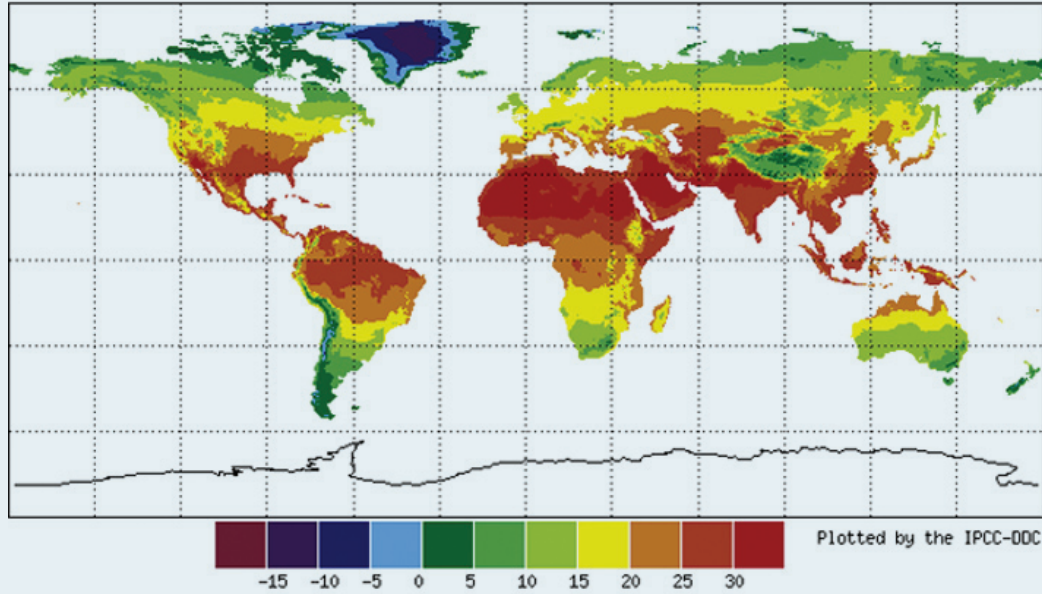
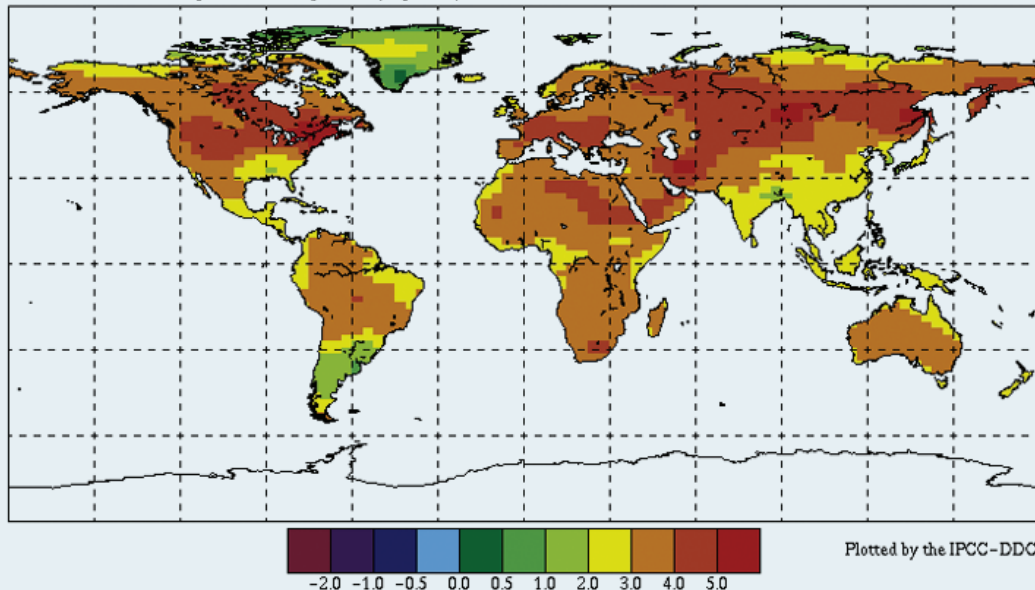


Figura 23. Incremento de temperatura esperado para el verano, junio-agosto, al año 2080 (calculada con un modelo GFDL y para el escenario A2a, empleando las herramientas de cálculo y facilidades gráficas del servidor del Centro de Distribución de Datos del IPCC).

GFDL99/A2a June to August Mean Temperature (degrees C) 2080s relative to 1961-90



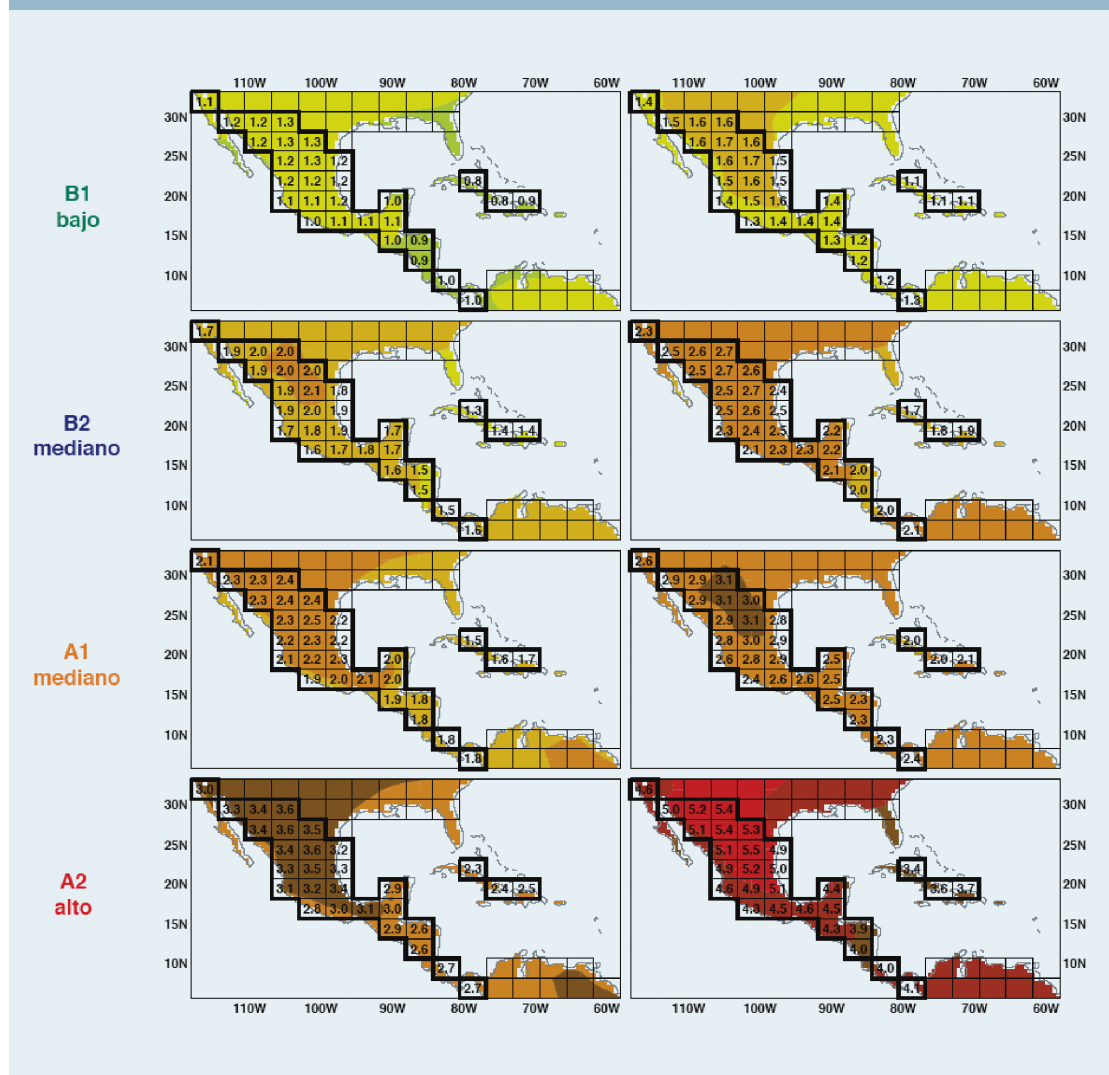
de Datos del IPCC, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 23, que predice incrementos de la temperatura media para el verano de entre 2 y 4°C en la zona norte de la región, lo cual representaría temperaturas medias de verano cercanas a los 40°C, con efectos muy negativos sobre las actividades productivas de la región, en especial sobre la agricultura.

De regreso a la simulación de detalle realizada por Hume y Sheard (1999), los resultados para la temperatura media en Mesoamérica, conforme a los diversos escenarios utilizados, se muestran en la figura 24.

Como se observa, el calentamiento es más intenso en las regiones de mayor latitud de México y menor en las islas del Caribe y en los países de América Central.

Para el año 2080, la mayor parte de México registraría, de acuerdo al escenario A2-alto una temperatura promedio anual de 5°C por encima de la actual, mientras que en las islas caribeñas de Cuba y Jamaica aumentaría solo 3.5°C. Este escenario es el extremo de las posibilidades. Para el escenario medio A1, el incremento de temperaturas en México fluctuaría entre 2°C en el sureste, hasta 2.4 y 2.5°C en el centro-norte y no-

Figura 24. Cambios en la temperatura media, en °C, en Mesoamérica en 2050 (izquierda) y en 2080 (derecha), con respecto a la temperatura promedio de 1961-1990 (Hulme, M. y Sheard, N., 1999).

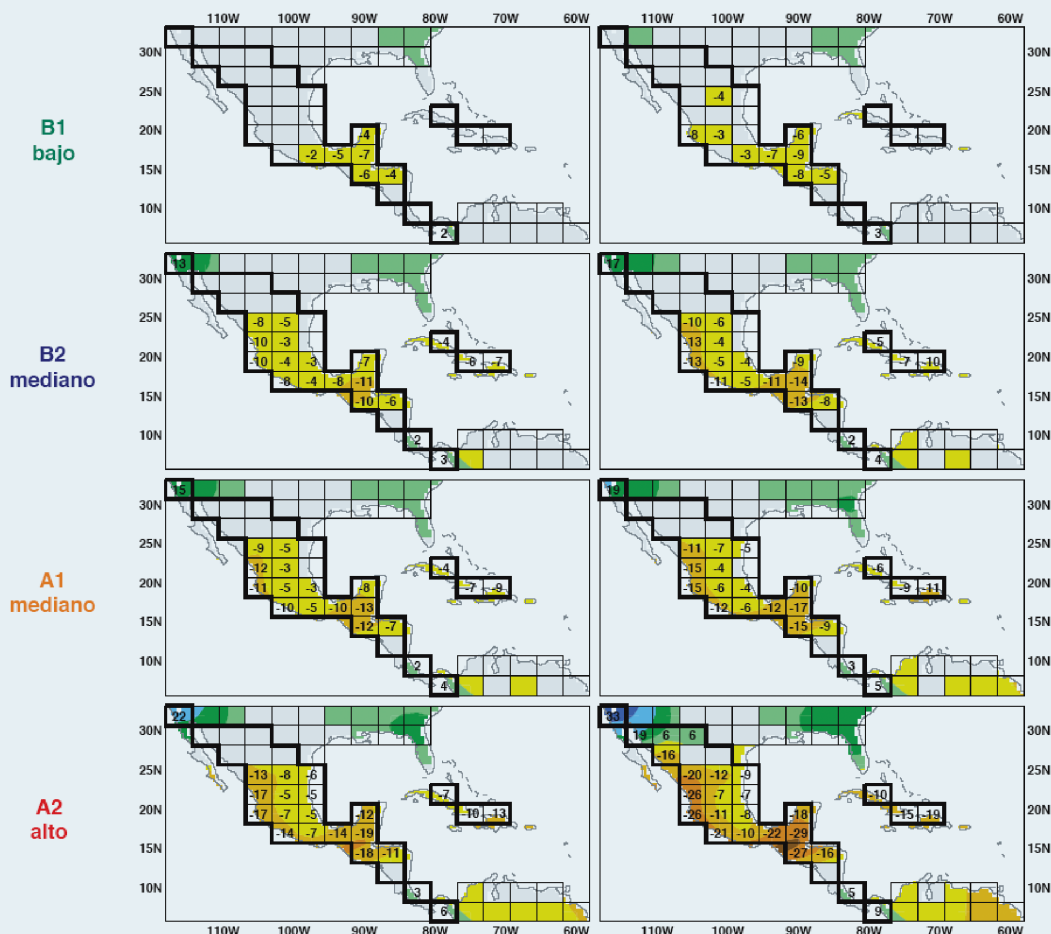


reste en el 2050, para llegar hasta 3°C en el año 2080. Vale la pena observar que estos incrementos son mayores a los inicialmente previstos en los primeros cálculos del IPCC (1995), pero menores a los más recientes realizados por el propio Panel.

Los cambios calculados en la precipitación, que se reproducen en la figura 25, predicen una disminución en toda la región, que sería marcada con mayor énfasis en el sur de México y Guatemala. Considerando solamente los resultados del escenario A1 medio, para el año 2050, se estiman disminuciones en la precipitación para nuestro país del 7 al 12% en el sur de las cuen-

cas de los ríos Grijalva y Usumacinta, del orden del 3% en la vertiente del golfo de México y de hasta 11% en la costa centro-occidental, sin cambios en las cuencas del norte. Para el año 2080, en este mismo escenario, se esperarían disminuciones en la precipitación en las cuencas del sur de los ríos Usumacinta y Grijalva de entre 12 y 17%. Este decremento en la región donde ocurren las lluvias más abundantes del país, tendría efectos sobre todo en la capacidad nacional de generación de energía hidroeléctrica, que en su mayor parte se produce en estas cuencas. Se registrarían precipitaciones menos abundantes en la zona centro-occidental de México de entre

Figura 25. Cambios porcentuales en la precipitación media anual en Mesoamérica en 2050 (izquierda) y en 2080 (derecha), con respecto a la precipitación promedio de 1961-1990 (Hulme,M. y Sheard,N., 1999).





el 11 y 15%, lo cual ocasionaría problemas en los sistemas ecológicos de la región y en la disponibilidad de agua para la agricultura. En la región norte no se predicen cambios en la precipitación. No obstante, aún en esta situación el escurrimiento sería menor, debido al aumento en la evapotranspiración y la menor humedad del suelo, lo que en conjunto disminuiría la cantidad de agua disponible en el flujo superficial y en la recarga de acuíferos.

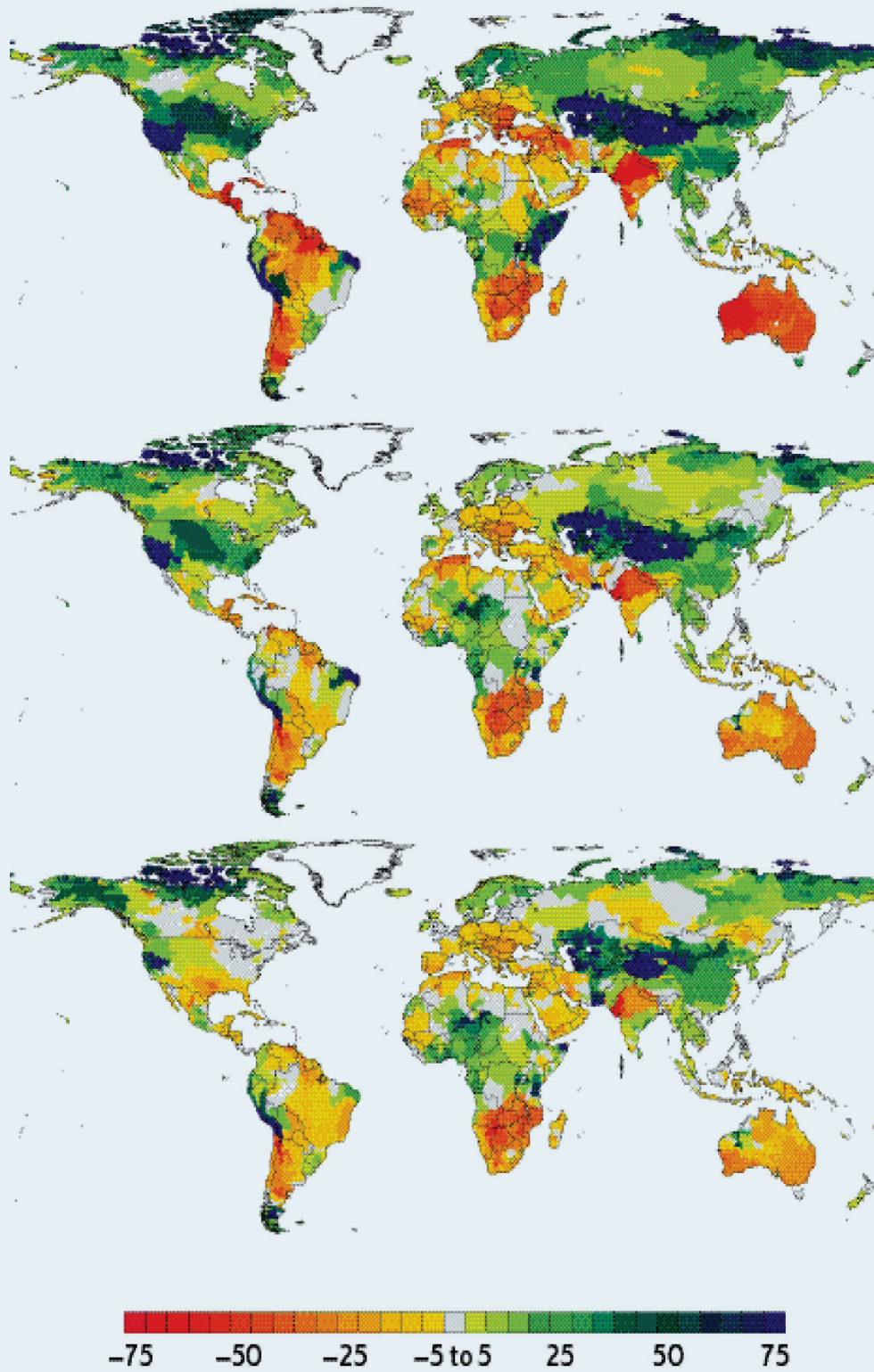
Es importante observar, por otra parte, que el norte de México se encuentra en lo que se puede denominar una zona de transición: entre las latitudes en que se espera una disminución en la precipitación, como América Central y Sudamérica, y en las que se prevén incrementos en la precipitación, en Norteamérica. Esta característica hace más difícil el pronóstico de los cambios calculados para esta zona.

Por lo que hace a los efectos del escurrimiento en las cuencas de México, ocasionado por los cambios en la precipitación, no existen estudios detallados. No obstante,

se sabe que la relación lluvia-escurrimiento es altamente no lineal; es decir que un cambio en la precipitación se magnifica en el escurrimiento. Por ejemplo, en algunas cuencas áridas, una baja en la precipitación del 10%, puede ocasionar decrementos en el escurrimiento hasta del 30%. Si se considera que son estos flujos superficiales los que finalmente se aprovechan en usos productivos, los efectos en zonas áridas y semiáridas pueden ser extensos y graves.

En la figura 26 se reproducen los cálculos del Met Office (Met Office, 1999) para los cambios esperados en el escurrimiento en el año 2080, para tres escenarios de estabilización del CO₂ atmosférico. Puede notarse que en la mayor parte de México se esperarían disminuciones en el escurrimiento de entre 5 y 25%, con la excepción de algunas cuencas en la región centro-occidental, en donde se estiman incrementos en el escurrimiento de alrededor del 10%. Desde luego, una disminución del 20% no tiene efectos de la misma gravedad en las cuencas del sur, salvo en la generación de energía, que en las cuencas áridas del norte de México,

Figura 26. Cambios porcentuales en el escurrimiento esperados hacia el año 2080, considerando escenarios sin mitigación (arriba), con estabilización a 750 ppm de CO₂ (en medio) y a 550 ppm de CO₂ (abajo) (Met Office, 1999).



en las que ya se viven condiciones de escasez. Estos cambios impondrían restricciones a diversos usos del agua, en especial a la agricultura.

No obstante, debido a que la modelación de la relación lluvia- escurrimiento depende de características geomorfológicas, topográficas, edafológicas y de cobertura vegetal, entre otras, propias de cada cuenca, los anteriores resultados deben considerarse de naturaleza indicativa, es decir permiten conocer solo el sentido y orden de magnitud del cambio esperado en el escurrimiento. Aún así, son una fuerte señal de la gravedad de los cambios en los flujos superficiales que cabe esperar en esas cuencas.

Las cuencas transfronterizas del norte de México merecen una atención especial, ya que las aguas de los ríos Bravo y Colorado se asignan conforme a instrumentos internacionales firmados con los Estados Unidos de América (EUA). México recibe aguas del río Colorado, conforme al Tratado de Distribución de Aguas Internacionales entre los EUA y los Estados Unidos Mexicanos, firmado en 1944; y recibe aguas de la cuenca del río Bravo (Grande en los EUA) en el valle de Juárez, conforme a la Convención para la Equitativa Distribución de las Aguas del

Río Grande, firmada en 1906. Los cambios en la disponibilidad en estas cuencas en territorio estadounidense pueden comprometer la entrega de esos recursos hídricos a México, pues en ambos instrumentos internacionales está prevista una entrega disminuida, en caso de sequía.

De acuerdo con estudios realizados en los EUA (Jacobs *et al*, 2000) se ha registrado un incremento en la precipitación promedio en ese país, y bajo la mayoría de los escenarios de cambio climático esta tendencia se mantendrá en general. No obstante, en las cuencas dominadas por el flujo superficial debido al derretimiento de nieve, se esperan cambios en la estacionalidad. Al parecer, ya se están registrando en algunas cuencas del oeste, como la del río Sacramento (Jacobs *et al*, 2000, página 413).

Por otra parte, se prevén incrementos en la evapotranspiración, de manera que el balance de disponibilidad de agua podría ser negativo en algunas cuencas de los EUA. Frederick y Gleick (1999) realizaron un análisis regional sobre los efectos que el cambio en la precipitación y la temperatura podrían ocasionar en el escurrimiento en las principales regiones hidrológicas de los EUA. Los resultados para la cuenca del Colorado se muestran en la tabla 3. Los de-

Tabla 3. Impacto en el escurrimiento anual promedio (en porcentaje) en algunas cuencas transfronterizas de los Estados Unidos de América (Elaborada con datos de Frederick & Gleick, 1999).

Cambio en la precipitación (%)	Cuenca	Temperatura	
		+ 2 °C	+ 4 °C
-20	Alto Colorado	-	-41
-10	Entradas a la presa Glenn Canyon	-23	-31
	Alto Colorado	-35	-
	Bajo Colorado	-56	-
0	Entradas a la Presa Glenn Canyon	-12	-21



crementos en el escurrimiento, aún si no hubiera cambios en la precipitación, son muy grandes y tendrían efectos graves en la disponibilidad, pues ya hoy se utiliza la totalidad del agua de la cuenca del río Colorado.

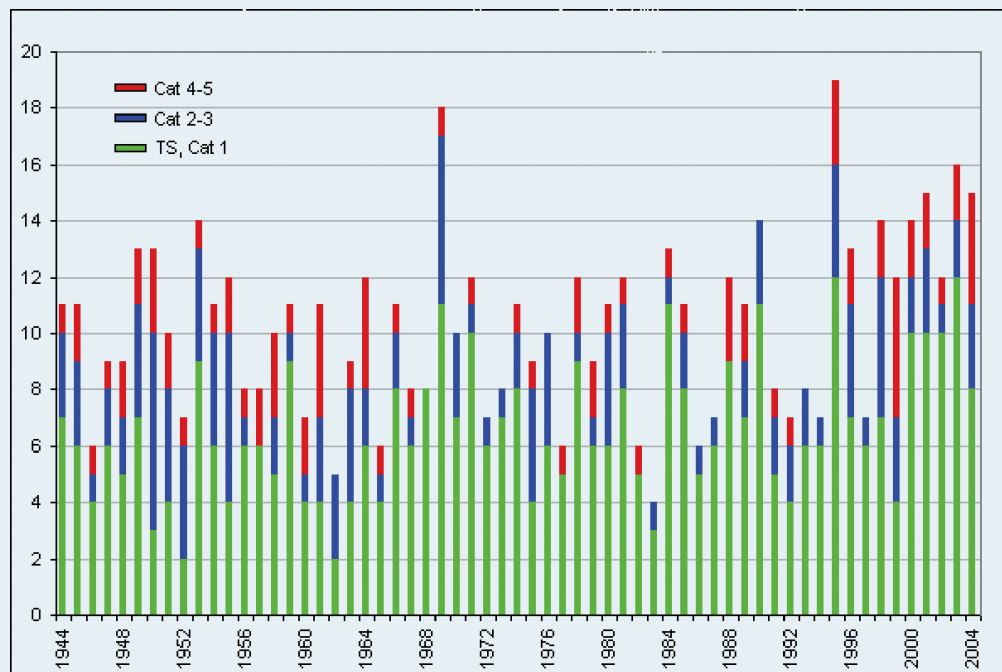
No se han hecho evaluaciones cuantitativas de los cambios en la recarga de los acuíferos que podrían impactar la disponibilidad de agua subterránea. No obstante, se espera una disminución de la disponibilidad en los acuíferos someros en las zonas áridas, siguiendo la tendencia de disminución de la precipitación, en las que los acuíferos se abastecen de las lluvias estacionales (Arnell & Liu, 2001). Los efectos en la disponibilidad hídrica dependerán del balance actual de los acuíferos: si ahora es positivo podrían registrarse efectos poco notables, pero si las extracciones y las aportaciones de agua son similares o excesivas, es decir las extracciones son mayores que las aportaciones de agua, entonces su uso sustentable se verá aún más comprometido.

Por otra parte, como en el caso del escurrimiento, la relación entre la precipitación y la recarga de agua subterránea es altamente no lineal, es decir que un decremento en la precipitación puede ocasionar una reducción mucho mayor en la recarga. Arnell y Liu (2001) citan el caso de un acuífero en Tanzania central, en el que una reducción del 15% en la precipitación causaría una disminución de entre 40 y 50% en la recarga, aún sin considerar incrementos en la temperatura.

Otro de los cambios en el régimen hidrológico que pueden tener lugar bajo escenarios de calentamiento global, es la frecuencia de eventos extremos: sequías o inundaciones. La periodicidad de avenidas e inundaciones dependerá en nuestro país principalmente del número de tormentas tropicales y huracanes, en la medida que se prevén disminuciones en la precipitación promedio anual en el sur de México.

Hasta ahora, no se puede detectar algún cambio estadísticamente significativo en la

Figura 27.- Número anual de huracanes en el Caribe en el periodo 1944-2004 (tomada de http://www.euronet.nl/users/e_wesker/atlhur.html).



cantidad de huracanes de por sí muy variable, como se puede apreciar en la figura 27, que muestra la frecuencia 1944-2004 en el Atlántico norte y el Caribe.

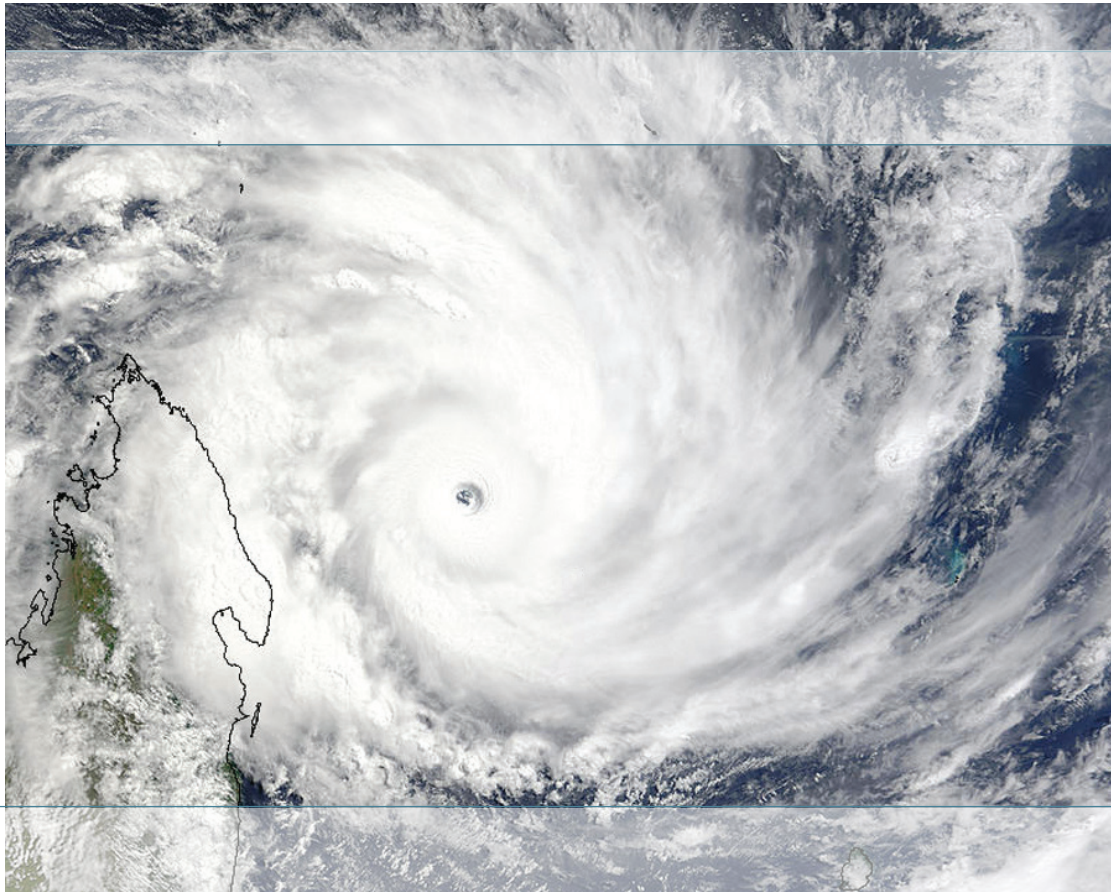
Sin embargo, la discusión respecto al cambio en la frecuencia e intensidad de los huracanes, en el escenario de calentamiento global, parece converger en la conclusión de que la intensidad de estos fenómenos extremos se incrementará, mientras que su frecuencia no sufrirá cambios.

En investigaciones recientes, Knuston y colaboradores (Knuston & Tuleya, 2004; Knuston *et al* 2001), han encontrado que, independientemente del modelo de circulación utilizado, conforme el CO₂ atmosférico se incrementa así lo hará la intensidad de los huracanes.

Knutson y Tuleya (2004) realizaron más de 1300 simulaciones de cinco días de un sistema de alta resolución de predicción de

huracanes, en las que se obtuvieron condiciones de gran escala de nueve modelos climáticos en los que se supuso, para los próximos ochenta años, un 1% de incremento anual del CO₂ en la atmósfera. Los resultados agregados promedio indican que en ese escenario crecerá la intensidad de los huracanes al decaer 14% la presión central en su ojo, y aumentar 6% la velocidad máxima de viento y 18% la precipitación en un radio de 100 km a partir del centro del fenómeno meteorológico. Como no se esperan cambios en la frecuencia de los mismos, estas conclusiones significan que se tendrá un número mayor de huracanes de categoría cinco.

Desde el inicio de las investigaciones se reconoció que el cambio climático aumentaría la frecuencia y severidad de las sequías, con efectos mayores en las zonas áridas. En la figura 28 se reproduce el mapa de severidad de la sequía inclui-



do en la Primera Comunicación de México a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (Semarnap, 1997). De acuerdo con la reciente modelación de Morales *et al* (2001), en la región norte de México se registra una disminución en la precipitación de hasta 30% hacia finales del siglo XXI, cuyos efectos se dejarán sentir ya desde el primer cuarto del actual siglo.

En la tabla 4 se resumen los resultados de escenarios de precipitación calculados por Morales *et al* (2001) para el invierno y el verano. Hacia el final del siglo XXI son de esperar disminuciones severas en la precipitación en la región norte, máximas en el oeste, con -40% en Baja California, y menos agudas hacia el oeste, llegando a -10% en Chihuahua. En la zona norte-atlántica, a

partir de Coahuila, se observarían aumentos en la precipitación. Es un hecho, que por ahora puede señalarse solo como una coincidencia, que ese es el patrón cualitativo de precipitación observado durante los años recientes, en que han ocurrido lluvias extraordinarias en Nuevo León y Tamaulipas y las presas se han llenado hasta su máxima capacidad e incluso derramado, mientras persiste la sequía en Chihuahua, en la parte media de la cuenca del río Bravo.

Estos resultados son cualitativamente consistentes con los de otros modelos. No es así en el caso del pronóstico de Morales *et al* (2001) para el sur del país donde predicen incrementos en la precipitación, mientras la mayoría de los otros modelos auguran también importantes disminuciones en esta variable.

Figura 28. Mapa de severidad de la sequía (Semarnap, 1997).



Tabla 4. Variación porcentual de la precipitación, en las 18 regiones de Douglas (fig. 14), calculadas con el modelo ECHAM4 y mediante técnicas de escalamiento (Morales et al, 2001).

Región	Estados	Escenario de precipitación (%)					
		Invierno			Verano		
		2010-2039	2040-2069	2070-2099	2010-2039	2040-2069	2070-2099
1	BCN y BCS	-50	-20	+10	+30	-20	-40
2	BCS	+50	+50	+60	+20	-20	-60
3	Sonora	+50	+40	+50	-10	-10	-20
4	Sonora y Sinaloa	+20	+50	+80	-10	-10	-20
5	Chihuahua	+20	+40	+60	+20	-10	-10
6	Durango y Zacatecas	+20	+50	+80	-20	-10	+20
7	Coahuila y Nuevo León	-20	+40	+90	-40	-10	+40
8	Nuevo León y Tamaulipas	-20	+40	+80	-10	+20	+20
9	Nayarit y Jalisco	-20	+20	+80	-10	-10	+20
10	Col., Gro. y Mich.	+20	+40	+80	+20	+10	+10
11	Jal., Gto. y Mich.	+20	+40	+60	+20	+20	+30
12	SLP, DF, Hgo. Gto. y Mex.	+40	+40	+40	-20	+10	-10
13	Mor., Pue. y Gro.	-20	+20	+50	-10	+10	+10
14	SLP, Tamps., Hgo., y Ver.	-20	+20	+40	+20	+20	0
15	Oaxaca y Veracruz	-20	-20	-20	-20	+20	+30
16	Oaxaca	+20	+40	+60	0	+20	+30
17	Chiapas	+20	-20	-40	+20	+20	+20
18	Campeche y Yucatán	+20	+40	+60	+20	+20	+20



Cambios en la demanda de agua

Al incrementarse la temperatura, se espera ocurran cambios en la disponibilidad natural y en la demanda de agua, principalmente aquella destinada al uso agrícola que actualmente consume cerca del 76.8% (Conagua, 2006) y que, por cierto, es especialmente sensible a la temperatura. Por ello, los estudios sobre los cambios antes mencionados se han centrado fundamentalmente en el uso para la producción de alimentos.

Martínez-Austria y Mundo Molina (1995) analizaron los efectos del cambio climático sobre la demanda de agua en uno de los distritos de riego más importantes del norte de México localizado en el valle del Yaqui, Son. Para realizar estos cálculos, desarrollaron un modelo de radiación modificado que permite simular cambios en la temperatura y en la humedad del agua en el suelo.

Con el modelo de radiación modificado se observó el cambio en las necesidades hídricas

para el maíz en el valle del Yaqui, de estos resultados se desprende que se producirían incrementos en la evapotranspiración potencial, E_{to} y la evapotranspiración real, E_{tr} , hasta en un 14%, para los escenarios críticos de incrementos de temperatura media estudiados, consistentes con los pronósticos de modelos de circulación general, lo que significa mayores requerimientos de agua, en una zona en la que de por sí este líquido es escaso. Este incremento en E_{to} y en E_{tr} del maíz en los escenarios críticos aquí expuestos, eleva a su vez de manera proporcional los volúmenes de agua necesarios para mantener los cultivos con un adecuado balance hídrico y evitar la disminución de la producción. En cuanto a las condiciones de humedad del suelo, esta tendrá un déficit en los escenarios críticos de hasta un 15%. En la tabla 5 se presentan los resultados correspondientes.

El Distrito de Riego 041 Río Yaqui cuenta con tres presas importantes: Alvaro Obre-



Tabla 5. Cambio en las necesidades hídricas de los cultivos para los escenarios críticos de calentamiento global (Martínez-Austria y Mundo Molina, 1995).

Escenario	Mes	Superficie sembrada (Ha)	Volumen requerido (m ³)	Cambio en necesidades hídricas (%)
cero	Ciclo completo	220 000	2158 700 000	0
+3oC	"	"	2425 800 000	12,40
+4oC	"	"	2446 224 000	13.31

gón, Plutarco Elías Calles y La Angostura con una capacidad de almacenamiento de 2,989 Hm³, 2,925 Hm³ y 864 Hm³, respectivamente, lo que hace un total de 6,778 Hm³. Es decir que en el escenario crítico se requeriría una capacidad adicional equivalente al 31% de la presa de La Angostura. Si se considera que en esta región más bien se espera un decremento en la disponibilidad natural, el balance final de agua en la zona agrícola, debido al cambio climático, será negativo. Para enfrentar esta posible situación se requerirán de costosas medidas de adaptación.

Martínez-Austria *et al* (1998) determinaron las curvas de evapotranspiración potencial en México tanto para la situación actual como para varios escenarios de cambio climático. El procedimiento consistió básicamente en calcular los valores de la evapotranspiración de los cultivos en la situación actual, y en las condiciones promedio propuestas por los diferentes escenarios apuntados por el IPCC. Como información meteorológica se utilizó la serie histórica disponible en los observatorios meteorológicos de México, ubicados principalmente en las capitales de los estados y en otras ciudades importantes.

El método empleado en el cálculo de la evapotranspiración, propuesto por Mun-

do y Martínez-Austria (1994), consiste en una modificación al de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (1976) que es el más utilizado en el orbe. Se incluyó en el cálculo el denominado "cultivo de referencia", es decir, que los resultados son aplicables a cualquier cultivo multiplicándolos por el coeficiente de cultivo que es propio de cada variedad vegetal.

En las figuras 29 a 32 se presentan los pronósticos de evapotranspiración media anual para el escenario cero y para los escenarios de incrementos de temperatura de 1, 2 y 3°C que hoy parecen conservadores. Puede observarse que en la mayoría de los sitios se perciben aumentos en las necesidades hídricas, lo cual afectará negativamente el balance hídrico, más aún cuando se registre una disminución en la precipitación.

El estudio antes referido indica que en México los efectos del cambio climático se sentirán marcadamente en la región norte, donde los requerimientos de agua de los cultivos se elevarán en mayor proporción que en el resto del país. La diferencia entre las demandas actuales de evapotranspiración potencial y el escenario extremo de incremento de 3°C es, en promedio, del ocho por ciento.

Figura 29. Evapotranspiración potencial. Escenario cero, situación actual. (Martínez-Austria et al, 1998).

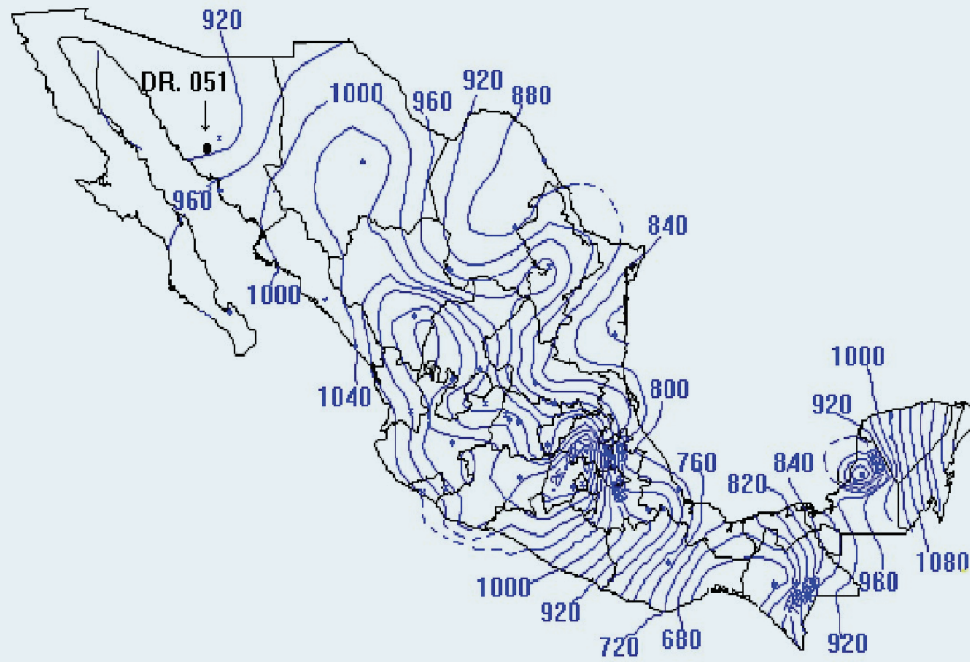


Figura 30. Evapotranspiración potencial. Escenario con incremento de 1 °C. (Martínez-Austria et al, 1998).

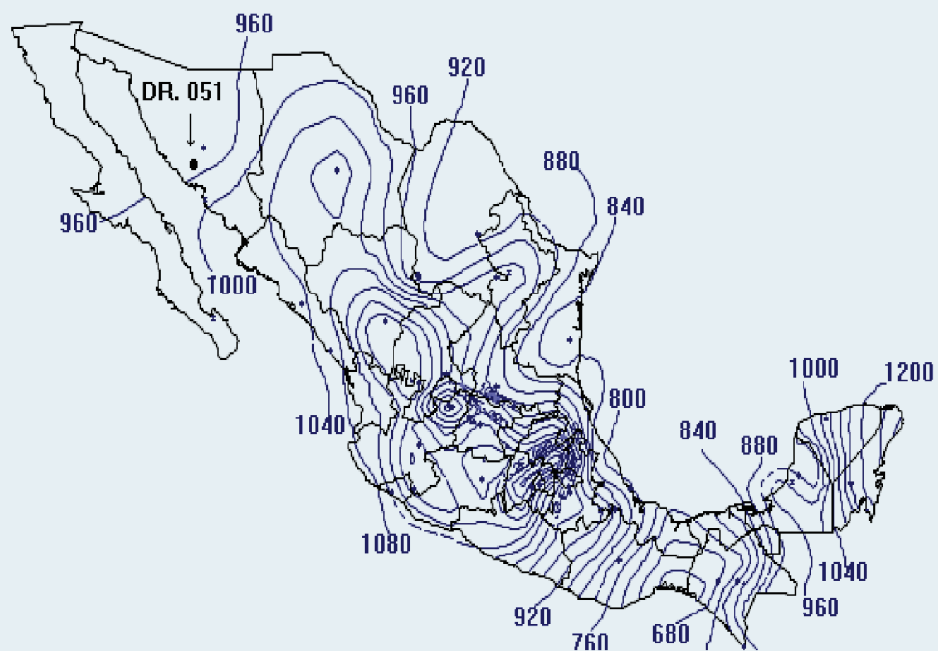


Figura 31. Evapotranspiración potencial. Escenario con incremento de 2 °C.
(Martínez-Austria et al, 1998).

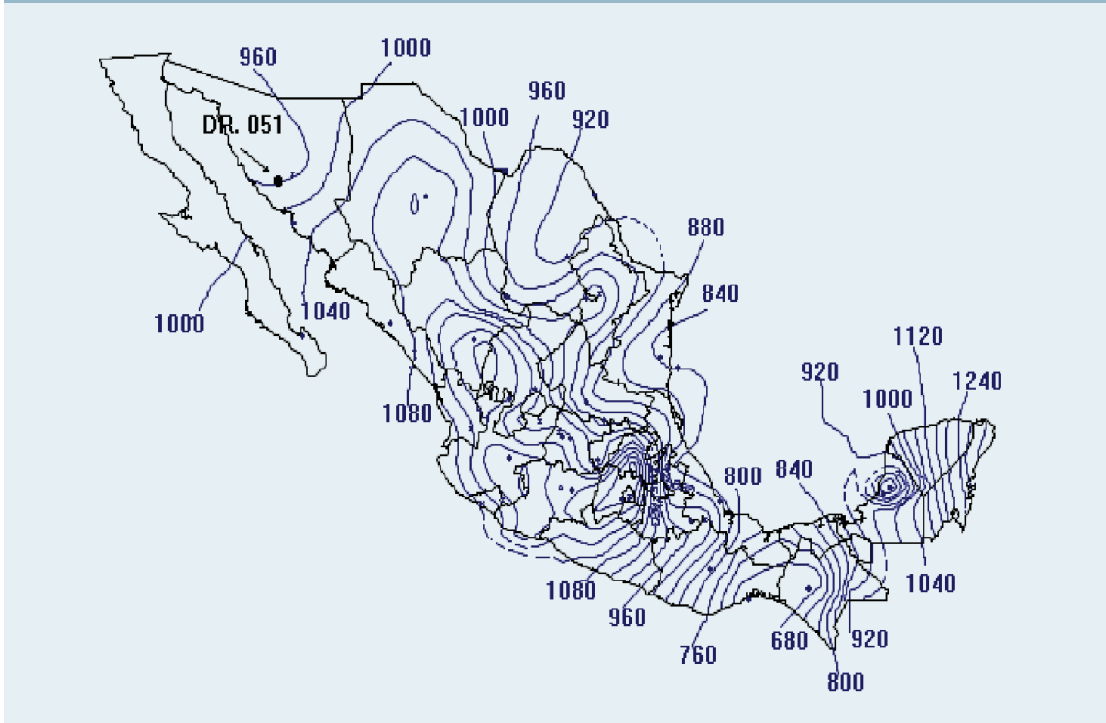
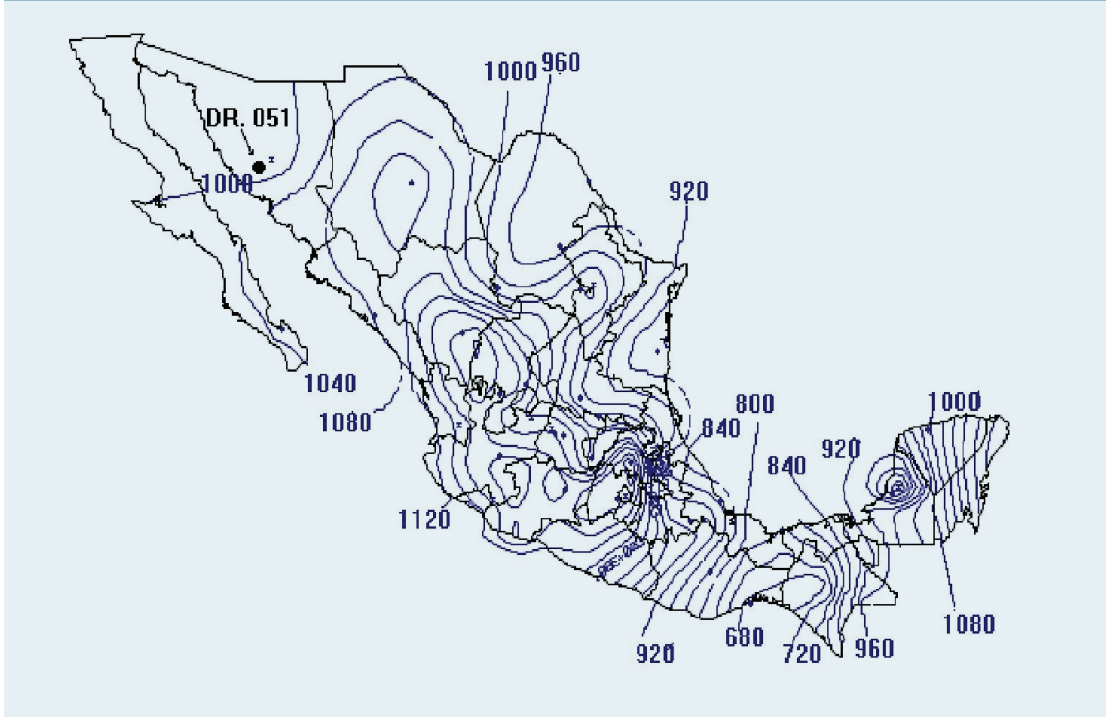


Figura 32. Evapotranspiración potencial. Escenario con incremento de 3 °C.
(Martínez-Austria et al, 1998).



Gestión del agua y cambio climático

En México, la gestión del agua presenta ya retos de enorme envergadura (Conagua, 2006). Se trata de un país con un gran contraste de climas: mientras en el norte prevalecen los ambientes secos o muy secos, sujetos a sequías recurrentes, en el sur son húmedos con tormentas tropicales e inundaciones frecuentes (figura 33). La precipitación media, de alrededor de 771 mm anuales es, como muchos promedios, un valor engañoso, así se puede apreciar en la figura 34, pues mientras en las regiones sur, costeras y centro se registran valores de 2,000 mm anuales, en el noroeste solo se precipitan

apenas 250 mm y en el noreste se apuntan escasos 500 mm anuales. En un contraste que es bien conocido, la mayor parte de la población, con el consecuente desarrollo económico, se asienta en las regiones donde se dispone de menos agua, como se muestra en la figura 35.

La Organización de las Naciones Unidas considera que la disponibilidad de agua es baja si se encuentra entre 2,001 y 5,000 m³/hab/año, muy baja si se ubica entre 1,001 a 2,000 m³/hab/año y extremadamente baja cuando se registran

Figura 33. Climas de México (Conagua, 2000).

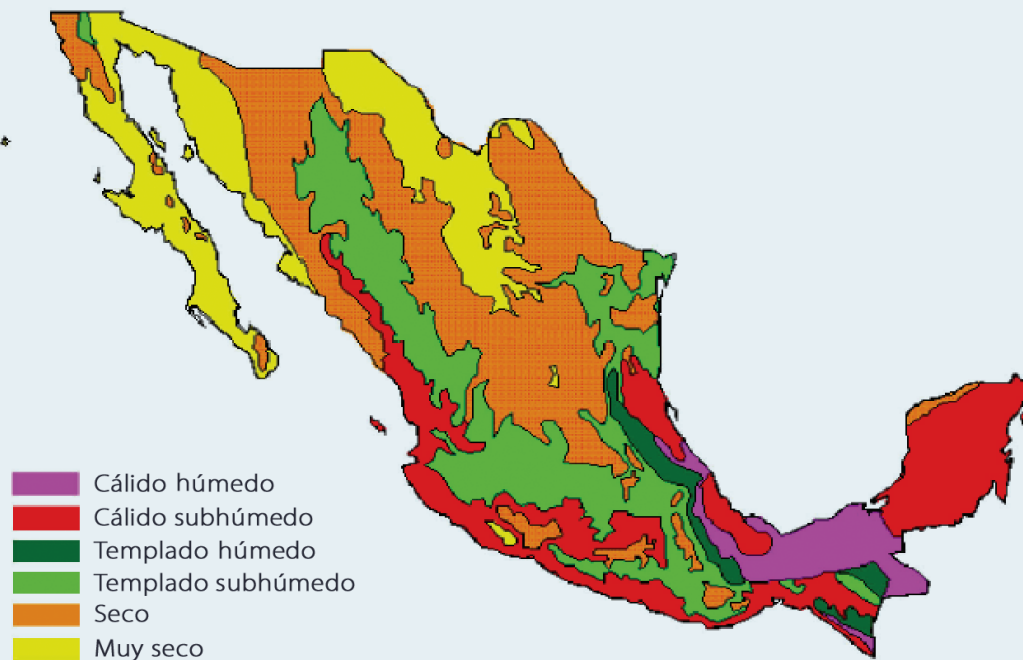


Figura 34. Precipitación media anual promedio (Conagua, 2006).

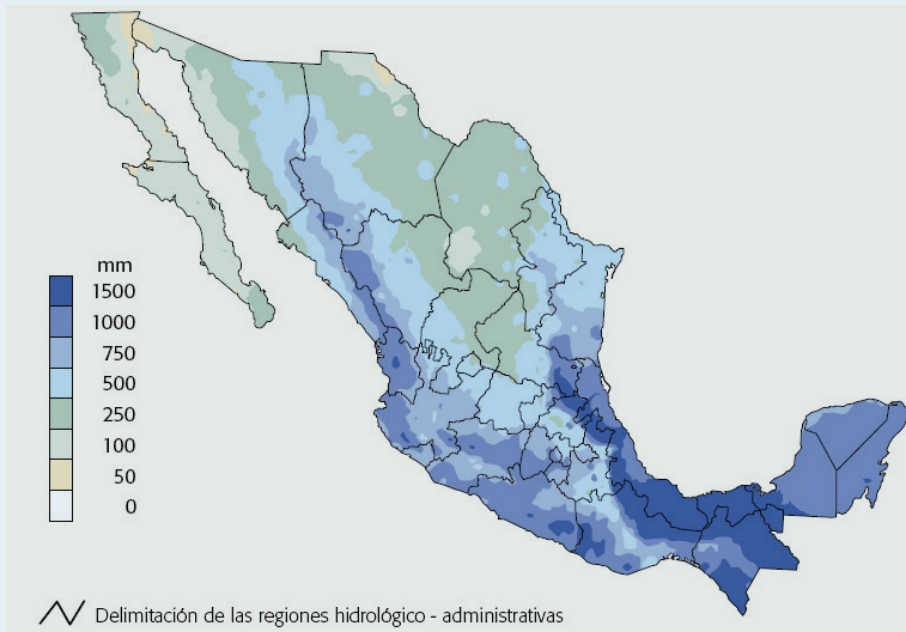
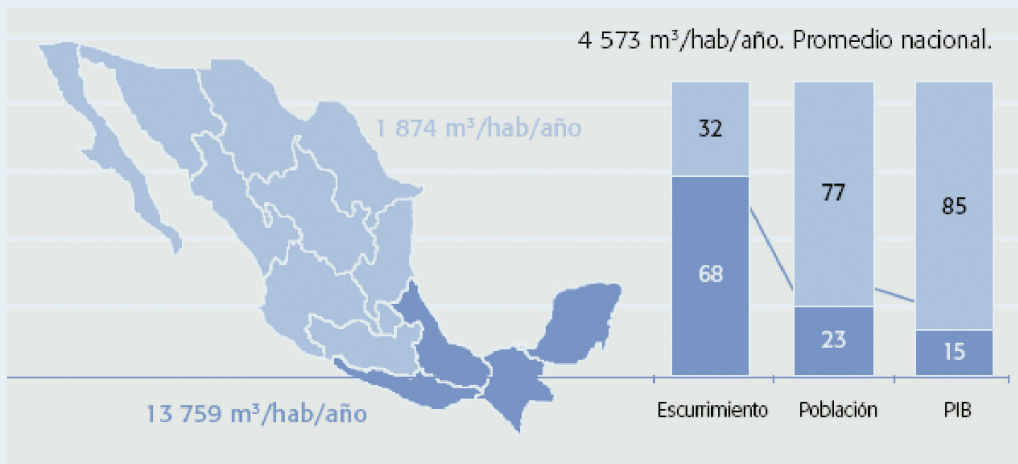
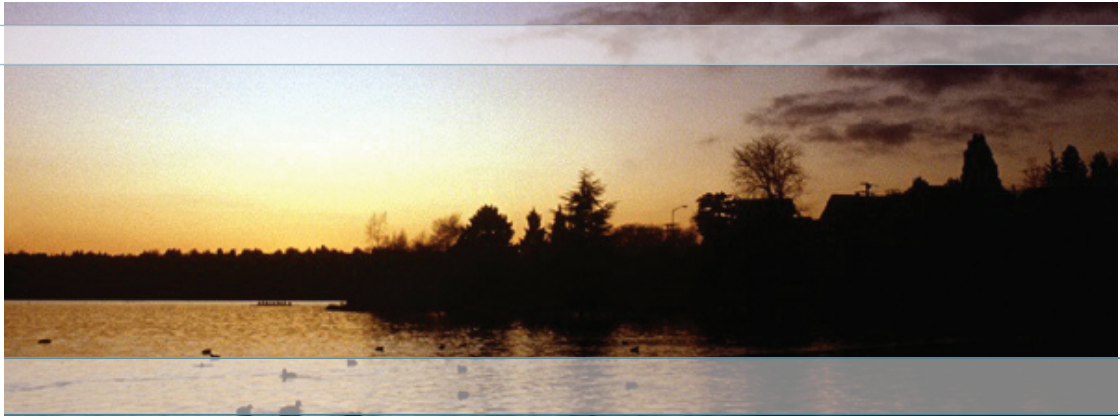


Figura 35. Contraste entre desarrollo y disponibilidad del agua (Conagua, 2006).



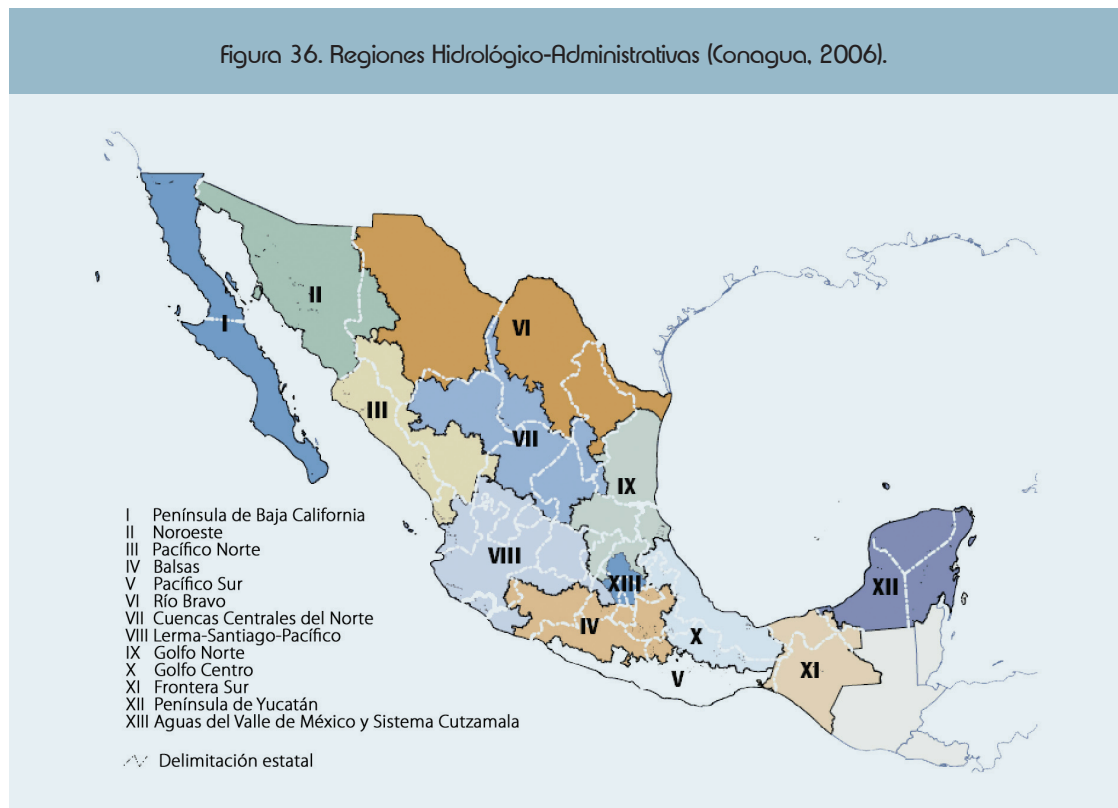


menos de 1,000 m³/hab/año. En México la disponibilidad ha venido disminuyendo debido al desarrollo económico y, principalmente, al crecimiento demográfico. Así, la disponibilidad per cápita pasó de 11,500 m³/hab/año en 1955 a 2,500 m³/hab/año en el año 2000. Con las tasas actuales de crecimiento, en el año 2025 se espera que se reduzca a 3,500 m³/hab/año, lo que generará una mayor escasez en las zonas áridas y semiáridas.

Para la administración del recurso hídrico, la Conagua ha dividido al país en 13 regiones hidrológico-administrativas, que se muestran en la figura 36.

Aún sin cambio climático, la gestión de los recursos hídricos en México se complicará en los próximos años como resultado del crecimiento demográfico y del desarrollo económico, que típicamente incrementa el consumo per cápita. En la tabla 6 se presenta la disponibilidad de

Figura 36. Regiones Hidrológico-Administrativas (Conagua, 2006).



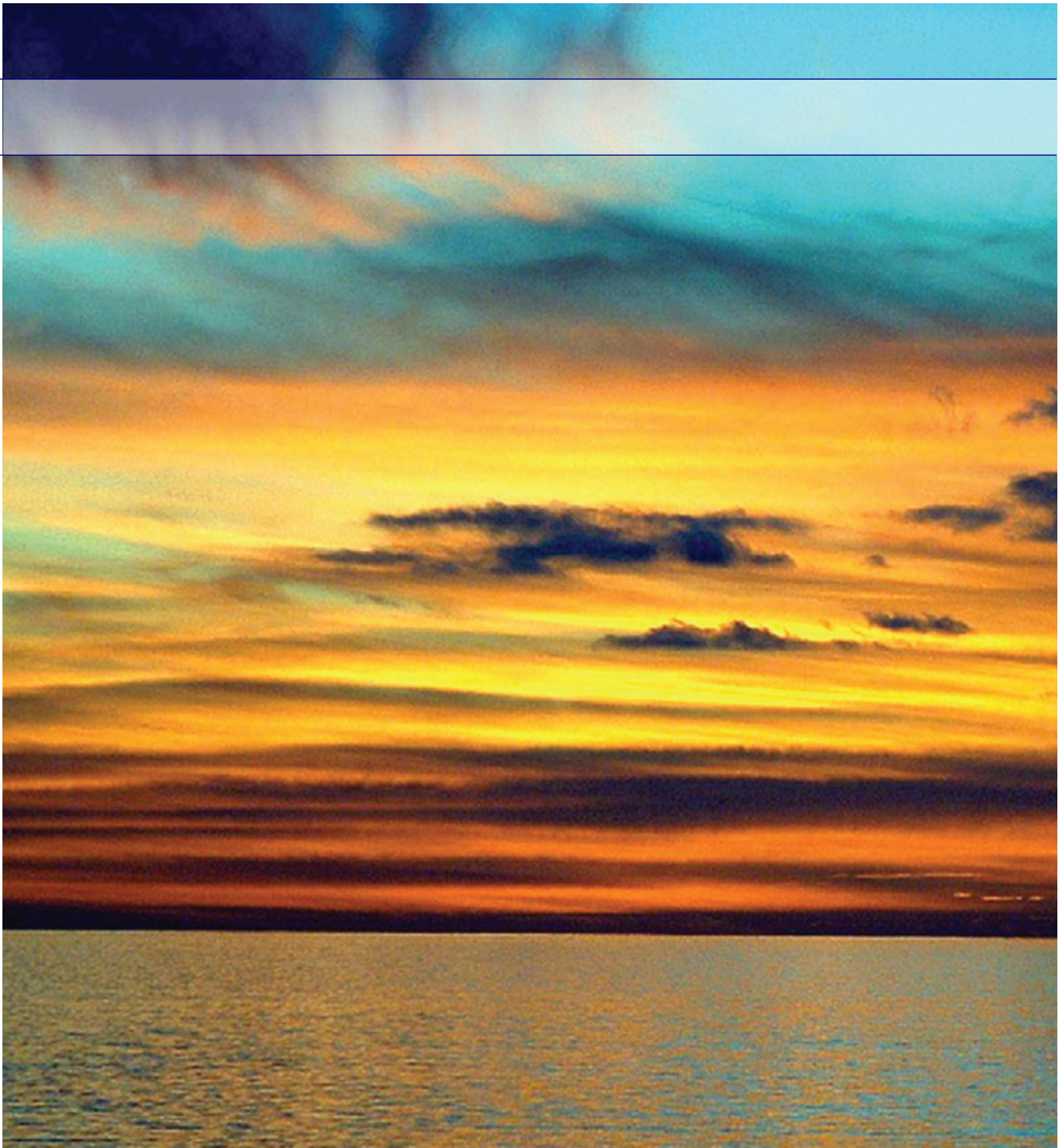
Región Hidrológica Administrativa	Disponibilidad natural media total (Hm ³)	Disponibilidad media per cápita, 2003 (m ³ /habitante)	Clasificación.	Disponibilidad media per cápita, 2025 (m ³ /habitante)	Clasificación
I PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA	4,423.00	1,336	Muy baja	833	Extremadamente baja
II NOROESTE	8,214.00	3,236	Baja	2,491	Baja
III PACÍFICO NORTE	24,741.00	6,035	Media	5,496	Media
IV BALSAS	28,909.00	2,713	Baja	2,402	Baja
V PACÍFICO SUR	33,177.00	7,963	Media	7,529	Media
VI RÍO BRAVO	13,718.00	1,324	Muy baja	974	Extremadamente baja
VII CUENCAS CENTRALES DEL NORTE	6,836.00	1,729	Muy baja	1,605	Muy baja
VIII LERMA-SANTIAGO-PACÍFICO	39,680.00	1,962	Muy baja	1,699	Muy baja
IX GOLFO NORTE	23,347.00	4,685	Baja	4,200	Baja
X GOLFO CENTRO	102,546.00	10,604	Alta	9,853	Media
XI FRONTERA SUR	157,999.00	24,674	Muy alta	19,758	Alta
XII PENÍNSULA DE YUCATÁN	29,063.00	8,178	Media	5,671	Media
XIII AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO Y SISTEMA CUTZAMALA	3,803.00	182	Extremadamente baja	156	Extremadamente baja

agua anual por habitante, en cada región hidrológica, para los años 2003 y 2025, que es el horizonte de planeación utilizado por la Conagua. Como puede apreciarse, el crecimiento demográfico, por sí solo, ocasionará una disminución de tal magnitud en la disponibilidad, que las regiones de la península de Baja California y del río Bravo cambiarán su clasificación de muy baja a extremadamente baja, lo que significa una disponibilidad por habitante inferior a 1,000 metros cúbicos anuales.

A este escenario debiera añadirse el efecto del cambio climático, sin embargo, no existen estudios regionales con suficiente resolución como para hacer una buena estimación. De manera cualitativa basta

considerar que en la región norte se espera, para el año 2080, para un nivel de estabilización de CO₂ de 550 ppm, una disminución del escurrimiento del orden del 15% (Met Office, 1999).

El cambio es de una dimensión tan grande en una zona que padecerá escasez severa, que debe ser incluido en los ejercicios de planeación de largo plazo. Es necesario que los administradores de recursos hidráulicos y sobre todo los responsables de las políticas públicas en el sector, tengan en cuenta los escenarios de cambio climático, de lo contrario podrían establecer estrategias de alcance insuficiente para adaptar los sistemas hídricos a la situación prevista con base en los estudios realizados.



Consideraciones finales

Consideraciones finales

El cambio climático es un proceso en marcha que tendrá importantes consecuencias sobre la disponibilidad de los recursos hídricos de México. Las diversas estimaciones coinciden en incrementos en la temperatura, hacia finales del siguiente siglo, de 3 a 4 grados centígrados.

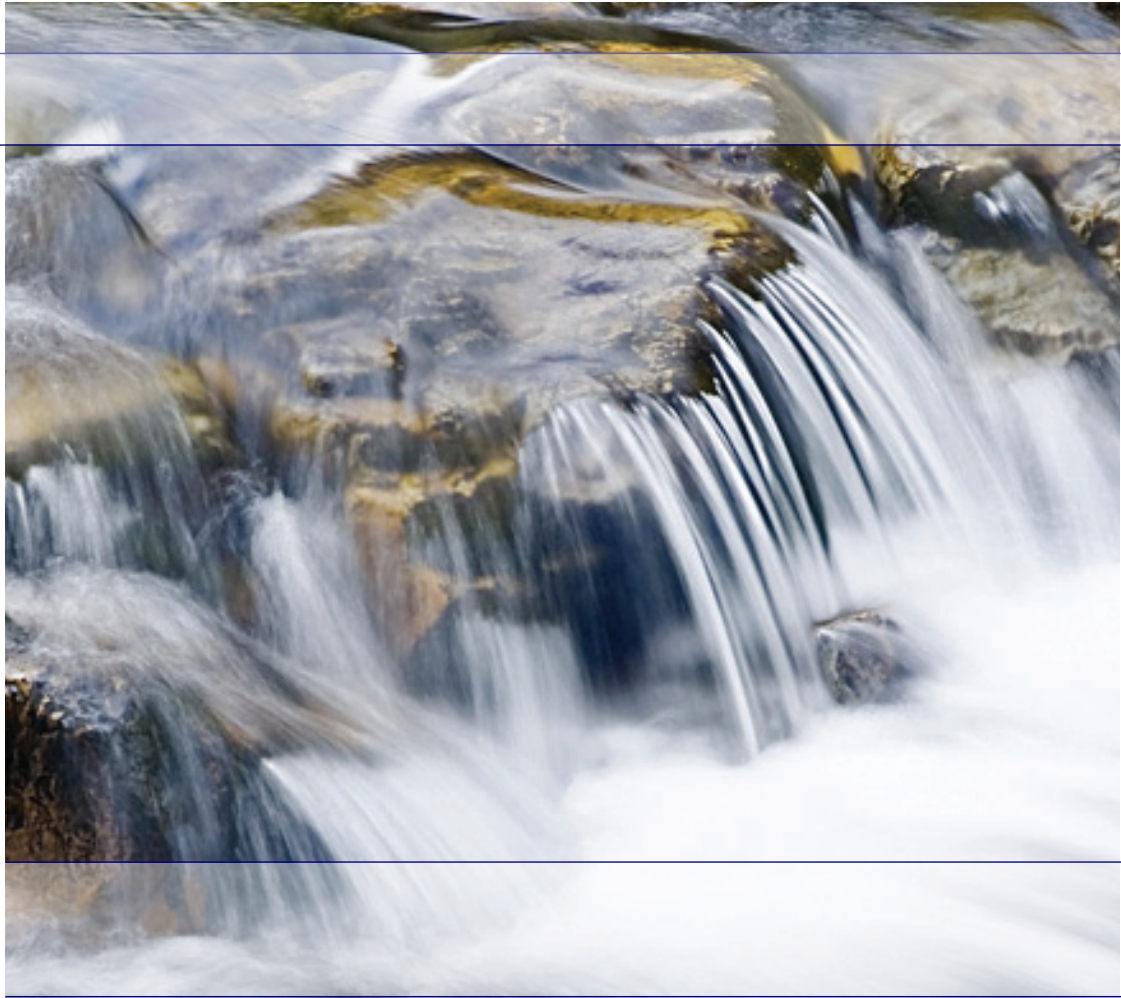
Las condiciones descritas ocasionarán alteraciones en la precipitación, principalmente en el norte del país, donde se esperan una menor frecuencia de lluvias en promedio, sequías más recurrentes e intensas y una disminución en el escurrimiento, que en algunas regiones será cercano al 20% al final del siglo XXI. Al incrementarse los requerimientos de agua, en especial en la agricultura, la demanda aumentará, lo que, junto con la menor disponibilidad natural, configura un escenario de creciente escasez. Al disminuir la precipitación promedio en el sureste, también se prevén menores volúmenes disponibles para generación de energía.

Por otra parte, se pronostica que las tormentas tropicales aumenten su intensidad, no así su frecuencia. Se observarán más huracanes de categorías cuatro y cinco con precipitaciones más intensas.

El incremento del nivel del mar en las costas de México, propiciará la vulnerabilidad de algunas regiones a las inundaciones, pues se disminuye la capacidad de descarga de los cauces. Son previsibles mayores riesgos, en especial en las desembocaduras del río Grijalva en Tabasco, y de los ríos de Coatzacoalcos y Pánuco, en Veracruz.

El cambio en la elevación de los océanos, intensidad y patrones de oleaje y corrientes litorales podría ocasionar alteraciones notables en los procesos de erosión-sedimentación en las zonas costeras, lo que tendría efectos ambientales de consideración en manglares y lagunas litorales.





Se espera que el incremento del nivel del mar tendrá efectos relevantes también en la salinización de los acuíferos costeros.

En las regiones áridas, es previsible una mayor frecuencia de sequías más intensas. Deberá prestarse especial atención a las cuencas de los ríos en la región norte, en especial en la del Bravo.

Se requiere, para precisar estos resultados, realizar estudios detallados de aquellas zonas que este análisis ha mostrado como más vulnerables. En la tabla 7 se presenta una descripción cualitativa de los principales efectos del cambio climático en las diversas regiones hidrológico-administrativas de México, que puede orientar los estudios de vulnerabilidad y adaptación más necesarios para cada zona. La gestión del

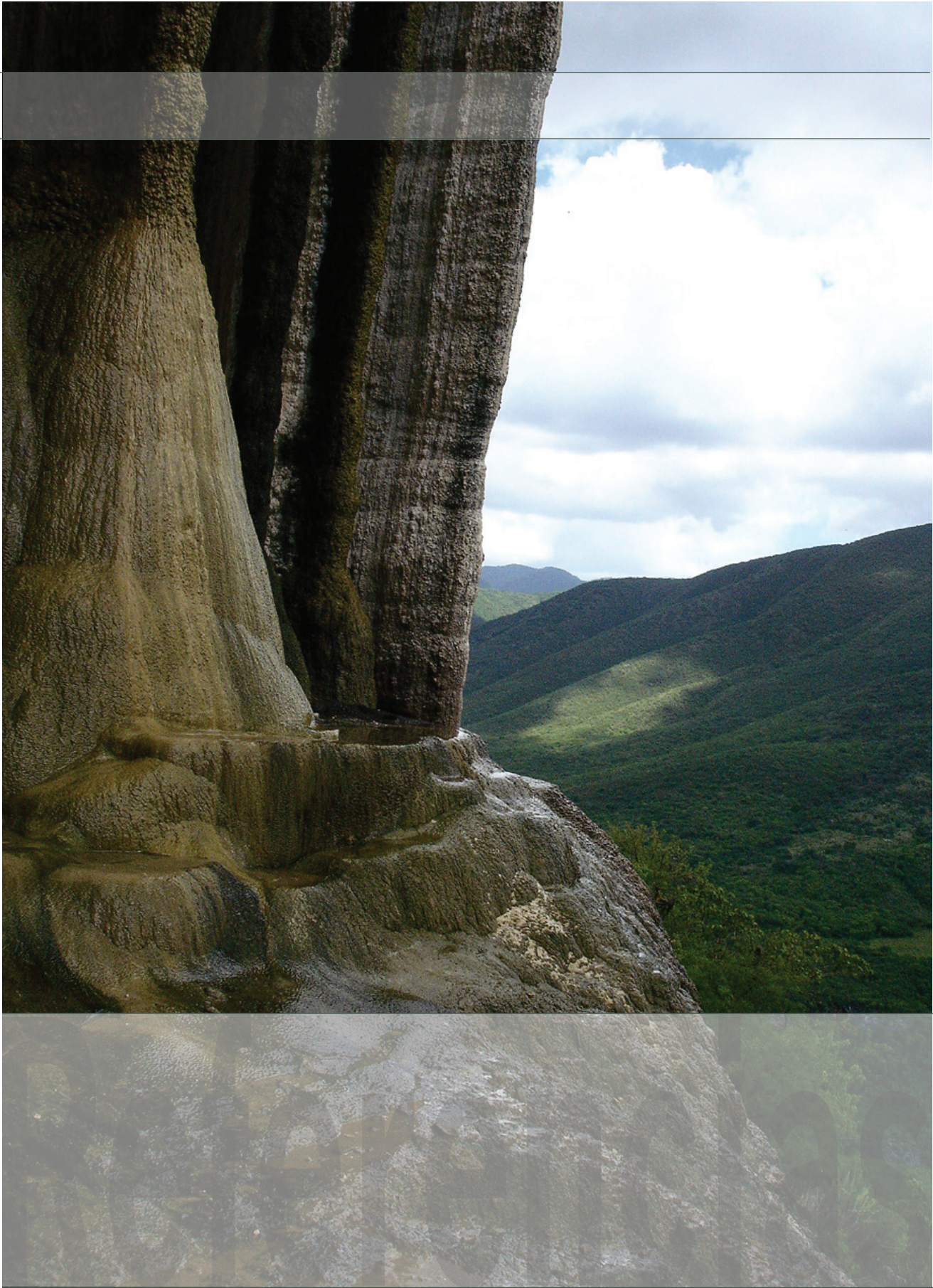
agua en el futuro, ya complicada por el crecimiento demográfico y económico en zonas de escasez natural, propondrá retos aún mayores como consecuencia del cambio climático. Es urgente que se realicen estudios regionales para eliminar en lo posible la incertidumbre en los pronósticos, localizar los efectos, definir las medidas de adaptación y priorizar su aplicación en las regiones que resulten más vulnerables. Será necesaria una estrategia específica para el agua en el Programa Nacional de Acción Climática.

Finalmente, no se ha estudiado el efecto del cambio climático en la calidad del agua, en particular en lagos y otros cuerpos de agua superficial, que se sabe se verán afectados negativamente pero en una magnitud desconocida.

Tabla 7. Vulnerabilidad cualitativa de las Regiones Hidrológico-Administrativas de México.

Región Hidrológico-Administrativa	EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO						
	Cambios en la demanda	Cambios en la disponibilidad	Escasez	Huracanes y tormentas	Sequías	Cambios en el nivel del mar	Observaciones
I Península de Baja California	Mayores	Menor disponibilidad	Muy vulnerable	Poco vulnerable en su mayor parte	Vulnerable	Poco vulnerable	La cuenca depende de escurrimientos de los EUA, que se reducirán
II Noroeste	Mayores Agricultura mayor usuario	Menor disponibilidad	Muy vulnerable	Poco vulnerable	Vulnerable	Efectos en intrusión salina en acuíferos costeros	Es una de las regiones con mayor vulnerabilidad en México
III Pacífico Norte	Mayores Agricultura mayor usuario	Inciertos	Vulnerable, por mayor requerimiento	Vulnerable	Incierto	Efectos en intrusión salina en acuíferos costeros	Se requieren mayores estudios y modelación para esta región
IV Balsas	Mayores	Probable disminución	Vulnerable	Vulnerabilidad alta en zona costera de Guerrero y Michoacán	Vulnerable	Principalmente en la desembocadura de río Balsas	Efectos severos en la agricultura de temporal en Tlaxcala y zonas altas
V Pacífico Sur	Mayores	Inciertos. Algunos modelos predicen aumento en la precipitación	Poco vulnerable, excepto en las zonas altas montañosas	Muy vulnerable, en especial en la zona costera	Poco vulnerable	Poco vulnerable	Es una de las regiones más vulnerables al efecto de tormentas más severas
VI Río Bravo	Altos, por efectos demográficos y aumento de temperatura	Se prevén importantes reducciones en el escurrimiento y recarga de acuíferos	Muy vulnerable	Poco vulnerable	Muy vulnerable	No es vulnerable	Es una de las cuencas de México más importantes y más vulnerables a sequías y escasez
VII Cuencas Centrales del Norte	Altos, por aumento de la temperatura	Se prevén importantes reducciones en el escurrimiento y recarga de acuíferos	Muy vulnerable	No aplica	Muy vulnerable	No es vulnerable	Es una de las cuencas de México más vulnerables a sequías y escasez.
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Media	Incierta, los modelos predicen poco cambio	Muy vulnerable, por el grado de explotación	Poco vulnerable	Vulnerable, tiene gran variabilidad natural.	Poco vulnerable	Se requieren estudios detallados para esta región, por su alta vulnerabilidad actual y lo incierto de los escenarios
IX Golfo Norte	Alto, por el aumento de temperatura	Probablemente aumente, según la mayoría de los modelos	Poco vulnerable	Vulnerable	Poco vulnerable	Muy vulnerable en la desembocadura de diversos ríos	Probable necesidad de revisión de diseños de obras hidráulicas, presas y de control de inundaciones
X Golfo centro	Alto, por el aumento de temperatura	Probablemente aumente, según la mayoría de los modelos	Poco vulnerable	Vulnerable	Poco vulnerable	Muy vulnerable en la desembocadura de diversos ríos	Probable necesidad de revisión de diseños de obras hidráulicas, presas y de control de inundaciones. Especial cuidado en prevención de avenidas en zonas montañosas
XI Frontera Sur	Mayor, por cambios en la temperatura	Menores, por la gran disponibilidad actual de la región	Poco vulnerable	Altamente vulnerable, en especial en la costa de Chiapas	Poco vulnerable, pero se requerirán obras de almacenamiento	Muy vulnerable, en especial en las llanuras de inundación de los ríos Grijalva y Campotón	Probable necesidad de revisión de diseños de obras hidráulicas, presas y de control de inundaciones. Especial cuidado en prevención de avenidas en zonas montañosas
XII Península de Yucatán	Altos, por cambios en la temperatura	Vulnerable, pues no se cuenta con almacenamientos	Vulnerable, si no se toman medidas de adaptación en captación y almacenamiento	Muy vulnerable en la zona costera	Estacionales. Vulnerable	Vulnerable, por intrusión salina en acuíferos	Por su peculiar geología, ser requieren estudios muy detallados
XIII Valle de México	Poco significativos	Poco significativos. Ya es una región deficitaria	Muy vulnerable	Vulnerable, pero poco asociado al cambio climático	Poco vulnerable	No aplica	Ya es una región deficitaria. Se requieren costosas medidas de adaptación





Referencias

- Arnell, N. (1999). Climate Change and global water resources. *Global Environmental Change*, 9, pp. 31-49.
- Arnell, N.; Chunzhen Liu., editors (2001). Hydrology and Water Resources. Chapter 4 in *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. James J. McCarthy, Osvaldo F. Canziani, Neil A. Leary, David J. Dokken, Kasey S. White (editors). Cambridge University Press, Cambridge. U.K. pp195-233.
- Conagua (2006). *La Gestión del Agua en México. Avances y Retos*. Comisión Nacional del Agua. México.
- Conagua (2004). *Estadísticas del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua. México. 141 pp.
- Conagua (2001). *Plan Nacional Hidráulico 2001-2006*. Comisión Nacional del Agua. México. 128 pp.
- Conagua (2000). *El agua en México. Retos y avances*. Comisión Nacional del Agua. México. 161 pp.
- Easterling D.R., Evans J.L., Groisman P.Ya., Karl T.R., Kunkel K.E., Ambenje P. (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin of American Meteorological Society*. 81, march. pp.417-425.
- Frederick K. D., Gleick P. H. (1999). *Water & Global Climate Change: Potential Impacts on U. S. Water Resources*. Prepared for the Pew Center on Global Climate Change. 48 pp.
- Hulme, M. y Sheard, N. (1999), *Escenarios de Cambio Climático para Mesoamérica*, Unidad de Investigación Climática, Universidad de Norwich, Reino Unido, 6pp.
- IPCC (1995), *Climate Change 1995 – The science of climate change. Second assessment report*. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N.Harris, A. Kattenberg and Maskell (editors). Cambridge University Press, Cambridge. U.K. p. 572.

- IPCC (2001), *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. James J. McCarthley, Osvaldo F. Canziani, Neil A. Leary, David J. Dokken, Kasey S. White (editors). Cambridge University Press, Cambridge. U.K. 1005 pp.
- IPCC (2000). *Special Report on Emission Scenarios*. Disponible en <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>
- IPCC (2001a), *Technical Summary of the Working Group I Report: Global Change: The Scientific Basis*. D. A. Albritton, L. G. Meira Filho (coordinating lead authors). 83 pp.
- IPCC (2001b) *Cambio Climático 2001: Informe de síntesis. Resúmenes de los grupos de trabajo*. Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- IPCC (2001c) *Cambio Climático 2001: Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas*. Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- IPCC (2001d) *Cambio Climático 2001: Resumen para responsables de políticas y Resumen Técnico*. Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007. Summary for policy makers*. Intergovernmental Panel for Climate Change. Geneva, Switzerland. 18 pp.
- IPCC (2007a) *Climate Change 2007: The physical sciences basis. Report of the Group I of the IPCC*. 987 pp.
- IPCC (2007b) *Technical Summary. Climate Change 2007: The physical sciences basis. Report of the Group I of the IPCC*. 74 pp.
- Jacobs K., Adams D.B., Gleick P. (2000). *Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States*. Chapter 14 of the National Assessment . *Climate Change Impacts on the United States*. pp. 405-435.
- Knutson, T., Tuleya R. E., Shen W., Ginis I. (2001). *Impact of CO₂-induced warming on hurricane intensities as simulated in a hurricane model with ocean coupling*. *Journal of Climate*. Vol. 14. pp. 2458-2468.
- Knutson, T., Tuleya R. E. (2004). *Impact of CO₂-induced warming on simulated intensity and precipitation: sensitivity to choice of climate model and convective parametrization*. *Journal of Climate*. Vol. 17, No. 18. pp. 3477-3495.
- Linz H., I. Shiklomanov y K. Mostefa Kara (1990), *Hydrology and Water Resources*". Chapter 4 of *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. James J. McCarthley, Osvaldo F. Canziani, Neil A. Leary, David J. Dokken, Kasey S. White (editors). Cambridge University Press, Cambridge. U.K. 1005 pp.
- Met Office (1999). *Climate Change and its impacts. Stabilization of CO₂ in the atmosphere*. Hadley Center for Climate Prediction and Research. The Met Office. United Kingdom. 27 pp.
- Morales P. R., Magaña V., Barrera C. M., Pérez J. L. (2001). *Efectos del calentamiento global en la disponibilidad de los recursos hidráulicos de México*. Proyecto HC 0112. IMTA-CNA. México. 151 pp.
- Martínez-Austria P., Mundo-Molina M. (1995). *Climate change effects on Yaqui valley agriculture, Management of water resources in North America III. Anticipating the 21st century*. American Society of Civil Engineering.
- Martínez-Austria P.; Hernández L.; Mundo Molina M. (1998). *Global Warming effects on the water balance in México*. 7th International Conference on Computers in Agriculture. Florida, october 26-30th, 1998. ASAE, The society for Engineering and Agricultural, Food and Biological Systems.



Mundo Molina M., Martínez Austria P. (1994). Efectos del Cambio Climático en la Agricultura del Valle del Yaqui, Sonora, México. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. IX. Num. 1.

Obasi, G.O.P. (1997), Climate Change and Freshwater Management. Lecture presented at the First World Water Foeum. Marrakesh, Morocco. 22 march. 16pp.

Semarnap (1997). Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México. 149 pp.

Semarnap (1999). Programa Nacional de Acción Climática. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México. 189 pp.

Semarnat (2001) Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 376 pp.

Semarnat (2006) Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 254 pp.

El libro *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México* se terminó de imprimir, en su primera edición, el mes de septiembre de 2007 en los talleres de Sentido y Significado, S.A. de C.V. El tiraje consta de mil ejemplares.

