

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
U.S. COUNTRY STUDIES PROGRAM

MÉXICO: UNA VISIÓN HACIA EL SIGLO XXI. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO



RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS DE LA
VULNERABILIDAD DEL PAÍS, CORDINADOS
POR EL INE CON EL APOYO DEL U.S.
COUNTRY STUDIES PROGRAM



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO



U.S. Country Studies Program
Support for Climate Change Studies, Plans,
and Technology Assessment

Support the principles & Objectives of the
U.S. Framework Convention on Climate Change

PROGRAMA UNIVERSITARIO DE MEDIO AMBIENTE
-CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA



Programa
Universitario de
Medio
Ambiente



MÉXICO: UNA VISIÓN HACIA EL SIGLO XXI. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

Carlos Gay García
Compilador



María del Carmen Rodríguez Hernández
Coordinación editorial y diseño de portada

Raquel Araujo Loaiza
Apoyo cartográfico

***D. R. 1999 UNAM. Programa Universitario de Medio Ambiente
ISBN: 968-36-7562-X***

Editorial Toffer S.A. de C.V.

Prohibida la reproducción parcial o total de la obra, sin autorización
expresa del autor

Impreso en México
Noviembre del 2000

Contenido

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA

Julia Carabias Lillo

*Secretaria de Medio Ambiente, Recursos
Naturales y Pesca*

Enrique Provenio Durazo

*Presidente del Instituto Nacional de
Ecología*

Francisco Giner de los Ríos Diez Canedo
Director General de Regulación Ambiental

Julia Martínez Fernández

Directora de Cambio Climático

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Juan Ramón de la Fuente Ramírez
Rector

René Drucker Colín

Coordinador de la Investigación Científica

Raúl Herrera Becerra

Secretario de Investigación y Desarrollo

Irma Rosas Pérez

*Coordinadora del Programa Universitario
de Medio Ambiente*

Contenido

Prólogo	V
Introducción	IX
Capítulo I	
ESCENARIOS FÍSICOS REGIONALES	
<i>Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México.</i> Víctor Magaña, Cecilia Conde, Óscar Sánchez y Carlos Gay.	1
Capítulo II	
SEQUÍA METEOROLÓGICA	
<i>Sequía meteorológica.</i> María Engracia Hernández Cerda, Laura Angélica Torres Tapia y Gonzalo Valdéz Madero.	25
Capítulo III	
RECURSOS HIDROLÓGICOS	
<i>Los recursos hidrológicos del Centro de México ante un cambio climático global.</i> Laura Elena Maderey R. y Arturo Jiménez R.	41
Capítulo IV	
ECOSISTEMAS FORESTALES	
<i>El cambio climático y la vegetación en México.</i> Lourdes Villers Ruiz e Irma Trejo-Vázquez.	63
Capítulo V	
ZONAS COSTERAS	
<i>Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México.</i> Mario Arturo Ortiz Pérez y Ana Patricia Méndez Linares.	83

Capítulo VI

AGRICULTURA

Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. Margarita Flores, Raquel Araujo y Edith Betancourt. 103

Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES - Maize. Cecilia Conde, Rosa Ma. Ferrer y Diana Liverman. 119

Capítulo VII

ENERGÍA E INDUSTRIA

La vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos ante el cambio climático global. María Teresa Sánchez Salazar y Maribel Martínez Galicia. 143

Capítulo VIII

ASENTAMIENTOS HUMANOS

Los asentamientos humanos y el cambio climático en México. Un escenario futuro de vulnerabilidad regional. Adrián Guillermo Aguilar. 171

Un escenario de las condiciones bioclimáticas en la Ciudad de México para una duplicación en la concentración de CO₂. Ernesto Jáuregui y Adalberto Tejeda. 195

Prólogo

En 1992, cuando México firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, los estudios que se realizaban en el país para comprender este fenómeno y anticipar sus consecuencias eran escasos, estaban dispersos y la difusión de sus resultados se limitaba a pequeños grupos interesados en el tema. Esta situación se debía, principalmente, a la escasez de recursos económicos y a la falta de coordinación y comunicación entre los grupos que investigaban el tema, aunados al poco conocimiento e interés del público ante un problema cuya trascendencia apenas se daba a conocer.

Al entrar en vigor la Convención, los países desarrollados asumieron su responsabilidad histórica como principales contribuyentes al cambio climático global. El reconocimiento de la citada responsabilidad se tradujo, como parte de los compromisos adoptados, en flujos de recursos hacia las naciones en vías de desarrollo, con el fin de que estas realizaran estudios para evaluar su participación en el efecto invernadero adicional y los efectos que podría ocasionar el cambio climático global en sus territorios. La firma de la Convención reafirmó, además, la necesidad de que cada gobierno recabara la información suficiente para definir las políticas y las líneas de acción más convenientes para sus países, con el objeto de cumplir los compromisos contraídos.

En el caso de México, esta necesidad se vio parcialmente satisfecha gracias al apoyo económico otorgado por el *U.S. Support for Country Studies to Address Climate Change*, que permitió llevar a cabo la Primera Fase del Estudio de País: México. Este estudio se realizó bajo la coordinación y supervisión del Instituto Nacional de Ecología y contó con el apoyo científico de la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Programa Universitario de Energía y los Institutos de Ingeniería, Geografía y Ecología; participaron también el Instituto Mexicano del Petróleo, el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural.

Prólogo

En 1992, cuando México firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, los estudios que se realizaban en el país para comprender este fenómeno y anticipar sus consecuencias eran escasos, estaban dispersos y la difusión de sus resultados se limitaba a pequeños grupos interesados en el tema. Esta situación se debía, principalmente, a la escasez de recursos económicos y a la falta de coordinación y comunicación entre los grupos que investigaban el tema, aunados al poco conocimiento e interés del público ante un problema cuya trascendencia apenas se daba a conocer.

Al entrar en vigor la Convención, los países desarrollados asumieron su responsabilidad histórica como principales contribuyentes al cambio climático global. El reconocimiento de la citada responsabilidad se tradujo, como parte de los compromisos adoptados, en flujos de recursos hacia las naciones en vías de desarrollo, con el fin de que estas realizaran estudios para evaluar su participación en el efecto invernadero adicional y los efectos que podría ocasionar el cambio climático global en sus territorios. La firma de la Convención reafirmó, además, la necesidad de que cada gobierno recabara la información suficiente para definir las políticas y las líneas de acción más convenientes para sus países, con el objeto de cumplir los compromisos contraídos.

En el caso de México, esta necesidad se vio parcialmente satisfecha gracias al apoyo económico otorgado por el *U.S. Support for Country Studies to Address Climate Change*, que permitió llevar a cabo la Primera Fase del Estudio de País: México. Este estudio se realizó bajo la coordinación y supervisión del Instituto Nacional de Ecología y contó con el apoyo científico de la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Programa Universitario de Energía y los Institutos de Ingeniería, Geografía y Ecología; participaron también el Instituto Mexicano del Petróleo, el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural.

Los principales objetivos del proyecto fueron:

- a) Proveer al gobierno mexicano una base amplia para diseñar estrategias y políticas de respuesta a los impactos del cambio climático, al analizar las implicaciones socioeconómicas de dichos cambios.
- b) Establecer las bases para actualizarse en las medidas de adaptación y mitigación contempladas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
- c) Asistir al gobierno en la implantación de medidas para restaurar el ambiente, en el entendido de que lo que se haga ahora evitará la degradación del ambiente en el futuro.
- d) Ofrecer apoyo técnico al gobierno mexicano tanto en su participación en los foros internacionales, como en los grupos de trabajo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático y a los cuerpos subsidiarios de la Convención, así como a la Convención misma.

El Estudio de País: México, se dividió en tres grandes áreas:

1. **Inventarios.** La obtención de un inventario de gases de efecto invernadero, que incluye fuentes y sumideros, con especial atención en la reforestación, como una medida de mitigación.
2. **Escenarios.** Desarrollo de escenarios climáticos a nivel global, regional y local; escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero que permitieran el estudio de las implicaciones económicas de diferentes opciones de carácter tecnológico o de política ambiental climática.
3. **Vulnerabilidad.** Estudio de la vulnerabilidad del país al cambio climático que, a su vez, se dividió en siete áreas: desertificación y sequía meteorológica, recursos hidrológicos, ecosistemas forestales, zonas costeras, agricultura, energía e industria y asentamientos humanos.

Como acción fundamental e integradora del proyecto se realizó el Primer Taller del Estudio de País: México ante al Cambio Climático, en Cuernavaca, Morelos del 18 al 22 de abril de 1994. En él se discutieron la estructura del estudio y las metodologías que se seguirían en cada una de las áreas.

La participación de representantes de más de 15 instituciones nacionales y extranjeras, cuyas investigaciones tenían o podían tener relación con el cambio climático, sirvió de base para la discusión de las metodologías que serían empleadas en el futuro.

Un año después, del 8 al 11 de mayo de 1995, se realizó, en Cuernavaca, Morelos, el Segundo Taller del Estudio de País, en el que se explicaron los avances logrados en un año de esfuerzo. Las presentaciones permitieron conocer los progresos de cada área, corregir las fallas y ensayar nuevos esquemas.

En estos talleres se intercambiaron ideas, se expresaron dudas y se propusieron acciones. Uno de los problemas más graves a superar fue la dificultad para adquirir información, debido a la variedad y dispersión de la misma. No obstante, las discusiones entre el grupo interdisciplinario, conformado para este estudio, tuvieron gran valor para el desarrollo de nuevos vínculos y colaboraciones futuras. Otro de los frutos fue la publicación de las Memorias de cada uno de los Talleres.

En enero de 1996, durante el Tercer Taller del Estudio de País: México, llevado a cabo en las instalaciones del Antiguo Colegio de San Ildefonso, se mostraron los resultados finales del proyecto; participaron en el taller la M. en C. Julia Carabias, Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap), el Dr. José Sarukán, Rector de la Universidad Nacional Autónoma de México y William White responsable del proyecto por parte del *U. S. Country Studies Program*.

Algunos resultados obtenidos en el área de vulnerabilidad se han difundido por medio de revistas especializadas y en foros internacionales; sin embargo, creímos necesaria la publicación de un libro, en el cual, se presentaran no sólo los resultados obtenidos sino también las metodologías utilizadas, con un espacio mayor para cada uno de los artículos.

Esta inquietud nos llevó a platicar con el Dr. Francisco Javier Garfias y Ayala, Director del Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA) de la UNAM, acerca de la posibilidad de realizar una coedición del libro. Ante el interés mostrado, se envió el borrador del material al PUMA para someterlo a su consideración. Los evaluadores de esta obra aportaron valiosos comentarios que la enriquecen.

Finalmente, el Instituto Nacional de Ecología agradece a:

El *U.S. Country Study Program*, del Gobierno de Estadounidense, por el financiamiento y ayuda técnica prestada al Estudio de País: México.

La Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Nacional Autónoma de México, por su importante ayuda en la administración de los fondos y al centro de Ciencias de la Atmósfera por su valiosa colaboración en la coordinación científica del mismo.

A cada uno de los investigadores que hicieron posible la realización del Estudio de País: México.

Muy especialmente al Programa Universitario de Medio Ambiente de la UNAM, por su participación y comentarios sobre la edición y publicación de este libro en el cual damos a conocer los resultados de vulnerabilidad del Estudio de País: México.

Introducción

El último siglo se ha caracterizado por un impresionante desarrollo tecnológico. Así, hoy en día es posible, por ejemplo, viajar al espacio o erradicar enfermedades anteriormente consideradas mortales, mientras que comunicarse a distancia, procesar y transferir grandes volúmenes de información en cuestión de segundos son ya cosa de todos los días. Sin embargo, esta revolución tecnológica ha traído consigo elevados costos ambientales que en algunos casos resultan obvios, como la deforestación, la extinción de especies, el aumento de la desertificación y la contaminación del aire y del agua; y que en otros, no son perceptibles sino hasta después de un determinado tiempo. Este es, por ejemplo, el caso del cambio climático global, causado por la emisión antropogénica de grandes volúmenes de gases de efecto de invernadero a la atmósfera.

El "efecto invernadero" es un fenómeno natural que explica porqué la Tierra tiene las temperaturas que observamos. Básicamente, lo que ocurre es que la atmósfera impide que la superficie de la Tierra pierda excesivamente calor por radiación. La Tierra se calienta al absorber parte de la radiación solar que llega a ella, mientras la otra parte es reflejada al espacio por las nubes. Al calentarse, la superficie del planeta emite radiación de onda larga (infrarroja) hacia el espacio, una parte de ella logra atravesar la atmósfera, mientras que la otra es absorbida y reemitida a todas direcciones por las nubes y los gases contenidos de manera natural en la Troposfera, como el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3) y vapor de agua, gracias a ello es posible que la temperatura promedio del planeta sea de 15°C y, por lo tanto, de que existan condiciones aptas para la vida. Sin embargo, al aumentar concentraciones de estos gases hay mayor absorción de radiación infrarroja, dando como resultado un aumento en la temperatura y con ello lo que se conoce como "cambio climático global".

El cambio climático inducido por la actividad humana representa una presión adicional importante para los ecosistemas y los sistemas socioeconómicos, que ya se ven afectados por la contaminación, la creciente demanda de recursos y las prácticas no sustentables de aprovechamiento de los mismos.

Gracias a la investigación científica, que ha analizado y correlacionado los registros históricos de temperatura y de la concentración de CO₂ en la atmósfera, se ha establecido que existe una estrecha relación entre estas dos variables, por lo que se puede esperar que ante un aumento en las concentraciones de CO₂, como el que se ha venido dando desde la revolución industrial, se presente un aumento en la temperatura global.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con el objeto de analizar la información científica disponible sobre cambio climático, los impactos ambientales y socio económicos de este fenómeno y formular las estrategias de respuesta necesarias.

En las conclusiones del segundo reporte de evaluación del PICC (1995), se recopila la mejor y más reciente información científica sobre el tema. Destaca que las concentraciones de CO₂ en la atmósfera se han incrementado desde la época preindustrial, de 280 a casi 360 partes por millón por volumen (ppmv) y que este incremento puede ser atribuido, en gran parte, a las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo y la agricultura. Se piensa que los aumentos observados en el nivel del mar (de unos 10 a 25 cm) y en la temperatura promedio de la superficie (de 0.3°C a 0.6°C) durante este mismo periodo son consecuencia de esta situación.

De acuerdo con este informe, para el año 2100 se podría esperar que la temperatura global promedio tenga un incremento entre 1°C y 3.5°C en relación con la temperatura actual y que el nivel del mar aumente entre 15 y 95 cm con respecto al presente.

Estudios como los realizados por el PICC en términos generales concluyen que los países en vías de desarrollo son más vulnerables por encontrarse en regiones más susceptibles al cambio de la temperatura y la precipitación y por no contar con suficientes recursos para poder adaptarse al mismo.

El primer paso para combatir este fenómeno, que afecta a todo el planeta, se dio durante la Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro, Brasil, en 1992, cuando más de 150 países, entre ellos México, firmaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

La Convención establece responsabilidades comunes pero diferenciadas para los países signatarios, a quienes clasifica en tres grandes grupos: El Anexo I lo comprenden los países desarrollados y los que tienen economías en transición a economías de mercado; los que, además de satisfacer los compromisos establecidos para todas las Partes de la Convención, deberán reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2000 al nivel que tenían en 1990. El Anexo II es un subgrupo de los países del Anexo I que tendrán que prestar ayuda económica y tecnológica a aquellos con menores recursos para enfrentar los impactos del cambio climático, y el último grupo está integrado por los llamados países no-Anexo I, o países en vías de desarrollo, cuyos compromisos se reducen, a grandes rasgos, a realizar, actualizar y publicar periódicamente inventarios de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, a llevar a cabo programas nacionales y regionales de mitigación y adaptación y conservar sumideros de carbono (captura de carbono en los bosques por medio de la fotosíntesis). México pertenece a este último grupo.

En México, el Instituto Nacional de Ecología (INE) de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap) ha sido el encargado de planear, coordinar y evaluar las investigaciones sobre cambio climático, desarrolladas en su mayoría dentro del marco del Estudio de País. Este proyecto ha contado con el apoyo del *United States Country Studies Program* (USCSP), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el gobierno de Canadá, e incluye el inventario nacional de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero por fuentes y sumideros, estudios sobre escenarios de emisiones y climáticos, el análisis de la vulnerabilidad del país ante este fenómeno y la evaluación de opciones de mitigación y adaptación.

Algunos resultados de estos estudios se emplearon en la elaboración de la *Primera Comunicación de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, que fuera presentada para cumplir con los compromisos adquiridos por México en el contexto de la ratificación de la misma, durante la Conferencia de las Partes ocurrida en Kioto, Japón, en diciembre de 1997.

También se publicó, el *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero*, (1995), que da a conocer nuestra contribución a las causas del cambio climático y los sectores con más emisiones. Los resultados del inventario señalan los sectores en los que se podría invertir para reducir estas emisiones, y a la vez proporciona las bases para hacer comparaciones con la contribución de emisiones de otros países. Aunque nuestro país pertenece al grupo de los 15 mayores emisores, su participación representa menos del 2% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, y las emisiones *per cápita* (3.5 toneladas de CO₂) corresponden a un país en vías de desarrollo.

Este libro constituye una síntesis de las investigaciones realizadas en torno a la vulnerabilidad de México ante el cambio climático global, por un grupo de investigadores que han colaborado con el INE en la primera fase del Estudio de País, con lo que se pretende aportar una visión de conjunto de lo que podría suceder en México en el futuro cercano.

De acuerdo con los resultados de estos estudios, México es un país vulnerable. Los escenarios climáticos futuros predicen aumentos en la temperatura, pero no son específicos en cuanto a la precipitación, ya que para algunos modelos de circulación general de la atmósfera la precipitación aumentaría mientras que en otros disminuiría. Por ello, para los estudios de vulnerabilidad se han utilizado dos modelos, con el fin de tener los dos escenarios probables. La sequía meteorológica muestra una tendencia a aumentar sus niveles de severidad en varias regiones; mientras la competencia por el uso de los recursos hídricos será mayor debido a la escasez y al aumento de la población, situación que ya se presenta en algunas regiones hidrológicas del país. En cuanto a los ecosistemas forestales, los estudios en ambos escenarios han revelado que el cambio climático induciría cambios en un 50% de la cubierta vegetal actual, siendo los bosques templados los más afectados.

Algunas zonas costeras bajas en la cuenca del Golfo de México podrían verse amenazadas por el ascenso en el nivel del mar, y por las tormentas que encontrarían un recorrido más libre por lo que sus efectos podrían penetrar más profundamente en el continente.

En cuanto a las actividades productivas analizadas, la agricultura de temporal se vería seriamente afectada. Actualmente, en la mayor parte del país se obtienen bajos rendimientos de maíz de temporal (de 1 a 1.5 ton/ha), que con un cambio climático verían disminuida aún más su productividad. Los sectores energético e industrial, se verían afectados por la escasez de agua y la inundación de zonas costeras.

No podemos dejar de lado las implicaciones directas que el cambio climático tendría en la población, como un aumento en cierto tipo de enfermedades, la migración del campo hacia la ciudad, la escasez de agua, aunados al incremento de la población y su concentración en ciertos centros urbanos.

La estructura que hemos dado a esta publicación tiene como objeto que el lector comprenda, en primera instancia, cómo se construyeron los escenarios climáticos futuros, que son la base para todos los estudios de vulnerabilidad. Más adelante, se encuentran los estudios de la vulnerabilidad sobre aspectos físicos, como la sequía meteorológica, los recursos hídricos, los ecosistemas forestales y las zonas costeras, que influyen en un gran número de actividades económicas y sociales. Posteriormente están los estudios sobre la vulnerabilidad en sectores productivos como la agricultura, energía e industria y, para finalizar, la vulnerabilidad de los asentamientos humanos y de la población.

En el capítulo I se proponen escenarios climáticos en condiciones de una duplicación de la concentración atmosférica de CO₂, obtenidos por medio de Modelos de Circulación General (MCG), aumentos arbitrarios de temperatura y precipitación, y combinaciones de ambos, con el fin de permitir la evaluación de la vulnerabilidad del país con respecto a sus recursos, actividades productivas y bienestar.

El capítulo II se refiere a las modificaciones que experimentaría la sequía meteorológica ante un cambio climático. Para determinar dicho cambio se calculó su severidad en función del déficit de precipitación respecto a la pluviosidad media anual o estacional de largo período y de su duración en una región dada.

En el capítulo III, se tratan las posibles repercusiones del cambio climático sobre los recursos hidrológicos. En este estudio se dividió al país en 12 regiones y se aplicó un modelo de balance térmico hidrológico. Este modelo evalúa los escurrimientos, disponibilidad y reservas de estos recursos en términos de temperatura, precipitación, radiación, humedad del suelo y evapotranspiración. De esta manera se establecieron índices de vulnerabilidad relacionados con la disponibilidad, consumo, extracción y almacenamiento de agua.

El capítulo IV expone los efectos que el cambio climático tendría sobre los ecosistemas forestales definidos a través de la clasificación de zonas de vida de Holdridge y los sistemas de clasificaciones mexicanas basados en los estudios climáticos de Köppen, modificados por García (1988) y en la evaluación de la vegetación de México por Rzedowski (1992). En este caso, la vulnerabilidad se definió en función de las variaciones en la cubierta forestal forzadas por condiciones de cambio climático.

Las zonas costeras mexicanas son vulnerables al aumento del nivel del mar causado por la expansión térmica de los océanos y por la incidencia de huracanes. El capítulo V trata del estudio que se centró en la región del Golfo de México, pues ocupa la tercera parte del litoral mexicano y cuenta con 6 de los 10 puertos pesqueros y 3 de los 5 puertos industriales más importantes del país. Para el análisis se utilizaron fotografías aéreas de los últimos 50 años y se digitalizaron 115 cartas topográficas. Para determinar cuáles serían las zonas más vulnerables se supusieron incrementos arbitrarios del nivel del mar de 0.5 m por década hasta llegar a los 2 m de elevación.

En el capítulo VI se presentan estimaciones sobre las repercusiones que podría tener un posible cambio climático sobre la producción del

maíz de temporal, parte fundamental del sustento de los mexicanos. El análisis se basó en la comparación de los rendimientos y la superficie apta para este cultivo entre el escenario actual y los escenarios de cambio climático. El estudio consideró también posibles medidas de adaptación (como cambio en la fecha de siembra y aumento en el uso de fertilizantes) a implantarse para contrarrestar los efectos negativos de este fenómeno, así como su viabilidad económica.

Por lo general, los estudios que se realizan sobre energía e industria dentro del marco del cambio climático se centran en cómo reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. En el capítulo VII se analizan las repercusiones de este fenómeno en los sectores de energía e industria de una manera diferente. Este análisis se enfocó en los factores que influyen en la vulnerabilidad de estos sectores, así como su nivel de incidencia. Se realizó un diagnóstico de estos dos sistemas para el escenario base o actual y dado un cambio climático, determinando la dinámica de su comportamiento territorial y definiendo las particularidades y diferencias regionales que en el comportamiento de ambos sistemas se presentan en México con base en la aplicación de los MCG.

Finalmente, la vulnerabilidad de los asentamientos humanos es el tema del capítulo VIII. Los efectos del cambio climático se pronosticaron para cada estado de la república con base en datos actuales sobre morbilidad, densidad de población, su distribución y crecimiento, la proporción de la población urbana con respecto a la población total y el consumo de agua por habitante. Además, se presenta un estudio de caso sobre las condiciones bioclimáticas en la Ciudad de México dado una duplicación de las concentraciones atmosféricas de CO₂.

El verdadero valor de las investigaciones aquí presentadas reside en que constituyen una base para realizar una planeación estratégica de las futuras acciones de adaptación, que se traducirían en una reducción de los costos ecológicos, económicos y sociales del cambio climático. Actualmente algunas de estas acciones ya se están llevando a cabo en las zonas del país identificadas como las más vulnerables.

Capítulo I

Escenarios físicos regionales

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS REGIONALES DE CLIMA ACTUAL Y DE CAMBIO CLIMÁTICO FUTURO PARA MÉXICO

Víctor Magaña*, Cecilia Conde*, Óscar Sánchez* y Carlos Gay.**

Resumen

El conocimiento del clima del planeta y del cambio climático es fundamental para el análisis de la vulnerabilidad ante el cambio climático y para determinar estrategias de adaptación. La comparación entre las condiciones actuales y las que potencialmente se presentarían ante un cambio climático permite la identificación y la cuantificación del grado de vulnerabilidad de los lugares donde se tendrían efectos adversos (por ejemplo, reducción en rendimientos agrícolas, o disminución del nivel de los cuerpos de agua). Para regionalizar los escenarios de cambio climático global generados por Modelos de Circulación General (MCG), se pueden establecer criterios basados en principios físicos que relacionen condiciones de gran escala con el clima regional. En forma simple, esto se hace mediante esquemas de interpolación lineal. Tal metodología ha sido empleada por la mayoría de los grupos involucrados en el Estudio de País, impulsado por el *U. S. Country Studies Program*.

En este estudio, se presentan los cambios climáticos regionales para México, obtenidos mediante la interpolación de salidas de MCG para experimentos numéricos de $1xCO_2$ (concentración actual de CO_2) y $2xCO_2$ (Duplicación de la concentración actual de CO_2). Las condiciones de cambio climático y su impacto potencial en las regiones más vulnerables son interpretadas con base en el clima actual. Se discuten las limitaciones del método de interpolación, como una técnica de reducción de escala y se propone un nuevo método para relacionar las salidas de MCG con

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

** Instituto Nacional de Ecología, Semarnap.

el clima regional, que podría emplearse en futuros estudios de vulnerabilidad.

Palabras clave: Escenarios climáticos, modelos de circulación general, modelos climáticos regionales.

1. Introducción

El Estudio de País: México se inició en 1994 y se terminó en 1995; abarcó tres líneas principales de investigación: inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, escenarios de cambio climático y vulnerabilidad.

En la sección de vulnerabilidad se incluyeron siete temas: zonas costeras, agricultura, hidrología, bosques, desertificación y sequía, asentamientos humanos, y energía e industria. Todos ellos, excepto zonas costeras, requirieron del desarrollo de escenarios de cambio climático, como base para el análisis de vulnerabilidad y adaptación. Los escenarios, actual y de cambio climático, se construyeron con datos observados y salidas de los MCG. Dichos modelos son la herramienta más útil de que se dispone en la actualidad para modelar el clima y el cambio climático (Houghton, *et al.*, 1992).

Los escenarios actuales o *base* se construyen utilizando datos de por los menos 30 años, para que sean representativos de las condiciones climáticas promedio. Se considera que en ese lapso hubo, para la región de estudio, años con condiciones climáticas muy variadas. Para construir los escenarios climáticos base en el Estudio de País: México, se utilizó el periodo de 1951 a 1980.

Cabe señalar que, de manera análoga, se tienen que construir *escenarios base* en los estudios específicos de vulnerabilidad; los cuales permitirán analizar las tendencias en la erosión o en la deforestación, por ejemplo; o bien, para el crecimiento de la población o en la productividad en la región de estudio. Los estudios de vulnerabilidad no sólo incluyen la sensibilidad del sistema ante un posible cambio climático, sino también la capacidad de respuesta (natural o planeada) de dicho sistema al cambio.

Los MCG son modelos tridimensionales que deben simular necesariamente a la atmósfera y a los océanos, a nivel global. En la atmósfera se

incluyen los vientos, la humedad, las nubes y la concentración de los diversos gases que la componen, analizando sus variaciones temporales y sus variaciones con la altura. En el océano, estos modelos consideran las corrientes marinas, la temperatura y la salinidad y, de manera semejante a la atmósfera, estudian las variaciones de estos parámetros con el tiempo y en el espacio. Los MCG también tienen que modelar la temperatura en la superficie terrestre, los cuerpos de agua y, en ocasiones, y de manera simplificada, la orografía continental (McGuffie, *et al.*, 1997).

Los modelos resuelven las ecuaciones básicas de la física en cada uno de los sistemas citados (océano, atmósfera, continente). Las soluciones de esas ecuaciones proporcionan las condiciones específicas de la atmósfera y del océano en un número de *puntos de malla*, que se obtienen al dividir la superficie del Planeta en una serie de rectángulos, de tal forma que por último se tenga una malla o rejilla regular.

Los modelos más modernos construyen estos rectángulos con una resolución de 2 a 5° latitud x longitud, por lo que algunas mallas abarcan espacialmente entre 200 y 400 km. Finalmente, los MCG incluyen desde 6 hasta 50 niveles atmosféricos en la vertical.

Por lo anterior, los MCG tienen como primera limitante el compromiso que se establece entre la resolución espacial y el tiempo requerido para realizar las simulaciones numéricas. En segundo lugar, su resolución espacial impide utilizarlos de manera directa para estudios regionales o locales.

No obstante, estos modelos simulan las condiciones globales de temperatura, precipitación y radiación incidente, bajo condiciones actuales o bajo condiciones de una duplicación en la concentración de bióxido de carbono, referidas como 1xCO₂ (330 partes por millón) y 2xCO₂, respectivamente. Las condiciones de 2xCO₂ se emplean para simular el cambio climático global, ya que el bióxido de carbono es un gas de efecto invernadero cuyo incremento se ha asociado directamente con la actividad humana desde mediados del siglo pasado (Watson, *et al.*, 1995). Según los escenarios de emisiones futuras, la duplicación en la concentración de este gas podría manifestarse para mediados o finales del siglo XXI, provocando un calentamiento global.

El objetivo principal de este trabajo es entonces generar escenarios de cambio climático **regionales** empleando las salidas de MCG, de tal

forma que puedan ser utilizados en los estudios de vulnerabilidad al cambio climático en México.

2. Datos y métodos

Para evaluar los efectos del cambio climático se comparan las condiciones actuales del clima, determinando las regiones más vulnerables a fluctuaciones del mismo (sequía, inundaciones, pérdidas agrícolas, etcétera.), con los escenarios obtenidos a partir de los MCG.

Al hacer la interpolación de los resultados de los experimentos numéricos de cambio climático debe considerarse la congruencia entre las características de los datos observados (variables del clima actual) y la información proporcionada por los modelos (tipo, disponibilidad de salidas de los MCG, homogeneidad, resolución espacial, etcétera).

Algunos grupos del estudio requieren de datos altamente específicos. Por ejemplo, se sabe que el modelo CERES, usado en estudios de agricultura, requiere de datos diarios de temperatura máxima y mínima, precipitación y radiación, entre otros, durante un periodo determinado para lugares específicos.

Las simulaciones de cambio climático obtenidas a partir de los MCG no generan información tan detallada, por lo que se emplean medias mensuales, estacionales o anuales de variables meteorológicas para el análisis de vulnerabilidad (por ejemplo, asentamientos humanos, desertificación y sequías, etcétera).

Para establecer las condiciones actuales del clima se utilizan medias mensuales de temperatura y precipitación de varias fuentes disponibles; y la variabilidad climática se establece mediante las anomalías. Una posibilidad fue la base de datos CLIM, para el periodo 1941-1970 (Kinter y Dotty, 1994), proveniente del *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*. La estructura de estos datos (resolución espacial) propicia una comparación directa con la salida del Modelo Termodinámico (Adem, 1982) en experimentos de duplicación en la concentración de CO₂ (Conde, *et al.*, 1994). Sin embargo, en última instancia, se determinó que los nuevos conjuntos de datos son más adecuados para estudios de clima regional en México. Arthur Douglas, de la Universidad de Creighton, Nebraska, ha usado técnicas de control de calidad para regionalizar los datos del Servicio Meteorológico Nacional. Estos datos están disponibles en Internet (<http://hurricane.ncdc.noaa.gov>).

Douglas definió dieciocho regiones climáticas para México con datos climáticos del periodo 1948-1988, basado en criterios como la coherencia entre datos pertenecientes a las estaciones climatológicas y características geográficas de cada estación. Cada región incluyó un mínimo distinto de estaciones en relación con la variable muestreada.

En este estudio se utilizó el periodo 1951-1980 de la base de datos de A. Douglas, para obtener un escenario base compatible con los otros grupos del Estudio de País.

Para el análisis del cambio climático regional y la determinación del grado de vulnerabilidad de cada región se usaron dos métodos por incrementos de temperatura y precipitación y por modelación.

El primero, consistió en incrementos arbitrarios de temperatura (+2 y +4° C) y precipitación (10% y 20%), así como combinaciones de ambos. Los incrementos funcionaron como pruebas de sensibilidad al calentamiento global, bajo cambios uniformes en las condiciones climáticas de México. Estas pruebas de sensibilidad se realizaron en la mayoría de los análisis de vulnerabilidad en el Estudio de País: México.

El segundo método representa una aproximación más comprensible físicamente en el uso de las salidas de los MCG que corresponden a experimentos de duplicación en la concentración de CO₂, con temperatura y precipitación en superficie, generados por los esquemas propios de los MCG. Se han usado varios MCG para estudiar el impacto del incremento en los gases de efecto invernadero en la atmósfera. En el presente estudio, las salidas interpoladas de los MCG como el del *Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL-R30)* y el del *Canadian Climate Center (CCC)* fueron empleadas en el marco de programa de Estudio de País. Ambos modelos son MCG atmosféricos, es decir, el océano y la atmósfera no interactúan durante el experimento.

El modelo GFDL-R30 tiene una resolución espacial de 2.22° de latitud por 3.75° de longitud, lo que define una malla con 96x80 puntos. Tiene, además, 9 niveles verticales (de altitud) y arroja un incremento en la temperatura promedio de +4°C, si hubiera un calentamiento global. El modelo CCC tiene una resolución de 3.75° latitud por 3.75° longitud, con 10 niveles en la vertical y un total de 96x48 puntos de malla y pronostica un incremento global promedio de 3.5 °C en la temperatura.

Las salidas de los modelos para condiciones actuales o de una duplicación en la concentración de bióxido de carbono se obtienen suponiendo que esas condiciones prevalezcan de 10 a 15 años. Así, por ejemplo, la temperatura en condiciones de $2xCO_2$ en algún punto de malla en el mes de enero se obtiene de promediar los 10 o 15 valores de las respectivas simulaciones para ese mes. La anomalía de temperatura se obtendría de restar el valor promedio de enero bajo condiciones de $2xCO_2$ menos el valor promedio correspondiente, bajo condiciones de $1xCO_2$. Las anomalías para la precipitación (o la radiación) resultan de efectuar el cociente de esa variable bajo los dos escenarios ($2xCO_2$ entre $1xCO_2$).

Para generar escenarios de cambio climático en alguna región en particular, se interpolan los datos de los cuatro puntos de malla más cercanos, esto es, se obtiene un promedio de los valores asignados a esos 4 puntos, considerando su distancia a la localidad o región de interés. Esta metodología se ha empleado en la mayor parte de los países involucrados en el programa de Estudio de País, y para ser consistentes, se ha seguido aquí también (Magaña, *et al.*, 1997).

3. Resultados

Las dieciocho regiones climáticas definidas por Douglas son el resultado de usar datos de 92 estaciones climatológicas que reportan temperatura y 279 estaciones que reportan precipitación por un periodo de 30 años (fig.1). Así, cada región corresponde al conjunto de estaciones empleadas para caracterizarla y la base de datos respectiva permite definir al escenario base regional.

Los campos medios de temperatura y precipitación de invierno y verano en el periodo 1950-1980 se muestran en las figuras 2 y 3 respectivamente. En el cuadro 1 se presentan la temperatura y la precipitación medias mensuales para cada región climática. Estos campos medios son usados como un escenario base para evaluar la vulnerabilidad en agricultura, desertificación y sequía. Se aplican incrementos arbitrarios en temperatura y precipitación a estos campos, para probar la sensibilidad a cambios climáticos de cada una de las regiones y, por lo tanto, su grado de vulnerabilidad. La dispersión de las medias mensuales difícilmente excede 25% de los cambios propuestos por los modelos.

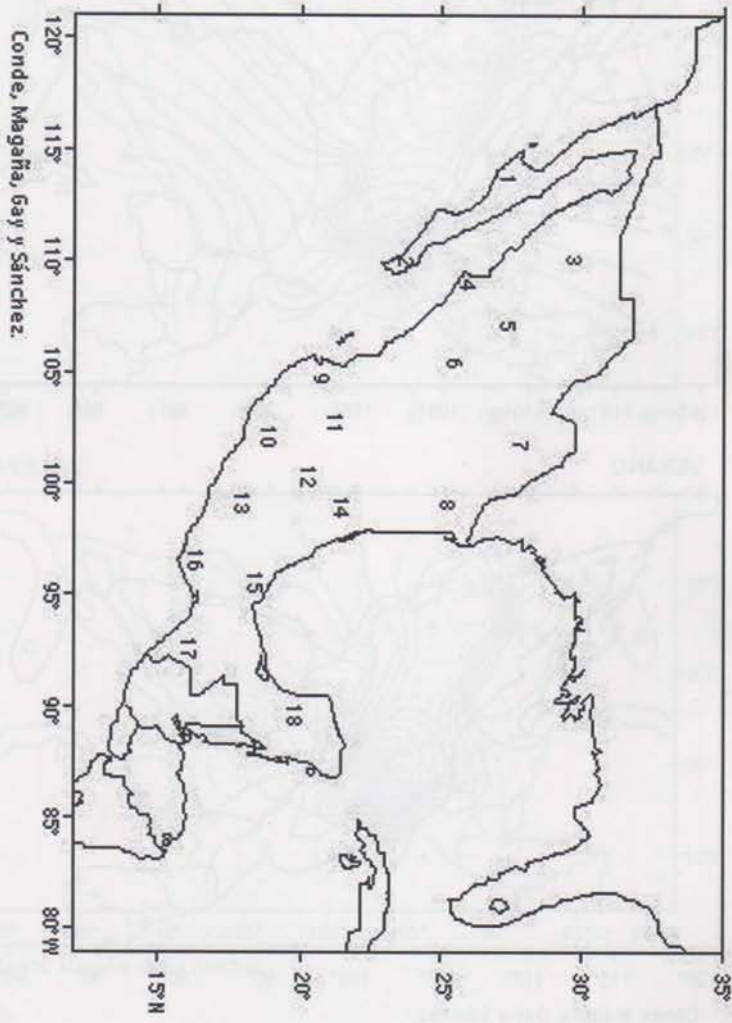


Figura 1. Mapa con las 18 regiones propuestas por A. Douglas.

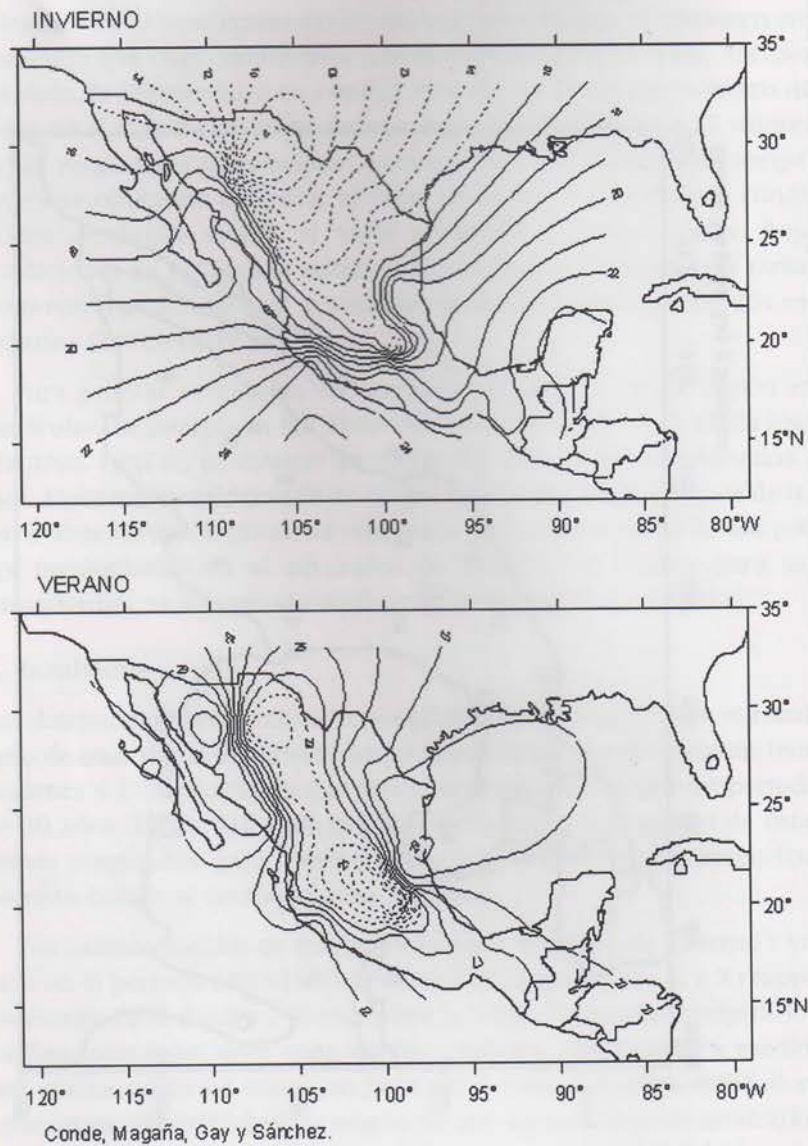
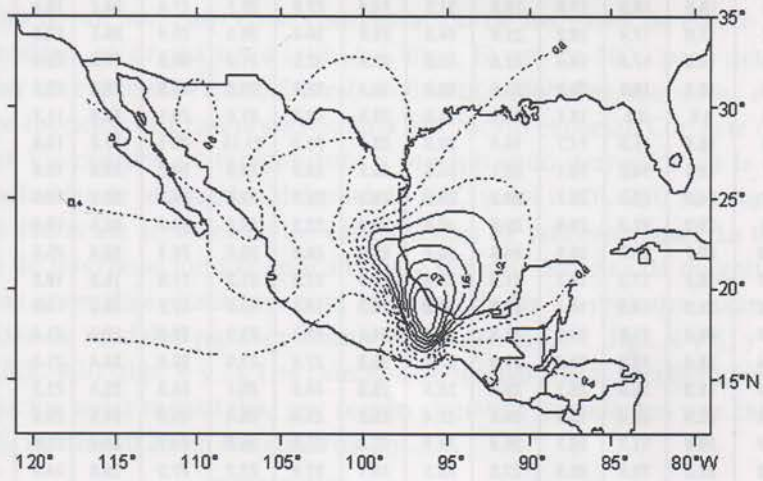
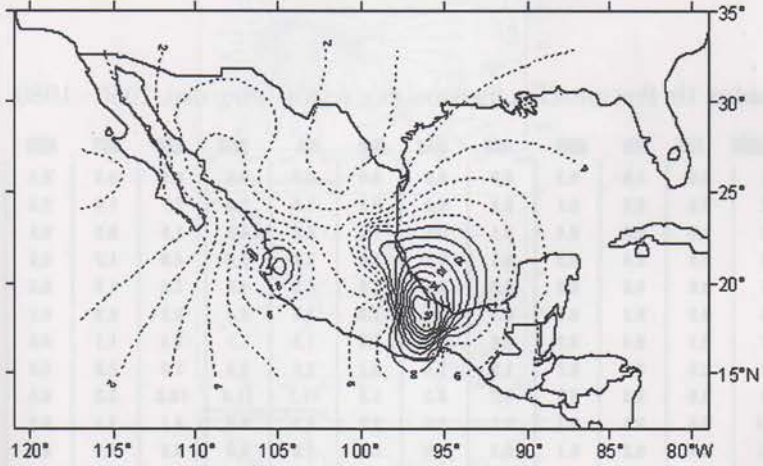


Figura 2. Temperatura media (°C) durante el periodo 1950-1980 para invierno (dic, ene, feb) y verano (jun, jul, ago).

INVIERNO



VERANO



Conde, Magaña, Gay y Sánchez.

Figura 3. Precipitación media (mm/día) durante el periodo 1950-1980 para invierno (dic, ene, feb) y verano (jun, jul ago).

Cuadro 1a. Temperatura mensual por región (°C) 1950 - 1980.

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	16.0	16.0	17.9	19.5	21.5	24.4	27.9	28.7	27.4	24.2	19.5	16.6
2	17.0	17.4	19.3	21.9	24.8	28.6	30.8	30.3	29.4	26.5	22.0	18.6
3	16.2	17.9	19.4	22.6	26.0	30.6	32.5	31.5	30.9	27.0	20.6	17.1
4	18.2	19.3	21.0	23.8	26.6	30.1	29.9	29.0	28.9	26.6	22.2	19.2
5	8.0	9.5	12.1	15.9	19.6	23.5	22.8	21.8	20.1	16.4	11.7	8.4
6	10.8	11.9	14.7	18.0	20.9	23.1	22.3	21.15	20.1	17.2	13.8	11.0
7	12.3	14.2	18.1	22.1	24.6	26.5	26.9	26.6	24.2	20.5	15.8	13.0
8	14.9	16.8	20.7	24.6	26.6	28.3	28.7	28.8	26.7	22.9	18.5	15.6
9	17.3	17.7	19.0	20.9	22.4	23.8	23.3	23.2	22.3	22.3	19.9	18.1
10	23.7	23.7	23.9	24.8	26.2	27.0	26.9	26.9	26.3	26.4	25.5	24.3
11	16.2	17.3	19.7	21.9	23.4	22.9	21.3	21.2	21.0	19.9	18.2	16.4
12	13.5	14.8	17.1	18.5	19.0	18.5	17.5	17.6	17.2	16.2	14.8	13.7
13	20.0	21.5	24.0	25.5	25.9	24.5	23.5	23.7	22.8	22.5	21.4	20.1
14	18.4	19.9	23.2	26.3	27.9	28.0	27.4	27.8	26.6	24.4	21.2	18.9
15	19.9	20.5	23.1	25.5	26.5	25.9	24.8	25.1	24.8	23.5	21.7	20.3
16	22.9	23.4	25.3	26.5	27.4	26.3	25.4	25.4	25.0	24.6	23.5	23.0
17	20.6	21.7	24.1	26.0	26.8	25.6	25.0	25.0	24.7	24.3	22.2	20.8
18	22.8	23.5	25.9	27.5	28.5	28.1	27.6	27.7	27.3	26.0	24.2	22.9

Cuadro 1b. Precipitación mensual por región (mm/día), 1950 - 1980.

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0.5	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.6
2	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	1.0	2.4	2.7	1.0	0.3	0.5
3	1.0	0.6	0.4	0.1	0.1	1.1	4.8	4.3	1.9	0.9	0.5	0.9
4	0.9	0.4	0.3	0.1	0.1	1.4	6.3	7.0	4.0	1.7	0.5	1.0
5	0.8	0.5	0.3	0.2	0.3	1.6	4.6	4.6	2.9	1.0	0.5	0.8
6	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3	1.6	2.8	3.4	2.6	0.9	0.2	0.3
7	0.3	0.4	0.3	0.6	1.2	1.5	1.3	1.7	2.3	1.1	0.5	0.4
8	0.5	0.7	0.7	1.5	2.4	3.2	2.0	3.3	5.6	2.8	0.9	0.5
9	0.5	0.3	0.2	0.2	0.3	5.6	11.2	11.4	10.6	3.3	0.6	0.7
10	0.6	0.1	0.1	0.1	0.4	5.0	6.3	6.0	8.1	3.3	0.7	0.3
11	0.4	0.2	0.1	0.3	1.0	5.0	7.0	6.0	4.8	1.7	0.4	0.3
12	0.3	0.2	0.3	0.9	1.8	3.5	4.0	3.9	3.6	2.6	1.0	0.3
13	0.3	0.1	0.2	0.7	2.4	6.5	6.4	6.3	6.5	2.5	1.3	0.1
14	1.3	1.4	1.6	2.6	4.2	9.9	8.7	7.7	11.4	5.7	2.9	1.5
15	2.2	2.0	2.0	2.6	5.0	16.5	17.2	15.0	17.2	9.7	4.8	2.7
16	0.2	0.2	0.2	0.3	1.7	7.8	5.8	6.0	8.6	2.8	0.8	0.3
17	0.3	0.3	0.3	1.0	2.9	7.4	6.4	6.1	7.7	3.8	1.0	0.4
18	0.9	0.8	0.8	1.0	2.9	5.3	5.0	5.4	6.8	3.9	1.5	1.1

Se sabe que los cambios en la temperatura de superficie, bajo el efecto de un aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero, es dramático a latitudes altas. El uso de MCG para determinar las características del cambio climático global es adecuado, aún si los modelos utilizados son de baja resolución espacial. Con este criterio, los campos de temperatura y precipitación derivados de la interpolación de las salidas del modelo CCC y del GFDL-R30 se usaron para todos los sectores en las estimaciones de vulnerabilidad. La técnica de interpolación fue aplicada para obtener órdenes de magnitud de las anomalías climáticas para cada una de las 18 regiones, usando salidas de modelos para invierno y verano en el CCC (figs. 4 y 5) y en el GFDL-R30 (figs. 6 y 7). Los cambios de temperatura, precipitación y radiación solar mensuales, por región climática propuestos por estos MCG, se muestran en los cuadros 2 y 3.

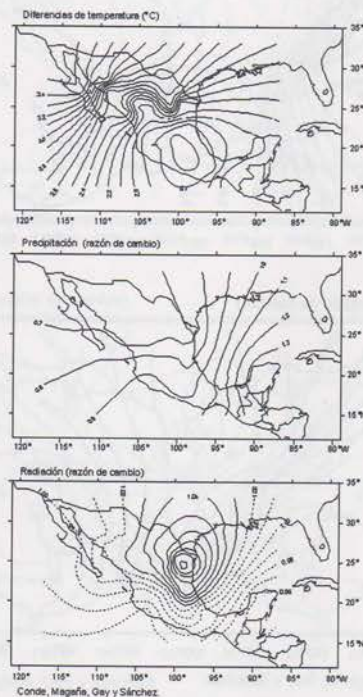
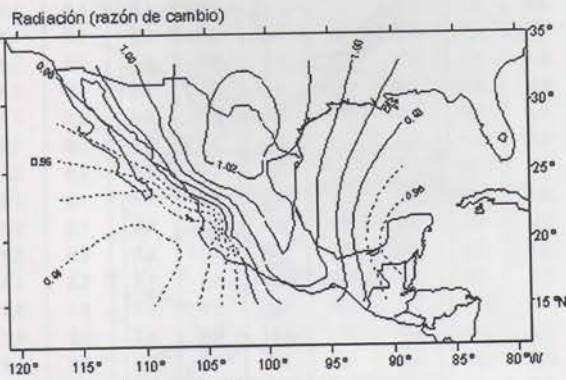
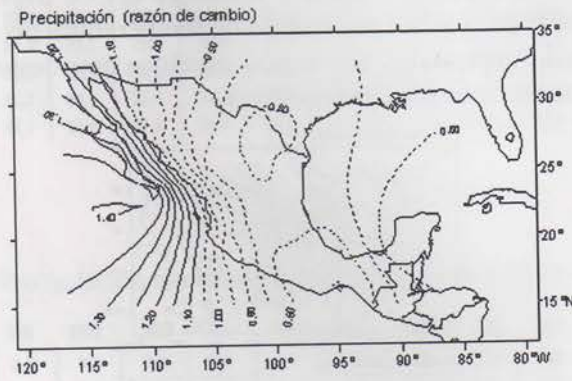
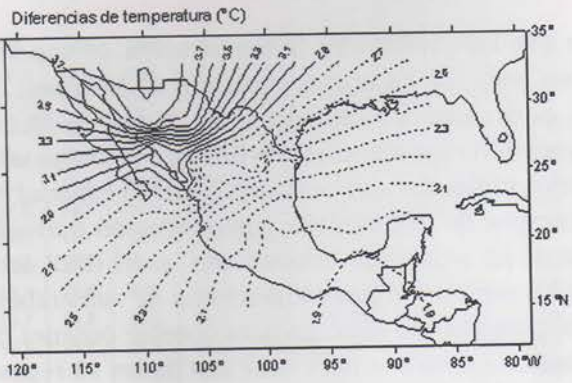


Figura 4. Anomalías en la temperatura (°C), en la precipitación (razón de cambio) y en la radiación (razón de cambio) en invierno, obtenidas a partir del modelo CCC.



Conde, Magaña, Gay y Sánchez.

Figura 5. Anomalías en la temperatura (°C), en la precipitación (razón de cambio) y en la radiación (razón de cambio) en verano, obtenidas a partir del modelo CCC.

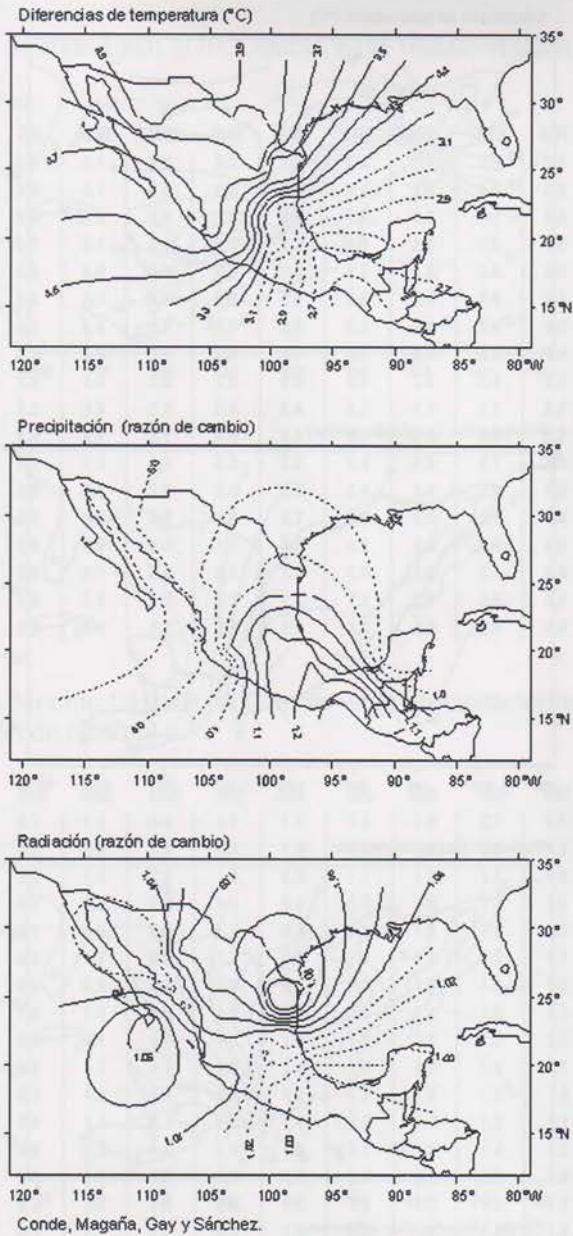


Figura 6. Anomalías en la temperatura (°C), en la precipitación (razón de cambio) y en la radiación (razón de cambio) en invierno, obtenidas a partir del modelo GFDL-R30.

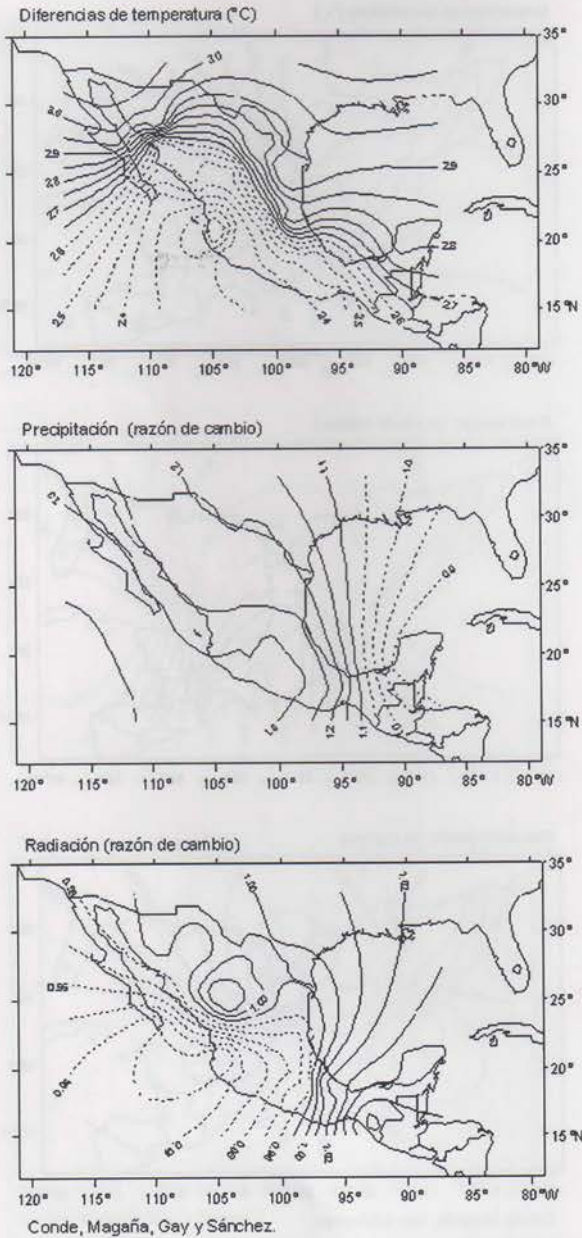


Figura 7. Anomalías en la temperatura (°C), en la precipitación (razón de cambio) y en la radiación (razón de cambio) en verano, obtenidas a partir del modelo GFDL-R30.

Cuadro 2a. Modelo GFDL-R30. Cambio en la temperatura mensual por región (°C)

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	4.1	3.8	4.4	3.0	3.3	3.5	2.8	2.7	3.3	3.6	2.7	3.2
2	3.9	3.5	4.1	2.6	2.6	2.9	2.2	2.0	2.5	2.8	2.7	3.6
3	4.3	3.9	5.5	4.0	4.0	3.5	3.3	2.2	2.8	3.8	3.4	3.5
4	4.1	3.7	5.0	3.6	3.3	3.1	2.4	2.0	2.5	3.2	3.2	3.5
5	4.1	4.0	5.6	4.8	4.2	3.4	3.0	1.9	2.6	3.8	3.6	3.5
6	3.8	3.8	4.7	4.0	3.2	2.8	2.6	2.0	2.6	3.1	3.5	3.6
7	3.4	4.1	4.4	4.7	3.5	2.9	3.2	2.4	3.0	3.2	3.7	4.1
8	2.9	3.7	3.6	3.7	3.0	2.7	3.2	2.9	3.2	3.0	3.6	4.0
9	3.9	3.6	4.0	2.9	2.5	2.5	2.0	2.2	2.4	2.7	2.7	3.7
10	3.7	3.3	3.5	2.7	2.4	2.6	2.2	2.3	2.5	2.7	2.5	3.7
11	3.6	3.3	3.7	3.1	2.5	2.6	2.2	2.4	2.6	2.7	2.7	3.8
12	2.9	3.1	3.3	3.1	2.3	2.7	2.4	2.5	2.7	2.6	2.7	3.5
13	2.7	2.9	3.2	3.0	2.1	2.6	2.4	2.4	2.6	2.5	2.5	3.3
14	2.6	3.2	3.2	3.2	2.5	2.7	2.8	3.0	3.1	2.9	3.2	3.5
15	2.3	2.9	2.9	2.4	2.1	2.5	2.6	2.4	2.6	2.6	2.5	2.9
16	2.2	2.8	2.7	2.0	2.1	2.4	2.6	2.3	2.5	2.6	2.5	2.7
17	2.1	2.9	2.6	1.5	2.3	2.5	2.8	2.4	2.5	2.7	2.8	2.6
18	2.4	3.3	2.6	1.2	2.9	2.4	3.3	2.8	3.0	2.9	2.9	2.7

Cuadro 2b. Modelo GFDL-R30. Cambio en la precipitación mensual por región (razón de cambio)

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0.7	0.7	1.1	0.8	1.1	1.1	1.3	1.6	2.7	0.5	0.8	1.0
2	0.9	0.5	0.8	1.0	2.0	1.0	1.5	1.4	1.5	0.9	1.0	1.0
3	0.8	0.8	1.0	0.9	1.3	0.8	1.1	1.8	1.1	0.9	0.9	1.2
4	0.9	0.7	0.9	1.0	1.5	0.8	1.3	1.6	1.3	1.0	1.1	1.2
5	0.8	0.7	0.9	0.9	1.3	0.6	1.2	1.8	1.0	1.3	1.0	1.3
6	1.0	0.8	1.0	0.9	1.3	0.9	1.3	1.5	1.2	1.1	1.3	1.1
7	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	0.8	1.3	1.6	1.1	1.3	1.2	1.1
8	1.1	1.0	1.1	0.9	1.1	1.0	1.3	1.4	1.2	1.1	1.2	1.0
9	1.1	0.8	1.1	1.1	1.4	1.2	1.4	1.3	1.3	1.0	1.3	0.9
10	1.2	0.8	1.1	1.1	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.1	1.3	0.8
11	1.3	0.9	1.3	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.0	1.2	1.0
12	1.5	0.9	1.3	1.1	1.1	1.4	1.2	1.3	1.3	1.1	1.2	1.1
13	1.6	0.8	1.2	1.0	1.0	1.5	1.1	1.3	1.4	1.2	1.1	1.1
14	1.4	0.9	1.3	1.0	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.0	1.2	1.1
15	1.6	0.8	1.2	1.0	0.9	1.5	1.0	1.3	1.5	1.3	1.1	1.2
16	1.6	0.9	1.2	1.0	0.9	1.5	0.9	1.2	1.7	1.6	1.2	1.3
17	1.5	1.0	1.3	1.1	0.9	1.3	0.8	1.1	1.7	1.5	1.4	1.4
18	0.9	0.8	1.3	1.3	1.1	1.0	0.6	1.0	1.4	1.1	1.2	1.1

Cuadro 2c. Modelo GFDL-R30. Cambio en la radiación mensual por región (razón de cambio)

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1
3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
5	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0
6	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
7	1.1	1.1	1.1	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0
8	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	0.8	1.0
9	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1
11	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
12	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
13	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
14	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0
15	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
16	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0	0.9	1.0	0.9
17	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9
18	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9

Cuadro 3a. Modelo CCC. Cambio en la temperatura mensual por región (°C)

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	3.51	3.66	3.72	3.53	3.33	3.17	3.35	3.25	3.00	3.02	3.15	3.30
2	2.5	2.5	2.7	2.7	2.6	2.6	2.7	2.7	2.6	2.4	2.4	2.4
3	2.2	2.8	3.1	3.2	3.3	2.5	3.3	2.9	2.6	3.4	2.9	2.4
4	2.2	3.0	3.4	3.3	3.7	2.5	3.4	3.1	2.6	3.3	3.0	2.5
5	2.1	3.7	4.3	4.2	4.7	2.9	4.2	3.7	3.0	4.0	3.5	2.7
6	1.4	2.6	2.8	3.0	3.5	2.3	2.6	2.8	2.6	3.2	2.9	2.2
7	2.2	3.6	3.2	3.4	3.2	2.4	2.6	3.0	3.0	3.7	2.8	2.3
8	1.9	2.2	2.1	2.4	2.3	2.1	2.0	2.1	2.2	2.7	2.4	2.0
9	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.0	2.2	2.4	2.3	2.3	2.2	1.9
10	1.8	1.9	2.0	2.1	2.1	2.0	2.1	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9
11	1.7	1.9	2.0	2.3	2.2	1.9	2.1	2.3	2.3	2.5	2.2	1.8
12	1.5	1.8	1.8	2.4	2.2	1.7	1.9	2.2	2.3	2.6	2.2	1.7
13	1.6	1.7	1.7	2.2	2.1	1.7	1.9	2.1	2.2	2.5	2.2	1.7
14	1.5	1.9	2.0	2.7	2.4	1.8	2.0	2.3	2.4	2.9	2.3	1.7
15	1.6	1.8	1.7	2.1	2.1	1.8	1.9	2.1	2.1	2.4	2.3	1.9
16	1.8	2.0	1.8	2.1	2.1	1.9	2.0	2.2	2.2	2.5	2.4	2.1
17	1.9	2.2	1.9	2.3	2.2	2.0	2.1	2.3	2.3	2.6	2.4	2.2
18	1.9	2.0	1.8	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	2.0	2.3	2.4	2.1

Cuadro 3b. Modelo CCC. Cambio en la precipitación mensual por región (razón de cambio)

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	0.6	1.0	1.0	1.4	1.0	1.6	1.2	1.1	1.8	0.6	0.6	0.4
2	0.9	0.8	0.7	0.8	1.1	1.7	1.4	1.1	1.6	1.0	1.1	0.6
3	0.7	1.0	0.9	1.3	1.3	1.0	0.7	0.9	0.9	1.1	0.8	0.6
4	0.5	0.9	0.7	0.9	1.5	1.2	0.9	1.0	1.2	1.4	0.9	0.5
5	0.5	1.0	0.7	1.1	1.6	1.1	0.7	0.9	1.0	1.4	0.9	0.4
6	0.5	0.8	0.7	0.7	1.5	0.9	0.7	0.9	1.0	1.9	1.0	0.7
7	0.5	0.9	0.8	1.0	0.9	0.8	0.6	0.9	0.9	1.6	1.2	0.7
8	1.0	1.1	0.9	1.4	0.9	0.8	0.9	1.0	0.9	1.4	1.2	1.0
9	0.6	0.9	0.7	0.8	1.4	1.0	0.8	1.1	0.9	1.3	0.8	1.2
10	0.7	1.0	0.7	1.0	1.3	1.0	0.8	1.0	0.9	1.2	0.8	1.0
11	0.7	1.0	0.7	1.1	1.3	0.9	0.7	1.0	0.8	1.3	0.8	1.0
12	0.8	0.9	0.8	1.3	1.2	0.8	0.6	1.0	0.7	1.2	0.9	0.9
13	0.9	0.9	0.9	1.4	1.1	0.7	0.6	0.9	0.7	1.2	1.0	0.9
14	0.7	0.8	0.8	1.3	1.2	0.8	0.7	1.0	0.7	1.2	0.9	0.8
15	0.9	0.9	1.0	1.3	1.0	0.7	0.7	0.9	0.7	1.3	1.1	1.0
16	3.5	3.0	3.5	5.5	10.7	14.1	9.7	9.9	11.7	8.2	6.3	2.9
17	3.3	2.7	3.2	5.4	11.0	12.7	8.8	9.1	10.7	7.1	4.8	2.6
18	1.4	1.4	1.0	1.5	0.8	0.8	1.0	1.1	0.9	1.4	1.3	1.4

Cuadro 3c. Modelo CCC. Cambio en la radiación mensual por región (razón de cambio)

REGIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0
3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
6	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
7	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
8	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0
10	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
11	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
12	1.1	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
13	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0
14	1.1	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1
15	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0
16	3.3	3.1	3.8	6.8	9.5	9.3	6.2	9.2	9.0	11.8	7.7	3.4
17	2.9	2.9	3.3	6.4	8.9	8.7	5.9	8.7	8.6	10.6	6.8	3.6
18	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0

Cuando se comparan las anomalías climáticas en la temperatura y en la precipitación proyectadas por cada modelo, se advierte que difieren tanto en magnitud como en escritura espacial cuando se analiza el caso de México. El modelo GFDL-R30 predice grandes cambios positivos, tanto en temperatura como en precipitación, especialmente para el verano. Esta tendencia en cambios del clima también se observa en radiación. Se obtuvieron incrementos menores en temperatura y radiación y, en general, decrementos en precipitación al usar el modelo CCC, pero en ambos modelos se aprecian cambios en la magnitud de las anomalías con la latitud, sobre todo en la temperatura.

Los análisis de vulnerabilidad dependen del escenario de cambio climático propuesto. Por lo tanto, un escenario de incrementos en precipitación diferirá sustancialmente de uno correspondiente a decrementos en precipitación, ya que se ha encontrado que la disponibilidad de agua es un elemento crucial en la mayoría de las áreas de vulnerabilidad, aún más importante que los cambios en la temperatura de superficie. Considerando que la precipitación en la mayor parte del país es superior en verano que en invierno, el modelo GFDL-R30 presenta un escenario más optimista en cuanto a la disponibilidad del agua, sobre todo al compararlo con el del CCC que pronostica un decremento en precipitación de verano e invierno. Análisis adicionales con otros MCG, como el modelo NCAR, indican que, bajo condiciones de cambio climático, la precipitación será mayor durante invierno pero menor durante verano con respecto a los valores medios climatológicos respectivos.

Surge entonces la pregunta de por qué diferentes MCG proporcionan resultados opuestos en la predicción de la precipitación. La respuesta tiene que ver con las diferencias en los esquemas de parametrización de procesos como la formación de nubes cumulus, diseño de los experimentos, métodos de solución, etcétera. Sin embargo, no se debe soslayar que en este estudio, el análisis del cambio climático se está haciendo sobre una base regional, por lo tanto, la metodología seguida para interpretar las salidas de los MCG es crucial.

4. Un análisis alternativo

Magaña (1994), ha sugerido un segundo enfoque en la interpretación

de las salidas de los MCG, en términos de clima regional. En este método se correlacionan patrones de circulación de gran escala con el clima regional, con base en registros históricos variables meteorológicas. Este método es similar al *Perfect-Prog* usado en la predicción numérica del clima (Wilks, 1995). Es posible correlacionar registros históricos de temperatura de la superficie del océano, altura geopotencial en 700 y 500 mb, presión atmosférica a nivel del mar, disponibles en el periodo 1948-1995 con variables de superficie regionales o locales tales como temperatura y precipitación. El análisis indica que las temperaturas de superficie del océano tropical juegan un papel dominante en la modulación del clima. Por esta razón, es importante que los experimentos de cambio climático con los MCG se lleven a cabo con un modelo acoplado atmósfera-océano y que se disponga de variables de gran escala en diversos niveles. Por medio de Internet (<ftp.dkrz.de>) se obtienen salidas de los MCG con las características mencionadas para diferentes modelos acoplados (NCAR, GFDL-R30, ECMWK, etcétera).

En este método, las anomalías de temperatura y precipitación regionales se determinan con el uso de ecuaciones de regresión entre variables de gran escala y variables regionales. Se pueden desarrollar dieciocho ecuaciones de regresión para cada variable regional, por modelo y para verano e invierno, que corresponden a las dieciocho regiones climáticas (Pérez, 1997). Cada ecuación de regresión incluye sólo dos variables de gran escala. Tales variables se escogen con base en correlaciones de un punto y en la posible relación física con el clima regional.

En las figuras 8 y 9 se muestran, como un ejemplo, las anomalías de temperatura para invierno y verano, obtenidas usando esta técnica con las salidas de los modelos acoplados GFDL-R30 y NCAR (National Center for Atmospheric Research). En ellas se observa que los incrementos son sensiblemente más moderados que los empleados en el análisis de la metodología anterior, en especial en el modelo NCAR. En general, las anomalías (positivas) de temperatura son mayores en el invierno que en el verano y rara vez son superiores a 2°C , es decir, son más pequeñas que las anomalías usadas en la prueba de sensibilidad. Se observa, asimismo que la influencia de la latitud es

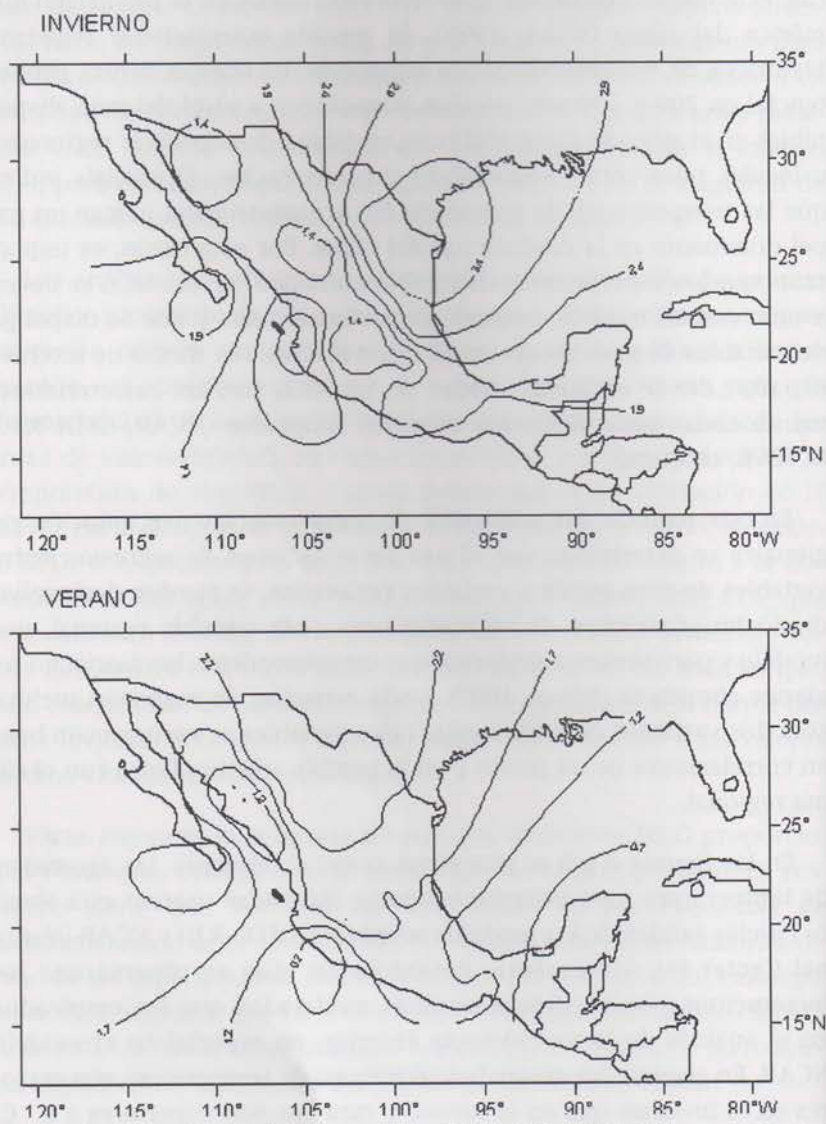


Figura 8. Anomalías en la temperatura 2XCO₂-CONTROL (°C), en invierno y verano, obtenidas a partir del modelo GFDL-R30, empleando el método alternativo, basado en la regionalización de Douglas.

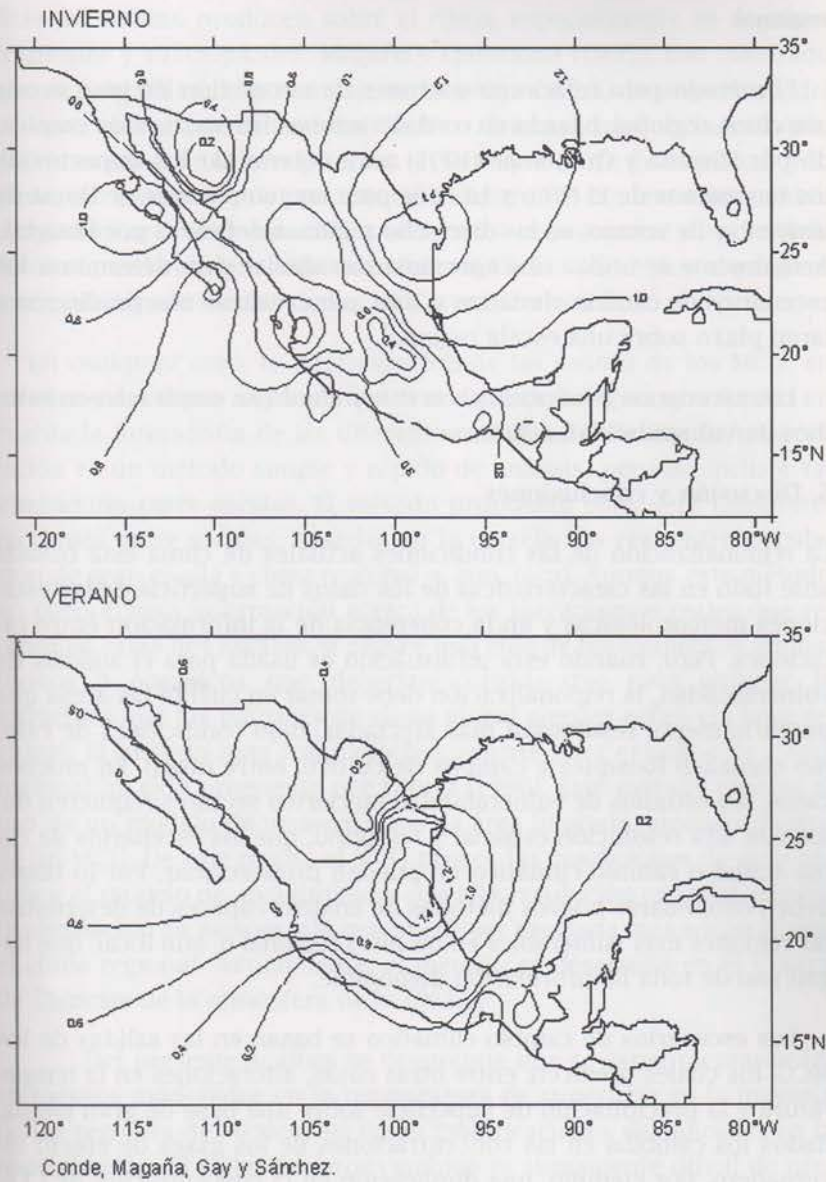


Figura 9. Anomalías en la temperatura 2XCO₂-CONTROL (°C), en invierno y verano, obtenidas a partir del modelo NCAR, empleando el método alternativo, basado en la regionalización de Douglas.

menor porque la misma metodología da mayor importancia al clima regional.

El método para relacionar patrones de circulación de gran escala con clima regional, basado en consideraciones físicas, ha sido empleado por Magaña y Quintanar (1995) para determinar los impactos de los fenómenos de El Niño y La Niña para las temporadas de lluvia de invierno y de verano, en las dieciocho regiones definidas por Douglas. Actualmente se utiliza una aproximación similar para determinar los escenarios de cambio climático y, aún, para realizar una predicción a largo plazo sobre una escala regional.

Los escenarios producidos con este método se emplearán en estudios de vulnerabilidad a futuro.

5. Discusión y conclusiones

La regionalización de las condiciones actuales de clima está basada ante todo en las características de los datos de superficie de las estaciones meteorológicas y en la coherencia de la información entre estaciones. Pero, cuando esta información es usada para el análisis de vulnerabilidad, la regionalización debe tomar en cuenta las áreas que potencialmente resultarían más afectadas, bajo condiciones de cambio climático (bosques y campos de cultivo, entre otras). En muchos casos, los estudios de vulnerabilidad en ciertos sectores requieren datos con alta resolución espacial y temporal, que los escenarios de clima actual o cambio climático no pueden proporcionar. Por lo tanto, deben combinarse nuevos métodos de análisis capaces de determinar las regiones más vulnerables en un nivel regional o, aún local, que hagan uso de toda la información disponible.

Los escenarios de cambio climático se basan en las salidas de los MCG, los cuales predicen, entre otras cosas, alteraciones en la temperatura y la precipitación de superficie sobre una base de gran escala, dados los cambios en las concentraciones de los gases de efecto invernadero, por ejemplo, una duplicación en la concentración de CO₂. La baja resolución de los MCG no permite una simulación apropiada de los efectos regionales y/o locales, cuya área depende, en gran medida, de factores como topografía y uso de suelo. Los MCG atmosféri-

cos no incluyen el efecto que los cambios en la temperatura de superficie del océano producen sobre el clima, especialmente en regiones tropicales y subtropicales. Magaña y Quintanar (1995), han mostrado que la variabilidad interanual en la temperatura de superficie del océano, en la parte central del Pacífico Oriental, modula la variabilidad interanual de la precipitación en la mayor parte de México. Por lo tanto, los escenarios de precipitación, dentro del contexto del cambio climático, carecen de uno de los elementos importantes, y los análisis futuros pueden diferir substancialmente de los obtenidos al emplear interpolación de salidas de los MCG atmosféricos.

En cualquier caso, la interpretación de las salidas de los MCG, en términos del clima regional, requiere de metodologías que tomen en cuenta la interacción de las diferentes escalas. La técnica de interpolación es un método simple y rápido de análisis, pero no incluye tal interacción entre escalas. El método propuesto considera tales interacciones entre escalas, basadas en la correlación real entre circulación de gran escala y clima regional o, aún, local. Aunque este método no proporciona información acerca de los mecanismos reales que relacionan estas dos escalas, sí provee una guía de los elementos atmosféricos u oceánicos que deberían considerarse para obtener la influencia que los patrones de clima global ejercen sobre el clima regional. El método más completo físicamente para estudios de clima regional ha sido propuesto por Giorgi (1990). Este método incluye el uso de un modelo de mesoescala o de área limitada, anidado dentro de un MCG. De este modo, el MCG provee las condiciones de gran escala y el modelo de área limitada, con alta resolución espacial, genera la circulación de mesoescala que puede ser asociada más adelante con el clima regional. Actualmente, el método se desarrolla en el Centro de Ciencias de la atmósfera de la UNAM.

Del presente análisis se desprende que se experimentarán incrementos moderados en la temperatura de superficie en la mayoría de las regiones de México, así como modificaciones sustanciales en la precipitación. El signo de estos cambios es sumamente difícil de predecir y en este momento sólo se puede decir que tendrán un gran impacto en la temporada de lluvias en México.

Referencias bibliográficas

- Adem, J., 1982, "Simulation of the annual cycle of climate with a thermodynamic numerical model", *Geof. Int.*, 21(3), pp. 229- 247.
- Conde, C., O. Sánchez, C. Gay, 1994, "Escenarios básicos y regionales. Estudio de país: México", en *México ante el cambio climático. Primer Taller de Estudio de país: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 39-44.
- Giorgi, F., 1990, "On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model", *J. Climate*, 3, pp. 941- 963.
- Houghton, J. T., B. A. Callander, S. K. Varney, (eds.), 1992, Climate Change 1992. The Supplementary report to the IPCC scientific assessment, WMO, UNEP, IPCC, Cambridge University Press, p. 16.
- Kinter, J., B. Dotty, 1994, GRADS (Gridded Analysis and Display System), University of Maryland. (Reporte Técnico). Disponible a través de ftp: grads.iges.org.
- Magaña, V. 1994, "An strategy to determine regional climate change", en *México ante el cambio climático. Primer Taller Estudio de país: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 45-51.
- Magaña, V. y A. Quintanar, 1995, "On the use of General Circulation models to study regional climate", en *2nd UNAM- CRAY Conference on Supercomputing*, Mexico.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, C. Gay, 1997, "Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico". En *Climate Research*, Vol. 9, Núms. 1 y 2, pp. 107- 114.
- Pérez, J. L., Cambio Climático Regional en México, 1997, Tesis de licenciatura en física, México, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Watson, R. T., M. C. Zinyowera, R. H. Moss (eds.), 1995, Climate change 1995. Impacts, Adaptations and mitigation of climate change: scientific - technical analyses. Contribution of Working Group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp. 427- 467.
- Wilks, D. S., 1995, Statistical methods in the atmospheric science, Academic Press, pp. 200- 202, 357.

Capítulo II Sequía meteorológica

SEQUÍA METEOROLÓGICA

María Engracia Hernández Cerda,* Laura Angélica Torres Tapia** y
Gonzalo Valdez Madero*

Resumen

Se determinaron las áreas de México vulnerables a la sequía meteorológica en el periodo de 1950-1980, mediante un índice de severidad, en condiciones actuales y según escenarios de cambio climático. Se utilizaron los modelos climáticos de circulación general GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) y CCC (*Canadian Climate Center*).

Se muestra la distribución espacial de las áreas afectadas, según seis grados de afectación de la sequía. Además de ofrecer los porcentajes de superficie del país, vulnerables a este fenómeno a nivel nacional y estatal.

1. Introducción

El efecto devastador que recurrentemente causan las sequías en diferentes partes del mundo es motivo de alarma y preocupación entre la población y sus gobernantes. Sin embargo, el estado de alerta persiste poco tiempo (Sivakumar, 1992), ya que después de una sequía no se toman acciones preventivas para disminuir los efectos de posteriores sequías.

Este fenómeno se presenta tanto en países en desarrollo, entre ellos México, como en países desarrollados (Hare, 1985), aunque en estos últimos, los efectos no son tan destructivos, gracias a la rapidez con la que se aplican medidas correctivas, derivadas de programas vigentes.

* Instituto de Geografía, UNAM.

** Facultad de Ciencias, UNAM.

El análisis de los efectos de la sequía se lleva a cabo a partir de diferentes enfoques: agrícola, hidrológica, meteorológica, biológica, ambiental, urbana o social. Cada enfoque o campo de estudio, proporciona una definición y caracterización distinta.

Este estudio analiza la sequía desde el punto de vista meteorológico, y la define como una función del déficit de precipitación, expresado en porcentaje, con respecto a la pluviosidad media anual o estacional de largo periodo y su duración en una determinada región.

México, por su localización geográfica, es sumamente vulnerable a la acción desastrosa de las sequías. Se tiene conocimiento que desde las primeras civilizaciones prehispánicas, se padecía en sus diferentes manifestaciones (Castorena, *et. al.*, 1980).

En los últimos años, la sequía ha adquirido una gran relevancia por los daños que ocasiona, que con frecuencia superan en magnitud a los que producen otros fenómenos hidrometeorológicos. La sequía se torna más amenazadora por el calentamiento atmosférico asociado al cambio global, entre cuyas secuelas está el aumento en la frecuencia de sequías en determinadas zonas del planeta, uno de los más serios problemas que enfrentará la humanidad, en especial los países ubicados en las zonas subtropicales, donde los altos niveles de radiación solar y evaporación se combinan con escasas precipitaciones y favorecen la recurrencia de periodos prolongados de sequía en áreas extensas (Salati y Nobre, 1991).

Es por ello que el objetivo general del estudio fue determinar las áreas del país que son vulnerables a la sequía meteorológica, con el propósito particular de evaluar y cartografiar el proceso de sequía de las áreas afectadas actualmente, y las potencialmente afectadas, según los escenarios de cambio climático.

2. Metodología

El presente trabajo se dividió en tres etapas: base de datos, escenario actual y escenarios futuros.

2.1 Base de datos

Se elaboró una serie de programas de cómputo que facilitarían cada uno de los pasos seguidos en el procesamiento de los datos utilizados. Éstos se hicieron en FoxPro 2.0.

Se utilizaron datos de precipitación media mensual de 284 estaciones meteorológicas, tomadas de la base de Douglas, adaptada por la línea de escenarios físicos (Magaña, *et. al.*, 1997). Se incluyeron cuatro estaciones más, localizadas en la frontera noroeste con Estados Unidos, para obtener información de esa área del país.

Como hubo registros faltantes en diferentes años y meses, se depuraron las bases de datos. Por ejemplo, se eliminaron aquellos años en los cuales faltaban más de cinco datos de precipitación.

El periodo de años de observación de las estaciones es variable, por lo que sólo se consideró el periodo de 1950 a 1980.

El cálculo del índice de severidad para cada año en el periodo estudiado, se realizó con los datos de precipitación, comparados con sus respectivas medias, como se muestra en el siguiente ejemplo:

Índice de Severidad (I.S.):

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Y	0.0	10.6	4.7	0.0	5.0	9.6	65.6	152.5	48.2	0.0	0.0	51.4
X	14.7	7.1	4.8	13.9	13.5	108.9	117.3	114.2	95.5	39.2	11.3	17.2

$$I.S. = (SUMY - SUMX) / SUMX \quad (Fórmula 1) \quad \quad \quad SUMY < SUMX$$

Donde: X = Precipitación mensual registrada
Y = Precipitación mensual normal (periodo 1950-1980)

$$SUMY = 133.1$$

$$SUMX = 419.1$$

$$I.S. = -0.68$$

Si $SUMY - SUMX$ es menor de 0.0, hay sequía meteorológica.

El valor de $SUMY$ se obtiene de la suma de los datos del renglón "Y" si son menores que su respectiva media mensual de la línea "X". En el ejemplo, los valores considerados son 0.0, 4.7, 0.0, 5.0, 9.6, 65.6, 48.2, 0.0 y 0.0.

Para $SUMX$, los datos que se suman son las medias mensuales del renglón "X" que fueron mayores para aquellos valores sumados de la línea "Y". En el ejemplo los valores sumados son 14.7, 4.8, 13.9, 13.5, 108.9, 117.3, 95.5, 39.2 y 11.3.

Se calculó el índice con la fórmula (1) y se tomaron los valores absolutos. Por último, se obtuvo el promedio de los índices de severidad del periodo estudiado.

El procedimiento descrito se llevó a cabo mediante el programa SEQUIA1.PRG, contenido en la base de datos.

2.2 Escenario actual

Con el índice de severidad (IS) obtenido para todas las estaciones, se generó el mapa de escenario base, por medio del trazo de isolíneas. Se trabajó con un mapa escala original 1:8,000,000.

El índice de severidad de la sequía meteorológica (valor absoluto) se clasificó en siete grados: extremadamente severo (mayor de 0.8), muy severo (0.6 a 0.8), severo (0.5 a 0.6), muy fuerte (0.4 a 0.5), fuerte (0.35 a 0.4), leve (0.2 a 0.35) y ausente (<0.2). (Sancho y Cervera, *et al.*, 1980).

2.3 Escenarios futuros

Se utilizaron los modelos climáticos de Circulación General GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) y CCC (*Canadian Climate Center*), para simular los cambios en el equilibrio climático resultante de la duplicación en la concentración de CO₂ (Ver capítulo 1).

Los datos de precipitación media mensual se ajustaron a los cambios planteados por los modelos GFDL-R30 y CCC para simular los efectos de una posible duplicación en la concentración de CO₂. Esto se hizo al multiplicar los registros de precipitación media mensual de enero a diciembre de los treinta años estudiados por los cambios en porcentaje propuestos en condiciones de 2XCO₂.

De esta forma se obtuvo un archivo con datos de precipitación simulados, que se importaron a la base de datos para calcular el índice de severidad de la sequía meteorológica con el programa SEQUIA2.PRG modificado, que calcula el I.S. considerando la media mensual normal del periodo 1950-1980.

Con los I.S. obtenidos para todas las estaciones modificados, se generaron los mapas de los escenarios futuros, según los modelos CCC y GFDL-R30, mediante el trazo de isolíneas.

Por último, para la digitalización, medición y sobreposición de los mapas resultantes se utilizó el sistema de información geográfica (SIG) ILWIS (*The Integrated Land and Water Information System Management*) (Palacio, 1993).

3. Resultados y discusión

Los resultados de la medición de las áreas con los diferentes grados de severidad en condiciones actuales y, de acuerdo con los modelos CCC y GFDL-R30, se concentran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Superficie del país afectada por sequía, de acuerdo con los escenarios actual, CCC y GFDL-R30.

ÍNDICE DE SEVERIDAD DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA	ESCENARIO ACTUAL		MODELO CCC		MODELO GFDL-R30	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
LEVE	123 411.8	6.3	8 287.081	0.4	84 857.15	4.4
FUERTE	474 841.7	24.4	212 044.8	10.9	123 631.3	6.4
MUY FUERTE	474 841.7	33.2	915 025.6	47.1	743 596.6	38.2
SEVERA	474 908.5	24.4	582 501.5	30.0	765 511.7	39.4
MUY SEVERA	156 730.4	8.1	151 022.1	7.8	143 572.1	7.4
EXTREMADAMENTE SEVERA	70 196.42	3.6	75 901.21	3.9	83 611.83	4.3

3.1 Escenario actual

En el mapa correspondiente al escenario actual (fig. 1), se muestra que la sequía está presente en la mayor parte del país.

Por lo que respecta al índice de severidad designado como leve, se localizan tres áreas, la primera, sobre la llanura tabasqueña comprende parte de los siguientes estados: sur de Veracruz, norte de Oaxaca, la mayor parte de Tabasco y sur de Campeche; la segunda, en el extremo oriente de la cuenca del Balsas; y la tercera, en el Bajío donde abarca parte del estado de Jalisco y noroeste de Michoacán. En total ocupan 6.3% de la superficie del país.

Por otro lado, cinco áreas del país presentan sequía severa: la de mayor extensión se ubica en el noreste de México y abarca el desierto chihuahuense y una prolongación, hacia el sur, que llega al estado de Guanajuato. Otra zona se localiza en el centro-norte del estado de Sonora, y una más en la costa oriente de Baja California Sur. Las otras

dos áreas, de menor extensión, se localizan: una sobre la costa oaxaqueña y otra en la costa noreste del estado de Yucatán. Todas ellas abarcan 24.4% de la superficie del país.

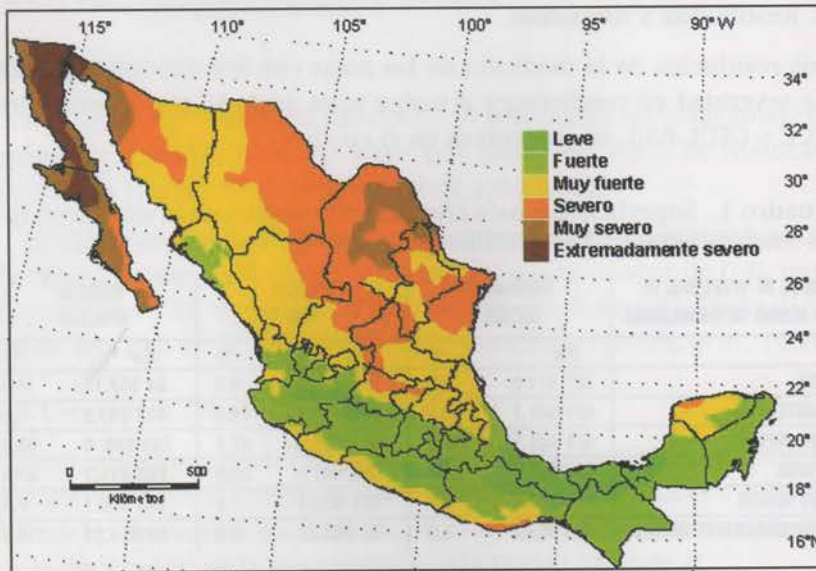


Figura 1. Índice de severidad de la sequía meteorológica. Escenario actual.

Las áreas que presentan un índice de severidad fuerte, que también comprenden 24.4% del territorio nacional, se ubican en la mitad sur del país, y en una pequeña porción del norte del estado de Sinaloa.

Las áreas que muestran un índice de severidad muy fuerte representan el 33.2% del territorio, y se localizan principalmente en la parte central del país, y se prolongan hacia el norte, a todo lo largo de la Sierra Madre Occidental. También se manifiesta en las costas de los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, así como de los estados de Campeche y Yucatán.

La sequía extremadamente severa se presenta únicamente en la península de Baja California y noroeste del estado de Sonora, abarcando 3.6% de la superficie del país.

De la comparación de los escenarios futuros con el actual se plantea lo siguiente:

3.2 Modelo CCC

De acuerdo con este modelo se presentarían tres cambios en la distribución espacial de la sequía meteorológica (fig. 2) con respecto al escenario actual:

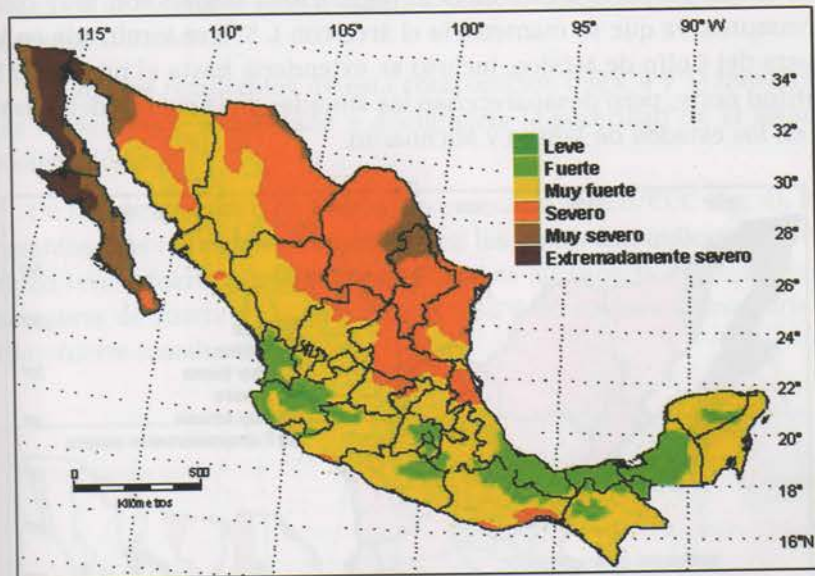


Figura 2. Índice de severidad de la sequía meteorológica. Modelo CCC.

Primero: desaparecerían dos de las tres áreas identificadas con un I. S. leve en el escenario actual; la tercera, localizada en el estado de Jalisco, se reduciría en extensión a 0.4% de la superficie nacional.

Segundo: el área identificada con un I. S. muy fuerte en el escenario actual aumentaría 13.9% de acuerdo con el modelo CCC, ya que la mayor superficie con I. S. fuerte incrementaría su intensidad, abarcando casi en su totalidad al oeste, centro y sur del país.

Tercero: la superficie de la zona identificada con un I. S. severo en el escenario actual, aumentaría en 5.6% de acuerdo con el modelo CCC.

El área identificada en el escenario actual con I. S. extremadamente severo casi no presentaría modificaciones, ya que de acuerdo con el modelo CCC comprendería 3.9% de la superficie nacional, lo que representa un aumento de 0.3% de la superficie con respecto al escenario actual (cuadro 1).

3.3 Modelo GFDL-R30

Por lo que respecta a este modelo (fig. 3), los cambios son muy contrastantes, ya que se mantendría el área con I. S. leve localizada en la costa del Golfo de México, incluso se extendería hasta el paralelo 21° latitud norte, pero desaparecerían las situadas en la cuenca del Balsas y en los estados de Jalisco y Michoacán.

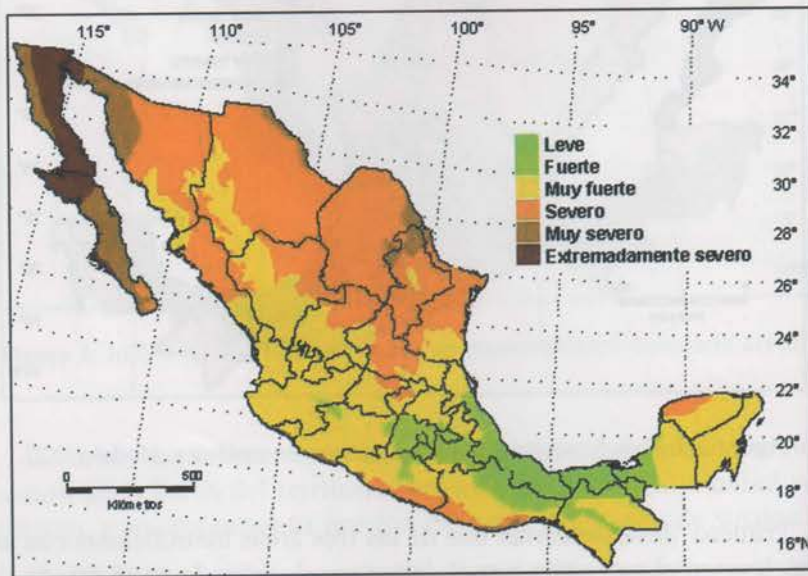


Figura 3. Índice de severidad de la sequía meteorológica. Modelo GFDL-R30.

La zona con I. S. severo se extendería a casi todo el norte del país, y se prolongaría hacia la costa del Pacífico hasta el paralelo 24° latitud norte, así como en las costas de los estados de Guerrero, Oaxaca y noroeste de Yucatán, abarcando 39.4% de la superficie nacional (cuadro 1).

También aumentarían en 5.0% las áreas con I. S. muy fuerte, debido a la disminución de las áreas afectadas con I. S. fuerte. La zona con I. S. extremadamente severo se incrementaría ligeramente en 4.3%.

En los cuadros 2 y 3 se presentan los resultados de la sobreposición de los mapas correspondientes a los modelos CCC y GFDL-R30 con el escenario actual. En ellos se indican en forma numérica los cambios, tanto positivos como negativos, que sufrirían las áreas definidas en el escenario actual ante un cambio climático según los dos modelos utilizados.

Los mapas resultantes de esta comparación (Figs. 4 y 5) muestran las áreas donde aumentaría y disminuiría la severidad de la sequía meteorológica.

De la sobreposición de los mapas escenario actual/CCC (fig. 4), los cambios más importantes ocurrirían en las zonas con índices de severidad leve y fuerte; en la primera, 85.4% de su superficie pasaría a la categoría de fuerte y de esta última, 78.7% de su área aumentaría a muy fuerte (cuadro 2).

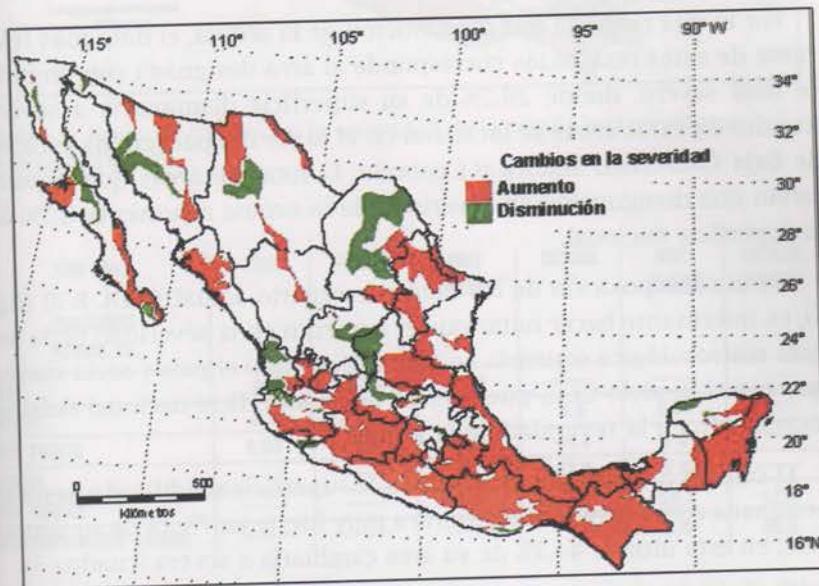


Figura 4. Áreas de cambio en la severidad de la sequía meteorológica. Modelo CCC.

Cuadro 2. Cambio en la superficie del área (expresada en %) de diferentes grados de severidad de la sequía, resultantes de la sobreposición del mapa actual y el mapa del modelo CCC.

CCC (%)	LEVE	FUERTE	MUY FUERTE	SEVERA	MUY SEVERA	EXTREM. SEVERA
ESCENARIO ACTUAL %						
LEVE	4.57	85.4	10.1	—	—	—
FUERTE	0.4	20.4	78.7	0.4	—	0.1
MUY FUERTE	0.14	1.4	72.7	24.8	0.8	0.1
SEVERA	—	0.04	12.87	78.9	8.1	—
MUY SEVERA	—	—	—	29.2	60.9	9.8
EXTREMADAMENTE SEVERA	—	—	—	0.6	15.1	84.3

En general, se puede decir que las áreas que resultarían más afectadas por el aumento en la severidad de la sequía meteorológica se localizan principalmente en el centro y sur del país, así como en la mitad oriental de la península de Yucatán. Todas ellas abarcarían un total de 36.4%.

Por lo que respecta a la disminución de la sequía, el dato más relevante de estos resultados corresponde al área designada con un índice muy severo, donde 29.2% de su superficie disminuiría a severo (cuadro 2); estas áreas se localizan en el norte del país en los estados de Baja California, Sonora y Coahuila. El total de áreas que presentarían una disminución en severidad de la sequía representa 6.7% de la superficie nacional.

De la sobreposición de los mapas escenario actual/GFDL-R30 (fig. 5), es interesante hacer notar que el aumento en la severidad de la sequía meteorológica ocurriría en general, en todo el país y sería mayor que con el modelo CCC, pues, 39.4% de la superficie nacional sufriría incremento en la severidad de la sequía.

El cambio más grande, en cuanto a la superficie modificada, sería la designada como fuerte, que pasaría a muy fuerte en 73.3% de su superficie; en esta última, 44.3% de su área cambiaría a severa (cuadro 3).

Otra variación en la severidad de la sequía meteorológica se presentaría en las áreas designadas con un índice leve que se incremen-

taría a muy fuerte en 22.8% de su extensión; este cambio es significativo, porque pasaría de leve a muy fuerte. Las modificaciones se localizan en la zona de El Bajío, en el estado de Jalisco y Michoacán, y en el extremo oriente de la cuenca del Balsas en los límites de Guerrero y Puebla.

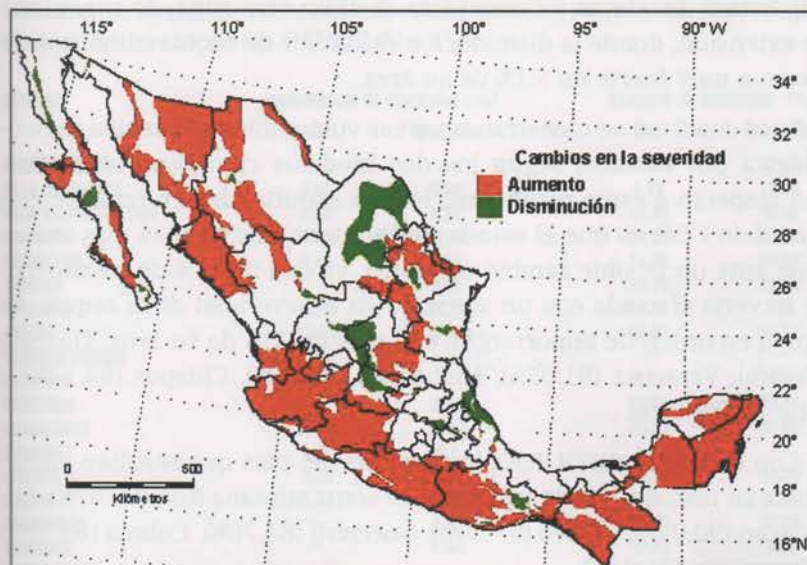


Figura 5. Áreas de cambio en la severidad de la sequía meteorológica. Modelo GFDL-R30.

CCC (%)	LEVE	FUERTE	MUY FUERTE	SEVERA	MUY SEVERA	EXTREM. SEVERA
ESCENARIO ACTUAL %						
LEVE	60	17.1	22.8	—	—	—
FUERTE	2.1	20	73.3	4.6	0.01	—
MUY FUERTE	0.06	1.3	53.1	44.3	1.2	—
SEVERA	—	—	5.1	87.3	7.6	—
MUY SEVERA	—	—	0.3	28.6	58.7	12.4
EXTREMADAMENTE SEVERA	—	—	—	—	9.4	90.6

Cuadro 3. Cambio en la superficie del área (expresada en %) de diferentes grados de severidad de la sequía, resultantes de la sobreposición del mapa actual y el mapa del modelo GFDL-R30.

En cuanto a la disminución de la sequía, el área total del país donde ocurriría este cambio es de 4.5%. La modificación más grande se presentaría en el área designada como muy severa, que disminuiría a severa en 28.6% de su superficie (cuadro 3), y se localizaría principalmente en el centro y norte de Coahuila. En los límites estatales de San Luis Potosí, Zacatecas y Guanajuato se ubica otra zona, de considerable extensión, donde la disminución del índice de sequía cambiaría de severo a muy fuerte en 5.1% de su área.

En el cuadro 4 se muestran las áreas vulnerables a la sequía meteorológica por estados, según los dos modelos climáticos utilizados. Con respecto a estos resultados, lo más significativo en relación con el modelo CCC, es que el estado de Quintana Roo sería el más vulnerable ante un posible cambio climático, ya que 98.47% de su superficie se vería afectada con un aumento en la severidad de la sequía. Le siguen en orden de importancia, con más de 75% de su área: Tlaxcala (96.69%), Veracruz (91.05%), Michoacán (89.66%), Chiapas (83.13%) y Tabasco (80.56%).

Con el modelo GFDL-R30, los estados del país que resultan vulnerables en más de 75% de su territorio son: Quintana Roo (99.67%), Michoacán (90.04%), Jalisco (87.30%), Guerrero (84.70%), Colima (83.57%) y Campeche (75.22%).

Con base en los resultados obtenidos a partir de estos modelos, el posible cambio climático puede favorecer algunas regiones del país, y en otras aumentar el grado de severidad de la sequía meteorológica. Por ello, se hace necesario relacionar estos resultados con los que se obtuvieron en el Estudio de País en las áreas de agricultura, hidrología, desertificación y bosques, entre otros. Con esta última línea, sería interesante establecer si hay alguna relación con las áreas deforestadas del país, en las condiciones actuales y ante un posible cambio climático, con un incremento en la severidad de la sequía (Salati y Nobre, 1991; Meher-Homji, 1991).

Se hizo un ejercicio muy general que consistió en relacionar la información obtenida en este trabajo, en las condiciones actuales, con los datos de la línea vulnerabilidad a la desertificación por estados, y se obtuvo que Baja California, estado con mayor superficie (98.85%) afectada con alto grado de vulnerabilidad a la desertificación, presen-

taría un pequeño aumento en la severidad de la sequía, en promedio 7.7% de su superficie, con los dos modelos. El grado que muestra en las condiciones actuales es el más alto (extremadamente severo), de acuerdo con la escala empleada en este trabajo.

Cuadro 4. Área porcentual afectada por la sequía meteorológica, aplicando los modelos GFDL-R30 y CCC.

ESTADOS	DISMINUCIÓN DE SEVERIDAD (%)		AUMENTO DE SEVERIDAD (%)	
	CCC	GFDL R30	CCC	GFDL R30
AGUASCALIENTES	—	—	32.86	32.86
BAJA CALIFORNIA	8.61	5.69	5.16	10.24
BAJA CALIFORNIA SUR	9.66	4.96	34.32	26.96
CAMPECHE	1.79	14.33	39.85	60.90
CHIHUAHUA	5.85	0.11	11.85	29.62
CHIAPAS	—	2.18	83.13	71.18
COAHUILA	26.69	28.76	10.31	7.76
COLIMA	13.53	0.97	42.03	83.57
DISTRITO FEDERAL	—	—	—	—
DURANGO	0.74	—	6.88	20.49
GUERRERO	—	3.93	58.94	80.76
GUANAJUATO	17.28	14.52	33.22	32.05
HIDALGO	—	5.2	2.91	—
JALISCO	4.20	3.01	63.99	82.25
MÉXICO	1.42	9.35	53.49	8.99
MICHOACÁN	—	2.45	89.66	87.59
MORELOS	—	1.54	53.33	0.51
NAYARIT	20.45	—	30.59	69.92
NUEVO LEÓN	0.04	5.02	51.68	47.51
OAXACA	1.20	11.44	69.08	58.28
PUEBLA	—	—	69.26	21.85
QUERÉTARO	8.47	3.81	8.05	6.36
QUINTANA ROO	—	—	98.47	99.67
SINALOA	1.24	—	35.83	67.02
SAN LUIS POTOSÍ	15.99	13.45	49.78	33.24
SONORA	8.87	0.33	16.03	43.69
TABASCO	—	4.99	80.56	—
TAMAULIPAS	—	0.20	28.79	21.35
TLAXCALA	—	1.32	96.69	—
VERACRUZ	—	10.87	91.05	2.09
YUCATÁN	9.51	—	16.45	47.96
ZACATECAS	17.9	7.90	7.83	9.99

Otros casos interesantes son los estados de Jalisco y Michoacán, los cuales tienen una vulnerabilidad alta a la desertificación en las condiciones actuales, en más de 70% de su superficie, y presentarían un aumento a la sequía meteorológica ante un posible cambio climático.

Por último, el estado de Quintana Roo, con casi 100% de su superficie vulnerable a la sequía, según los dos modelos de cambio utilizados, muestra en 99.18% de su territorio un grado moderado de vulnerabilidad a la desertificación en condiciones actuales.

Existe una estrecha relación entre la desertificación y la sequía, que se complica al incluir aspectos poblacionales, si se considera a la desertificación como el resultado de la combinación de la sequía meteorológica y el inadecuado manejo del suelo.

4. Conclusiones

En las condiciones actuales que se presentan en el país no existen áreas que no sean afectadas por la sequía meteorológica.

Según el modelo GFDL-R30, es mayor la superficie del país en la cual aumentaría el grado de severidad de la sequía, sin embargo con el modelo CCC, el cambio sería más drástico.

Referencias bibliográficas

- Castorena, G., M. E. Sánchez, M. E. Florescano, R. G. Padilla, y U. L. Rodríguez, 1980, Análisis histórico de las sequías en México, México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980, 137 pp.
- Hare, K. F., 1985, Sequía, variación climática y desertificación, Ginebra, Suiza, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, No.653, 35 pp.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, C. Gay, 1997, "Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico", en *Climate Research*, Vol. 9, Nos. 1 y 2, pp.107-114.
- Meher-Homji, V. M., 1991, "Probable impact of deforestation on hydrological processes", en *Climatic Change*, Vol. 19, pp. 163-173.
- Palacio, J. L. y L. Luna, 1993, Sistemas de Información Geográfica. Introducción al manejo del Integrated Land and Water Management Information System (ILWIS). Versión 1.3, México, Instituto de Geografía, UNAM, 65 págs.
- Salati, E. y A. C. Nobre, 1991, "Possible climatic impacts of tropical deforestation", en *Climatic Change*, Vol. 19, pp. 177-196.
- Sancho y Cervera, J., Zavala, Z. F., V. M. Sánchez, y V. V. Martínez,

1980, Monitoreo de sequías y heladas, México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Dirección de inventarios de agua y suelo, Proyecto IA 800/, pp. 14-16.

Sivakumar, K. V. M., 1992, "Climate change and implications for agriculture in Niger", en *Climatic Change*, Vol. 20, pp. 297-312.

LOS RECURSOS HIDROLÓGICOS DEL CENTRO DE MÉXICO ANTE UN CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Laura Guzmán Méndez E. y Antonio López J.

RESUMEN

En este capítulo se analiza las variaciones en la disponibilidad de agua que experimentar, en tres de las cuencas hidrográficas más importantes de México, ante un cambio climático. Tanto por la información sobre por el Instituto de Hidráulica que en ellas se maneja: la cuenca del río Lerma-Chapala-Santiago, la del río Pánuco y la del río Balsas, se calcula el porcentaje de variación en el agua.

Para el análisis se usaron el balance hidrológico actual y se proyectaron a los tres cuencas de variación de precipitación de la aplicación de tres modelos de circulación general que el conjunto de modelos de circulación general con la gran diferencia entre ellos años 2020 y 2050.

El balance hidrológico de las cuencas de estudio se calculó con datos de la aplicación del índice de aridez de la clasificación climática de W. Köppen.

Las variaciones anuales que, bajo un cambio climático, en la gran parte del centro de México, indican una disminución del agua proyectada en las tres cuencas hidrográficas consideradas, se discute la vulnerabilidad de las cuencas del sistema Lerma-Chapala-Santiago que se tiene actualmente bajo las condiciones actuales, con el respecto a los cambios climáticos los aguas no disponibles.

Palabras clave: hidrología, cambio climático, recursos hídricos.

Capítulo III Recursos hidrológicos

LOS RECURSOS HIDROLÓGICOS DEL CENTRO DE MÉXICO ANTE UN CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Laura Elena Maderey R.* y Arturo Jiménez R.*

Resumen

En este capítulo se analizan las variaciones en la disponibilidad de agua que ocurrirían, en tres de las cuencas hidrológicas más importantes de México, ante un cambio climático, tanto por su extensión como por el número de habitantes que en ellas se asientan: la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, la del río Pánuco y la del río Balsas, ubicadas en la parte central del país.

Para el análisis se estimó el balance hidrológico actual y el correspondiente a tres escenarios de cambio climático, resultantes de la aplicación de tres modelos en los cuales se supone que el contenido de bióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera se duplicará entre los años 2025 y 2050.

El balance hidrológico de las cuencas de estudio se calculó mediante la aplicación del índice de aridez de la clasificación climática de W. Köppen.

Los resultados indican que, ante un cambio climático en la región del centro de México, habría una disminución del agua aprovechable en las tres cuencas hidrológicas consideradas; sobresale la vulnerabilidad de la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, que si bien actualmente tiene importantes problemas con el recurso agua, el cambio climático los agravaría sensiblemente.

Palabras clave: Hidroclimatología, cuencas hidrográficas, balances hidrológicos.

* Instituto de Geografía, UNAM.

1. Introducción

Como resultado de la participación en el proyecto Estudio de País: México, apoyado por el *U. S. Country Studies Program*, en el área de vulnerabilidad de los recursos hidrológicos, la línea de Hidrogeografía del Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM, realizó esta investigación en tres cuencas hidrográficas del centro del país.

Se eligió la zona centro de México por ser la más afectada, en cuanto a problemas de abastecimiento de agua, por la gran población que concentra y por su intensa actividad socioeconómica, situaciones que la convierten en una área de especial interés.

El estudio se hizo sobre las cuencas del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, de los ríos Pánuco y Balsas (fig. 1), para las cuales se estimó el balance hidrológico actual y el balance hidrológico correspondiente a tres escenarios de cambio climático, resultantes de la aplicación de tres modelos que parten del supuesto de que el contenido de bióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera se duplicará entre los años 2025 y 2050¹. Dos de estos modelos se basan en la circulación general de la atmósfera, el GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) y el CCC (*Canadian Climate Center*), y el tercero en el balance de la energía térmica, MTC (Modelo Termodinámico del Clima) (Adem, 1982). Todos estos modelos son utilizados en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, de la UNAM. El MTC fue ideado por el Dr. Julián Adem, Investigador del mencionado Centro (Garduño R., 1992).

La información climatológica e hidrométrica empleada proviene de 223 estaciones meteorológicas y 172 estaciones hidrométricas localizadas en las cuencas de estudio. El método para el cálculo de los balances hidrológicos se basa en el clima, considerándolo como un factor esencial, a partir del cual se puede estimar el volumen medio de agua factible de aprovechar sin afectar el ambiente de la cuenca.

El objetivo principal del trabajo fue cuantificar la disponibilidad de agua para el año 2050, de acuerdo con cada uno de los modelos climáticos aplicados, en las tres cuencas seleccionadas para este estudio.

Otro de los objetivos, derivado del principal y también basado en una metodología climática, fue determinar la cantidad de agua que ca-

¹ En la actualidad esta fecha ha sido cambiada hacia fines del siglo XXI (Nota del editor).

da una de estas unidades hidrogeográficas requiere para satisfacer la necesidad que demanda la vegetación para su subsistencia, es decir, para que el medio ambiente de la cuenca en cuestión no resulte afectado.



Figura 1. Cuencas hidrológicas del centro de México.

2. Las cuencas de estudio (Maderey, 1994)

2.1 Cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago

Este sistema hidrográfico comprende una superficie de 135 835.89 km²; abarca parte de los estados de México, Querétaro, Michoacán, Guanajuato, Jalisco, Zacatecas, Durango y Nayarit y la totalidad de

Aguascalientes. Como su nombre lo indica, comprende tres subcuencas: la del río Lerma, la del lago Chapala y la del río Santiago.

La subcuenca del río Lerma nace en el Estado de México, en el Sistema Volcánico Transversal; limita con la cuenca del valle de México donde se asienta la Ciudad de México. En ella, se localizan varias ciudades importantes de más de 50 000 habitantes, con un desarrollo industrial considerable, como Toluca, Morelia, Querétaro, Celaya, Salamanca, Irapuato, León y Zamora, y una de las zonas agrícolas más importantes del país, El Bajío.

El nacimiento del río Lerma tiene gran interés para la Ciudad de México, ya que los manantiales que lo originaban fueron captados para complementar el abastecimiento de agua a esta ciudad. En el curso del río se han construido obras para la generación de energía eléctrica que favorecen a las poblaciones situadas dentro de la cuenca. Se dan también otros usos importantes como el industrial y el doméstico, cuyos efluentes son altamente contaminantes. Sus afluentes más importantes son los ríos de La Laja, Silao, Turbio, Angulo y Duero. El río Lerma desemboca en el lago de Chapala.

El lago Chapala, el más grande del país, es una fosa tectónica originada por un hundimiento cuya profundidad media es de 10 m. Gran parte de las tierras de sus alrededores son utilizadas para labores agrícolas; en su porción oriental se han efectuado obras de desecación para dedicar las tierras al cultivo. El desagüe del lago se efectúa naturalmente a través del río Santiago, y aunque recibe importantes aportaciones de los ríos Lerma y Zula, está en proceso de desecación.

Por último, el río Santiago se origina por derrames del lago Chapala, controlados por la presa Poncitlán. Su cuenca ocupa parte del territorio de los estados de Nayarit, Jalisco, Zacatecas y Aguascalientes. Entre sus afluentes más notables están los ríos Verde, Juchipila, Bolaños y Huaynamota. El río Santiago es navegable por pequeñas embarcaciones dentro del estado de Nayarit. En su cuenca se localizan varias obras de aprovechamiento de agua, principalmente con fines de riego e hidroeléctrico, la última es la presa de Aguamilpa en el curso bajo del río.

2.2 Cuenca del río Balsas

La cuenca del río Balsas tiene una extensión de 117 637.78 km² y comprende importantes áreas de los estados de Oaxaca, Puebla, México, Morelos, Michoacán y Guerrero. Nace en el estado de Puebla con el nombre de río Atoyac, posteriormente recibe el de río Mezcalapa, después el de Balsas y, finalmente, el de Zacatula. Destacan como afluentes los ríos Mixteco y Tepalcatepec. Esta cuenca abarca grandes superficies de terrenos accidentados, con pronunciadas pendientes, lo cual facilita los aprovechamientos hidroeléctricos como la presa de El Infiernillo, cuyo vaso es uno de los más grandes de México y de América Latina.

2.3 Cuenca del río Pánuco

La cuenca de este río tiene una superficie de 96 302.28 km² y comprende varias entidades: Distrito Federal, Hidalgo, México, Querétaro, San Luis Potosí, Veracruz y Tamaulipas. Se considera que el río Pánuco nace en la cuenca del valle de México, en el Gran Canal del Desagüe de la Ciudad de México, cuya salida de la cuenca se realiza a través de la obra artificial el túnel de Tequixquiac y descarga en el río Salado. El río Cuautitlán, que también nace en la cuenca del valle de México, es otro de los formadores del río Pánuco; sale de ella a través de otra obra artificial, el tajo de Nochistongo, y se une al río Salado para dar origen al río Tula, que, posteriormente, recibe el nombre de río Moctezuma y finalmente el de río Pánuco. Su curso inferior, hasta su confluencia con el río Tamuín, es navegable. A través de él llegan embarcaciones de gran calado al puerto de Tampico, 12 km arriba de la desembocadura. En la cuenca del río Pánuco se han construido varias obras de aprovechamiento, todas con fines de riego y control de avenidas. Sus aguas están altamente contaminadas como en el río Lerma.

Como se mencionó, la cuenca de México es la subcuenca alta de la del río Pánuco, al que le da origen de forma artificial. Su importancia radica en la enorme transformación hidrográfica e hidrológica que ha experimentado en un lapso de más de 650 años, debido a la evolución de lo que fue la gran Tenochtitlán primero y la Ciudad de México después. Esto la ha convertido en una cuenca muy especial, si se considera que actualmente se asientan en ella más de quince millones de

habitantes, hecho que la convierte en la cuenca hidrológica más poblada del país, a pesar de su relativamente poca extensión de 9 600 km².

La transformación hidrográfica consiste en que el extremo noreste de la cuenca constituye una zona incorporada artificialmente a los límites originales de la misma. La transformación hidrológica reside en las alteraciones que han registrado en ella las fases del ciclo hidrológico, especialmente el agua de escurrimiento y la subterránea, como consecuencia tanto de la forma en que se le ha desaguado desde la llegada de los españoles hasta la actual Ciudad de México, con el fin de contrarrestar las grandes inundaciones que la afectaban, como de la sobreextracción de agua para su abastecimiento; de manera que, si bien en un principio sus habitantes se quejaban por la abundancia de agua, en la actualidad el problema es la falta del vital líquido, por lo cual resulta necesario importarlo de las cuencas vecinas, provocando su desequilibrio natural. Por otro lado, aun cuando el agua que recibe sale totalmente de la cuenca, la Ciudad de México está propensa a inundaciones debidas al hundimiento que tiene por la sobreexplotación de los mantos acuíferos, situación que se ha solucionado con la profundización de su drenaje.

3. Metodología para la estimación del agua disponible (Maderrey, 1995). Aplicación y resultados

En la metodología empleada, el clima se considera un factor esencial a partir del cual se puede calcular el volumen medio de agua aprovechable sin afectar el ambiente, particularmente en lo que se refiere al agua de reserva de la cuenca. La metodología es aplicable esencialmente para conocer dicho volumen en cuencas de clima húmedo, ya que en las de clima seco el volumen de agua aprovechable depende de sus características estructurales, tales como las formaciones geológicas. Por otra parte, la metodología se aplica bajo el supuesto de que el agua superficial y el agua subterránea, generadas en la cuenca, provienen directamente de la precipitación.

El método utiliza el índice de aridez del sistema de clasificación de Köppen como un índice hidrológico. Esta aplicación, ideada por Maderrey (1991) en el Instituto de Geografía, UNAM, tiene como base las siguientes consideraciones:

La cantidad de agua disponible en una cuenca con clima húmedo puede calcularse a partir del valor límite del índice de aridez, el cual representa también un valor ecológico. El índice del sistema de clasificación climática de Köppen, es de fácil aplicación y se puede considerar uno de los de mayor validez hidroclimática, porque el valor límite entre los climas secos y húmedos determina claramente la lámina de precipitación, e indica si existe déficit o exceso de agua, situación que se manifiesta, en general, por las características ecológicas y, en particular, por el tipo de vegetación existente en la cuenca (cuadro 1).

Cuadro 1. Límites de altura de la lluvia entre climas secos y húmedos

s	f ó x'	w
$r = 2t$	$r = 2(t+7)$	$r = 2(t+14)$

- s Lluvias de invierno
- w Lluvias de verano
- f Lluvias abundantes y uniformes todo el año
- x' Lluvias escasas y uniformes todo el año
- t Temperatura media anual en °C
- r Valor límite de precipitación media anual en cm.
- P Precipitación media anual en mm.
- Sí $P < r$, el clima es seco
- Sí $P > r$, el clima es húmedo

El valor del índice descrito, a la vez que señala la cantidad de precipitación que deberá superarse para que se registre un clima húmedo, permite deducir el volumen de agua sobrante en la cuenca y disponible para su aprovechamiento, el cual además, constituye la reserva (R) de la cuenca. El procedimiento para calcularlo es el siguiente:

a) El **volumen máximo** de agua de la cuenca, es el que entra a través de la precipitación menos el volumen evaporado (P-Ep). Si se utiliza este volumen, no habrá posibilidad de reponerlo.

b) Si tomamos en cuenta que del volumen máximo de agua que recibe la cuenca, una parte se evapora y otra define sus características ecológicas, satisfaciendo sus necesidades de humedad; una vez que éstas han sido cubiertas, la cantidad de agua que la cuenca cede na-

turalmente constituye el **volumen disponible** para su aprovechamiento, sin afectar su equilibrio. Este volumen será equivalente a la diferencia entre el volumen máximo de agua en la cuenca y el que generaría la precipitación, definida por el valor límite r , para que la cuenca sea húmeda, menos su evaporación correspondiente (cuadro 1):

$$V_p = (P - E_p) - (r - E_r)$$

En esta expresión se observa la intervención de dos términos, uno es el balance hidrológico $(P - E_p)$ y otro $(r - E_r)$ que, a la vez que delimita el volumen de agua aprovechable, constituye la reserva de humedad que la cuenca necesita para mantener su paisaje original, y también es equivalente a la diferencia entre el volumen de escurrimiento y el del agua aprovechable. La extracción de un volumen mayor requeriría del estudio detallado sobre el comportamiento del agua en la cuenca para conocer hasta dónde podría explotarse dicha reserva sin afectarla y así conservar el equilibrio ecológico de la unidad hidrogeográfica.

La metodología expuesta se utilizó para el análisis del estado actual y futuro de las tres cuencas hidrológicas seleccionadas, de acuerdo con el cambio climático esperado para el año 2050, según los resultados de los modelos GFDL-R30, CCC y MTC, citados en la introducción de este trabajo (Magaña, *et al.*, 1997).

Para obtener los valores de los elementos hidroclimáticos, temperatura y precipitación, se trazaron los mapas de isolíneas medias anuales, con los valores actuales y los estimados con la aplicación de los modelos mencionados.

La evaporación total o evapotranspiración (evaporación del agua más transpiración de la vegetación) se calculó con la fórmula de Turc (Maderey, 1972), que se basa en la temperatura y la precipitación medias anuales, pero, en virtud de que con el valor resultante no se cumplía el balance hidrológico $P = Q + E$ (donde Q es el escurrimiento y E la evaporación total), se aplicó la relación $E_p = P - Q$, al considerar que el agua contenida en las cuencas es la que entra directamente por la precipitación (cuadro 2).

Con el valor encontrado (E_p) se obtuvo un coeficiente de ajuste de la relación entre la evaporación total y la evapotranspiración calculada con la fórmula de Turc (E_p/ET), mismo que se empleó para ajustar

la evapotranspiración real, según Turc, del valor mínimo de precipitación (r) que debe retener la cuenca como reserva (R) y poder evaluar posteriormente el volumen de agua aprovechable (Vp).

Cuadro 2. Parámetros hidroclimáticos medios anuales y balances hidrológicos para cada cuenca de la región Centro de la República Mexicana

REGIÓN HIDROLÓGICA	MODELO	TEMPERATURA T °C	PRECIPITACIÓN MEDIA P		ESCURTIMIENTO MEDIO Q		VALOR LÍMITE DE PRECIPITACIÓN ENTRE LAS ZONAS HÚMEDAS Y SECAS SEGÚN KÖPPEN P _{cr} : zona húmeda P _{cc} : zona seca mm	EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DE LA PRECIPITACIÓN QUE ENTRA A LA CUENCA E _p (E _p =P-Q)		EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL SEGÚN TURC** DE LA PRECIPITACIÓN QUE ENTRA A LA CUENCA E _p Turc		
			mm	m ³ /d ²	mm	m ³ /d ²		mm	m ³ /d ²	mm	m ³ /d ²	
CUENCA DEL SISTEMA FLUVIAL LEMA - CHAPALA - SANTIAGO Área en Km ² : 135835.89	ESCENARIO ACTUAL	18.7	775.2	105298.14	90.8 11.7% de P 232.6 30.0% de P	12333.90 11.7% de P 31595.43 30.0% de P	654	88836.67	884.4 88.3% 542.6 70.0% 884.2 87.8% 701.0 77.5%	92964.24 88.3% 73702.71 70.0% 120105.12 87.8% 95219.88 77.5%	612.90 83.258.08	83258.08 79.0% 107554.65 87.6%
	OPDL	22.4	904.3	122835.42	20.1 2.2% de P 203.3 22.5% de P	2740.30 2.2% de P 127615.44 12.7% de P	728	98688.53				
	CCCM	21.8	683.6	92850.39	0 0.0%	0 0.0%	716	97258.50	711.3 100.0% 563.9 82.5% 608.4 100.0% 482.3 85.3%	683 68.3% 92850.39 82.5% 76794.95 100.0% 65506.95 85.3%	637.00 93.2% 74003.39 96.4%	86527.46 93.2% 74003.39 96.4%
	MTC	21.6	565.4	76794.95	0 0.0%	0 0.0%	712	96715.15				
CUENCA DEL RÍO BALSAS Área en Km ² : 117637.78	ESCENARIO ACTUAL	21.5	996.80	117261.55	247.1 24.8% de P	29063.89 24.8% de P	710	83522.82	749.70 75.2% 955.60 81.8% 717.90 89.4% 666.80 91.3%	88197.66 75.2% 112410.22 81.8% 84455.17 89.4% 78438.09 91.3%	787.30 79.0% de P 1003.50 85.9% de P 763.90 93.9% de P 700.20 82369.97 95.8% de P	92613.40 79.0% de P 118049.51 85.9% de P 88687.12 93.9% de P 82369.97 95.8% de P
	OPDL	25.2	1168.6	137467.07	213.0 18.2% de P	25056.85 18.2% de P	784	92228.02				
	CCCM	24.6	802.80	94442.62	84.9 10.6% de P	9987.45 10.6% de P	772	90816.37				
	MTC	24.8	730.50	85931.62	63.7 8.7% de P	7493.53 8.7% de P	76 (730.5)***	91286.92				
CUENCA DEL RÍO PÁNICO Área en Km ² : 93862.28	ESCENARIO ACTUAL	19.9	918.60	90296.28	272.0 29.6% de P	26738.22 29.6% de P	678	66648.94	646.60 70.4% 850.50 76.5% 657.80 83.3% 581.60 87.3%	63560.06 70.4% 83607.95 76.5% 64661.68 83.3% 57177.36 87.3%	701.20 76.3% de P 922.30 82.9% de P 713.40 90.3% de P 630.70 94.6% de P	68932.12 76.3% de P 90664.19 82.9% de P 7028.85 90.3% de P 61999.25 94.6% de P
	OPDL	23.1	1112.20	108333.66	261.7 23.5% de P	25725.71 23.5% de P	742	72940.29				
	CCCM	22.0	790.10	77667.27	132.3 16.7% de P	13005.39 16.7% de P	720	70777.64				
	MTC	22.5	666.40	65513.39	84.8 12.7% de P	8336.03 12.7% de P	30 (666.4)***	71760.66				

* Datos calculados partiendo de que en el escenario actual 30% de la precipitación corresponde al escurrimiento y 70% a la evapotranspiración.

** ET = P(10.9+P(2L2)) 1/2)

L = 300+25H+0.05d3

Cuadro 2. (Continuación) Parámetros hidroclimáticos medios anuales y balances hidrológicos para cada cuenca de la región Centro de la República Mexicana

REGION HIDROLÓGICA	MODELO	EVAPOTRANSPIRACION REAL SEGUN TURC ^a DEL VALOR LIMITE DE PRECI- PITACION ENTRE ZONAS HÚMEDAS Y SECAS, DE ACUERDO A KOPPEN		FACTOR DE AJUSTE	EVAPOTRANSPIRACION REAL SEGUN TURC ^a AJUSTADA DEL VALOR LIMITE DE PRECIPITACION ENTRE ZONAS HÚMEDAS Y SECAS, DE ACUERDO CON KOPPEN		AGUA APROVECHABLE	RESERVA DE AGUA DE LA CUENCA
		mm	m ³ /a		mm	m ³ /a		
CUENCA DEL SISTEMA FLUVIAL	ESCENARIO ACTUAL	563.40	79246.66	1.12	651.50	88429.16	88.30 97.2% de Q	2.50 2.6% de Q
	GRPL	675.30	91729.98	1.12	(754.1)*** 728.0	98988.53	36.4* 15.6% de Q	196.2* 84.4% de Q
LEONIA - CHIAPALA - SANTIAGO	CCGM	660.30	89692.44	1.12	597.8*	97268.50	20.10 100% de Q	0.00
	MTC	665.30	89013.26	1.12	(737.3)*** 716.0	81202.70*	73.1* 36.0% de Q	130.2* 64.0% de Q
CUENCA DEL RIO BALASAS	CCGM	745.70	87722.49	0.95	710.10	83522.82	0.00 0.00	0.00
	MTC	730.60	85946.16	0.95	695.70	77605.64	0.00 0.00	0.00
CUENCA DEL RIO PLANCO	CCGM	735.70	86546.11	0.95	700.6 (666.8)***	82417.03	0.00 0.00	0.00
	MTC	735.70	86546.11	0.95	700.6 (666.8)***	82417.03	0.00 0.00	0.00
CUENCA DEL RIO PLANCO	GRPL	692.90	68113.65	0.92	639.00	62315.16	158.30 58.6% de Q	112.70 41.4% de Q
	CCGM	665.30	65400.51	0.92	613.50	60308.45	158.30 60.6% de Q	103.00 39.4% de Q
CUENCA DEL RIO PLANCO	GRPL	677.80	66629.28	0.92	625.0 (581.6)***	61438.92	23.80 19.5% de Q	106.50 80.5% de Q
	MTC	677.80	66629.28	0.92	625.0 (581.6)***	61438.92	0.00 0.00	84.80 83.9% de Q

*** Er. ó Ep según el caso, resulta mayor que r, por lo cual, en su caso, Er se iguala a r y Ep a P
**** r, resulta mayor de lo que lleva en la cuenca, por lo tanto, r y Er se deben sustituir por P y Ep respectivamente.

Por último se logró obtener el volumen de agua aprovechable (V_p), cantidad que está en función del escurrimiento (Q), el cual depende de la precipitación y de la evaporación. La suma del volumen de agua aprovechable (V_p) y el volumen de la reserva (R) forman el escurrimiento (Q) de la cuenca. V_p es la cantidad de agua aprovechable del escurrimiento sin dañar al medio y, por lo mismo, sin afectar el balance hidrológico de la cuenca. La reserva (R) es el volumen mínimo de agua que la cuenca debe contener para no romper su equilibrio.

El cuadro 2 se elaboró con el fin de resumir y facilitar la comparación de los resultados de los elementos hidroclimáticos utilizados para el balance de agua, en cada una de las cuencas y para cada uno de los escenarios.

4. Escenario actual del recurso agua

En el cuadro 2 se muestran los valores obtenidos para cada una de las cuencas de estudio, en su estado actual. Al observar las cifras de las distintas cuencas se aprecia, en general, que la evaporación total (E_p) crece en función de la variación, también creciente, de la temperatura y la precipitación, aunque en la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago se registra una evaporación media anual ligeramente superior a la de la cuenca del río Pánuco, a pesar de que esta última tiene una temperatura mayor. Ello se debe a que, en el primer caso, la precipitación media anual es más baja, por lo cual manifiesta una mayor sequedad atmosférica.

Contrario a lo esperado, los valores del escurrimiento (Q) en estas cuencas son aparentemente independientes del área de la cuenca, ya que resultan menores mientras mayor es el área de las mismas. A este respecto es importante recordar que las cantidades de agua de escurrimiento se obtienen de la medida directa del agua en las estaciones hidrométricas. Por lo tanto, es en estos registros en los cuales se detecta el manejo que se hace del recurso agua en las cuencas. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento varía de una cuenca a otra.

Según estimaciones de distintos autores, presentadas por Del Río (1962), el agua de escurrimiento total en la República Mexicana representa aproximadamente 30% de la precipitación, pero, de las tres cuencas de estudio sólo en la del río Balsas se acerca a este porcenta-

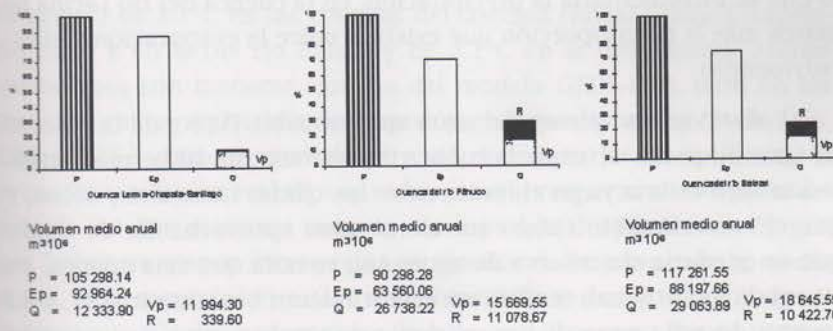
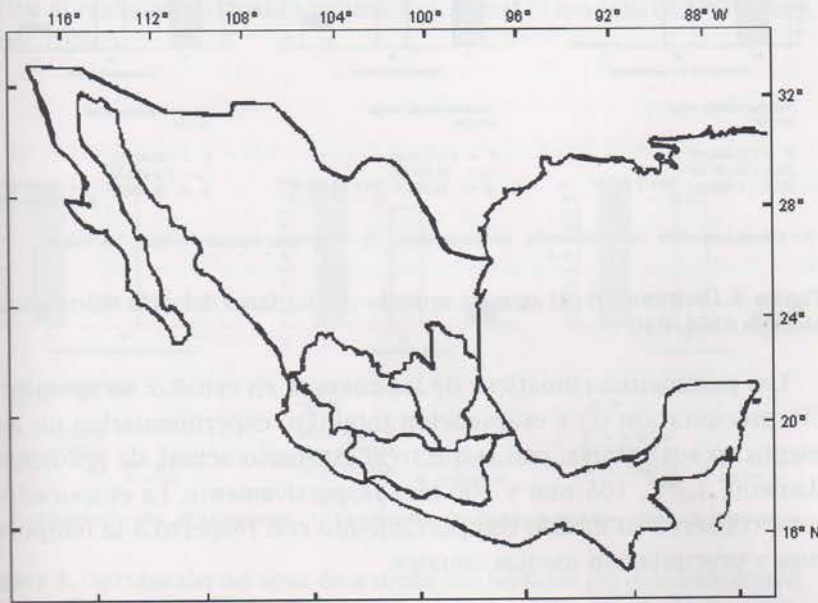
je (24.8%), debido a que el manejo del agua se hace en la propia cuenca. En cambio en la cuenca del sistema Lerma-Chapala-Santiago el porcentaje es bajo (11.7%) y en la del Pánuco es mayor (26.9%); en la primera porque se extraen grandes volúmenes de agua para abastecer a la Ciudad de México; en la segunda, aunque en apariencia el valor se acerca más a 30%, se debe a que el agua sobrante del valle de México desemboca artificialmente en el río Pánuco, haciendo que aumente el escurrimiento propio de la cuenca.

En los valores obtenidos para cada una de las cuencas de estudio, se observa una similitud en los porcentajes de los parámetros del balance hidrológico, con respecto a la precipitación en las cuencas de los ríos Pánuco y Balsas. En cambio, por las razones expuestas, en la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago existe una desproporción muy marcada entre la evaporación total y el escurrimiento (fig. 2).

La cantidad de agua aprovechable (V_p) y de reserva (R) de las cuencas depende originalmente del clima de las mismas, aunque también la influencia del hombre es determinante. Esto explica el hecho de que los valores V_p y R de la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago sean tan diferentes de los de los ríos Balsas y Pánuco. Las tres cuencas tienen clima húmedo, aunque en las de los ríos Balsas y Pánuco la precipitación es mayor, por lo cual ambos valores son más grandes, y si a esto se añade que, en la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, existe una sobreexplotación muy marcada que afecta sensiblemente al recurso agua, resulta normal la acentuada escasez de agua aprovechable (V_p), y por lo tanto, lo bajo de su reserva que es de $339.60 \times 10^6 \text{ m}^3$. Cabe resaltar que si no existiera esa excesiva extracción de agua en la cuenca, la reserva (R) sería de $26\,651 \times 10^6 \text{ m}^3$.

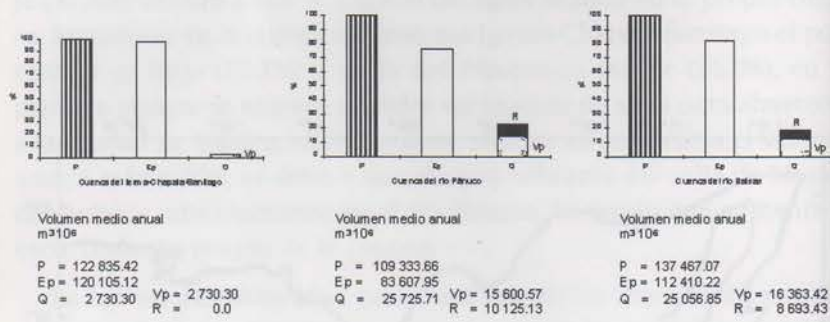
4.1 Escenario futuro (para el periodo 2025-2050) del recurso agua con el modelo GFDL-R30

En el cuadro 2 y en la figura 3 se muestran los cambios que sufrirían los elementos hidroclicmáticos de las cuencas analizadas, según los resultados del modelo GFDL-R30 (Magaña, *et al.*, 1997).



P = Precipitación media, Ep = Evaporación, Q = Escurrimiento, Vp = Volúmen de agua aprovechable, R = Reserva.

Figura 2. Distribución del agua, de acuerdo con las fases del ciclo hidrológico. Escenario actual.



P = Precipitación media, Ep = Evaporación, Q = Escurrimiento, Vp = Volúmen de agua aprovechable, R = Reserva.

Figura 3. Distribución del agua de acuerdo con las fases del ciclo hidrológico. Modelo GFDL-R30.

Los parámetros climáticos de las cuencas en estudio: temperatura (T), precipitación (P) y evaporación total (Ep) experimentarían un aumento en sus valores, con respecto al escenario actual, de aproximadamente 3.7°C, 165 mm y 200 mm respectivamente. La evaporación total conserva su mismo comportamiento con respecto a la temperatura y precipitación medias anuales.

El escurrimiento (Q) resulta menor entre mayor es el área de la cuenca, pero experimentarían una disminución en las tres cuencas, como resultado del aumento en la evaporación en mayor proporción de lo que se incrementaría la precipitación. En la cuenca del río Lerma se marca más la desproporción que existiría entre la evaporación y el escurrimiento.

Al observar los valores del agua aprovechable (Vp) y de la reserva de agua (R) se advierte que la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago estaría ya en el límite entre los climas húmedos y secos, y que el escurrimiento total equivale al agua aprovechable, de modo que se quedaría sin reserva de agua. Así, se nota que esta cuenca, en su condición original, tendría un escurrimiento bastante mayor, y su reserva de agua sería de casi el doble de Vp. Las otras dos cuencas conservarían su clima húmedo, sin embargo, debido al aumento en la evaporación, disminuirían levemente tanto el agua aprovechable como la reserva de agua.

4.2 Escenario futuro (para el periodo 2025-2050) del recurso agua con el modelo CCC

En el cuadro 2 y en la figura 4 se presentan los resultados que se tendrían al realizarse el cambio climático, según el modelo CCC (Magaña, *et al.*, 1997).

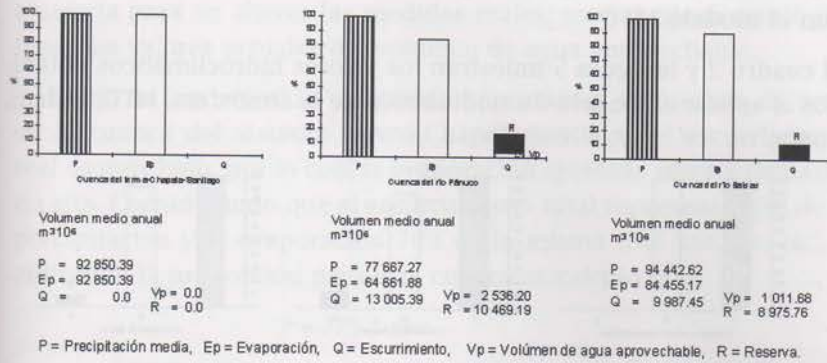


Figura 4. Distribución del agua de acuerdo con las fases del ciclo hidrológico. Modelo CCC.

Con la aplicación de este modelo habría un aumento en la temperatura (T) de 3.1°C en las cuencas del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago y en la del río Balsas y de 2.1°C en la del Pánuco. Ambas variaciones son menores que las del modelo GFDL-R30, pero en las tres cuencas se registraría disminución en la precipitación (P) de 91.6, 194 y 128.5 mm respectivamente. Al disminuir la precipitación, la evapotranspiración real (Ep) se reduciría con respecto al escenario actual de las dos primeras cuencas, no así en la del Pánuco en la que, por haber un menor incremento en el valor de la temperatura media anual, el elemento en cuestión aumentaría ligeramente. El agua de escurrimiento (Q) desaparecería en la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago y disminuiría sensiblemente en las otras dos.

Bajo este escenario, el clima de la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago se transformaría en seco y se quedaría sin volumen

de agua aprovechable y sin reserva de líquido. Los valores calculados con el supuesto de que 30% de la precipitación es agua de escurrimiento total y 70% se evapotranspira, también indican que no habría agua aprovechable y que el agua de reserva constituiría el total del escurrimiento. En las otras dos cuencas, los valores de Vp sufren un decremento muy significativo y los de R, aunque disminuyen, el descenso es de escasa importancia.

4.3 Escenario futuro (para el periodo 2025-2050) del recurso agua con el modelo MTC

El cuadro 2 y la figura 5 muestran los valores hidroclimáticos obtenidos al aplicar el modelo termodinámico de la atmósfera, MTC, (Adem, 1982).

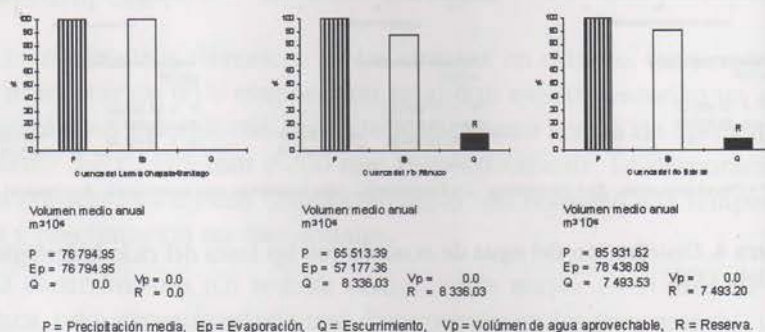


Figura 5. Distribución del agua de acuerdo con las fases del ciclo hidrológico. Modelo MTC.

Figura 5. Distribución del agua de acuerdo con las fases del ciclo hidrológico. Modelo MTC.

La temperatura media anual (T) aumentaría aproximadamente 3°C y la precipitación media (P) disminuiría más de 200 mm en las tres cuencas, por consiguiente, la evapotranspiración real (Ep) disminuiría de la misma manera, ya que existiría menos agua disponible para su evaporación total. El escurrimiento (Q) sufriría un marcado decremento en las cuencas de los ríos Balsas y Pánuco y en la del sistema Lerma-Chapala-Santiago desaparecería.

El volumen de agua aprovechable (Vp), desaparecería en las tres cuencas y sólo las de los ríos Balsas y Pánuco conservarían su reserva de agua, aunque bastante disminuida.

5. Conclusiones

5.1 Escenario Actual

Los volúmenes de agua disponible y, en general, los valores de los distintos parámetros del balance hidrológico de las cuencas en estudio son válidos, ya que tres de ellos, la precipitación, el escurrimiento y la temperatura proceden de medidas directas. Por otra parte, aunque se calculó la evaporación total o evapotranspiración real, fue necesario ajustarla para no alterar las medidas reales; este ajuste permitió obtener los valores actuales del volumen de agua aprovechable.

Como se han retenido y extraído importantes volúmenes de agua en la cuenca del sistema Lerma-Chapala-Santiago, el escurrimiento real es muy bajo, por lo cual la evaporación ajustada resulta demasiado alta. Considerando que el escurrimiento total representa 30% de la precipitación y la evaporación 70% de la misma (Del Río, *op. cit.*), y aplicando la proporción para esta cuenca se calculó que:

$$P = 775.2 \text{ mm}$$

$$E = 542.6 \text{ mm}$$

$$Q = 232.6 \text{ mm}$$

$$\left. \begin{array}{l} Vp = 36.4 \text{ mm} \\ R = 196.2 \text{ mm} \end{array} \right\}$$

Como resultado de esta estimación se concluye que la cuenca ha sufrido una disminución aproximada de 61% en su escurrimiento (Q) y de 99.7% en la reserva de agua (R), en cambio el volumen de agua aprovechable (Vp) se incrementó en 142.6%.

Estas variaciones muestran la gran explotación que se ha hecho de la reserva de agua de la cuenca del Lerma para abastecer a los centros de población asentados en ella y a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, que pertenece a la cuenca del Pánuco.

Durante los últimos 50 años se ha consumido el agua de la reserva para el suministro a las poblaciones de la cuenca del Lerma, la cual, después de ser utilizada, se vierte en los cauces del mismo sistema fluvial; es por eso que el porcentaje de agua aprovechable registra un

elevado incremento. Cabe señalar que el agua para el abastecimiento se toma de la reserva, debido a que la de escurrimiento está contaminada como consecuencia de que se vierten en los cauces las aguas usadas o residuales de dichas poblaciones.

La congruencia de los resultados obtenidos justifica la validez del método para la valoración de la disponibilidad de agua con los escenarios considerados y para estimar las posibles variaciones que se presentarán en los elementos hidroclimáticos para los años 2025-2050 ante el cambio climático global.

5.2 Escenarios futuros (para el periodo 2025-2050) y vulnerabilidad

Se concluye que el modelo GFDL-R30 es el más confiable (o el más apropiado) para predecir la disponibilidad de agua en las tres cuencas estudiadas ante al cambio climático. El modelo predice un aumento en la temperatura y la precipitación, por lo que se tendría asegurada la disponibilidad de agua a pesar de que aumentara la evapotranspiración. La cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago es la más vulnerable, ya que, a pesar de quedar agua disponible, se agotaría la reserva y no habría recurso suficiente para los diversos usos.

Los resultados obtenidos en los modelos CCC y MTC revelan que la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago es crítica, ya que por una parte, su clima cambiaría de húmedo a seco, y por otra, los actuales problemas referidos se agravarán al no disponer de agua, ni aún considerándola como cuenca virgen, ya que sólo se tendría agua de reserva, la cual al ser utilizada, alteraría todavía más su balance.

En el caso de las cuencas de los ríos Balsas y Pánuco, las cantidades de agua aprovechable, resultantes del modelo CCC disminuyen, no así las de la reserva de agua; en cambio, con los resultados del modelo MTC, se convertirían en cuencas de clima seco, conservando una menor reserva de agua para las mismas.

En el cuadro 3 y en la figura 6 se muestran los valores medios del balance hidrológico y del volumen de agua aprovechable (V_p) y reserva de agua (R) del centro de México, ajustando los valores de las tres cuencas estudiadas, tanto en su escenario actual como con los tres modelos aplicados, para la estimación hidrológica ante el cambio climático. Ilustran con mayor objetividad las condiciones que se ten-

drían en el futuro (periodo 2025-2050) con el cambio climático global, según los resultados obtenidos con los modelos GFDL-R30, CCC y MTC. Si bien, como se señaló, el modelo GFDL-R30 es el más favorecedor, con los tres se aprecia una disminución de los volúmenes de agua aprovechable y de la reserva de agua de las cuencas, y se observan condiciones más severas con el modelo MTC.

Cuadro 3. Promedio de los parámetros medios y balances hidrológicos de la región centro* de la República Mexicana.

MODELO CLIMÁTICO	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN MEDIA		EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL		ESCURRIMIENTO MEDIO		AGUA DE RESERVA	
	T	P		Ep (Ep=P-Q)		Q		Vp Vp=(p-Ep) · (r-Er)	
	°C	mm	m ³ 10 ⁶	mm	m ³ 10 ⁶	mm	m ³ 10 ⁶	mm	m ³ 10 ⁶
ESCENARIO ACTUAL	20.0	896.9	104285.99	693.6	81573.69	203.3	22712.00	67.9	72850.32
GFDL	23.6	1061.7	17837.62	896.8	65415.70	164.9	17837.62	59.0	6272.85
CCCM	22.8	758.8	7664.28	686.4	80657.47	72.4	7664.28	61.0	6481.65
MTC	23.0	654.1	5276.52	604.6	71905.20	49.5	90393.19	49.5	5276.41

* Área: 351,775.95

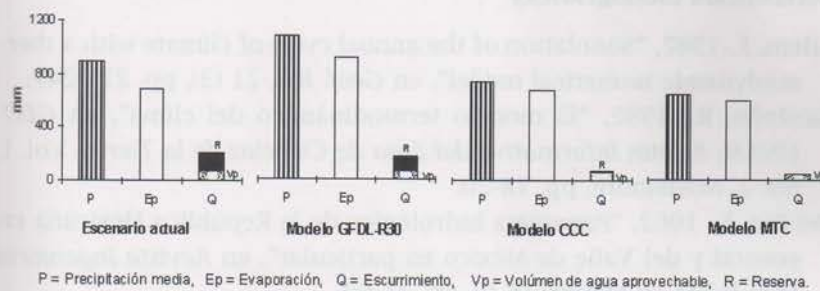


Figura 6. Promedio de los parámetros hidroclimáticos y balances hidrológicos en la región centro de la República Mexicana.

Se concluye que es necesario conservar los recursos naturales, principalmente el agua.

En la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago este vital recurso se ha sobrexplotado y descuidado su calidad, provocando un desequilibrio natural, especialmente en la cuenca alta del río Lerma

que, si bien en la actualidad tiene problemas relacionados con el agua, en un futuro cercano su vulnerabilidad será absoluta, sobre todo si se suman las consecuencias del cambio climático global. Las cuencas de los ríos Balsas y Pánuco están en una situación menos grave, no obstante, la conservación del recurso agua debe llevarse a cabo mediante una planeación adecuada y haciendo una explotación racional del mismo, para no llegar al estado de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago; principalmente en la del río Pánuco que, ligada a la cuenca de México, ya resulta bastante conflictiva en este aspecto.

Reconocimientos

Se agradece la colaboración de María Elena Cea Herrera en la integración del banco de datos sobre temperatura y precipitación, en el procesamiento de la información y la construcción de los cuadros y la revisión y preparación de la versión final del documento; a Cuauhtémoc Torres Ruata por la obtención y captura de los registros hidroclicmáticos y su vaciado en mapas y la elaboración del banco de datos hidrométricos y a Francisco Cruz Navarro por el trazado de isolíneas de temperatura y precipitación.

Referencias bibliográficas

- Adem, J., 1982, "Simulation of the annual cycle of climate with a thermodynamic numerical model", en *Geof. Int.*, 21 (3), pp. 229-247.
- Garduño, R., 1992, "El modelo termodinámico del clima", en *GEO-UNAM. Boletín Informativo del área de Ciencias de la Tierra*, Vol. 1, No. 2, Noviembre, pp. 18-20.
- Del Río, F., 1962, "Panorama hidrológico de la República Mexicana en general y del Valle de México en particular", en *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, 16 (I), pp. 41-60.
- Maderey R., L. E., 1972, Balance hidrológico de la cuenca del río Tizar durante el período 1967 - 1968, México, Instituto de Geografía, UNAM.
- Maderey R., L. E., 1991, "Cálculo con base en el clima, del volumen de agua de las cuencas hidrográficas húmedas, para un uso eficiente de la misma", en: Memorias del Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua, México, CNA, IMTA, pp. 76-79.
- Maderey R., L. E., 1994, "El Recurso agua en la República Mexicana. Un

breve análisis geográfico”, en *Revista Geográfica*, 119, enero-junio, pp. 133-163.

Maderey R., L. E., A. Jiménez R., M. E. Cea H. y C. Torres R., 1995, “Aplicación de un modelo climatológico para conocer la disponibilidad de agua en cuencas de clima húmedo en la República Mexicana”, en México ante el Cambio Climático. Segundo Taller de Estudio de País: México, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 159-164.

Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, C. Gay, 1997, “Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico”, en *Climate Research*, Vol. 9, Nos. 1 y 2, pp. 107, 114.

Capítulo IV Ecosistemas forestales

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA VEGETACIÓN EN MÉXICO

Lourdes Villers-Ruiz* e Irma Trejo-Vázquez.*

Resumen

Se realizó una evaluación de la vulnerabilidad que tendrían los ecosistemas forestales de México, como consecuencia de la aplicación de tres modelos de cambio climático (CCC, GFDL-R30 y de sensibilidad: +2°C de temperatura y -10% en precipitación). Se utilizaron las clasificaciones de clima y vegetación realizadas por García y Rzedowski. Se evaluó la vegetación que se establecería, de acuerdo con los tres modelos. Se señalan las áreas que resultarían afectadas, de acuerdo con el estado de deterioro de la vegetación actual, y los porcentajes por tipo de vegetación que estarían expuestos a diferentes variaciones climáticas, según indicaron los modelos.

En general, los bosques templados fríos y semicálidos son los tipos de vegetación más sensibles al cambio climático y tenderían a desaparecer al incrementarse la temperatura. Los bosques tropicales secos, muy secos y espinosos, con afinidades cálidas, tenderían a ocupar mayores superficies que en la actualidad, principalmente con el modelo CCC. El GFDL-R30 proyecta un incremento en la distribución de los bosques tropicales húmedos y subhúmedos, que serían favorecidos con el aumento en la precipitación.

Los ecosistemas más afectados por el impacto humano son los bosques tropicales y pastizales, en contraste con los bosques templados y el matorral xerófilo que aparentemente, tienen un menor grado de deterioro antropogénico, donde la afectación por el cambio climático sería mayor.

* Instituto de Geografía, UNAM. E-mail: villers@servidor.unam.mx

Palabras clave: vegetación, México, cambio climático.

1. Introducción

La mayoría de los estudios realizados para México sobre cambio climático y su relación con la vegetación, están más bien dirigidos hacia la investigación del papel que juegan las plantas como fuentes de emisión o secuestro de carbono. Éste es el caso de los trabajos realizados por Bellón, *et al.* (1994), Masera, *et al.* (1992), y Segura (1992), entre otros. En contraste, el estudio de los efectos del cambio climático sobre la vegetación de México, es un tópico relativamente poco explorado. A nivel internacional los trabajos de Shugart (1984), que inicialmente se referirían a la dinámica forestal, actualmente se han aplicado para modelar las respuestas potenciales de la vegetación al cambio climático global (Smith, *et al.*, 1992).

Los estudios acerca de la manera en la que la vegetación se manifiesta a los cambios ambientales van, desde los muy particulares, como los de respuestas fisiológicas, hasta cambios a gran escala, como el mapeo de zonas ecoclimáticas de la vegetación y el impacto que recibirían por una duplicación en la concentración del CO₂ atmosférico.

Los resultados de modelos prospectivos, aplicados a nivel global, señalan que la vegetación de latitudes altas sería más sensible a los cambios en temperatura; en particular, los bosques boreales serían los más afectados. En cambio, los ecosistemas tropicales serían más sensibles a los cambios en precipitación (Emanuel, *et al.*, 1985, Kauppi & Posch, 1985 y Bolin, *et al.*, 1986). Estos modelos han sido diseñados para diferentes escalas, que van desde regional, hasta continental y global. Los requerimientos de información para cada uno de ellos dependen precisamente del detalle que se quiere alcanzar.

El punto de partida para estos análisis, a nivel de país, es relacionar patrones distribución de vegetación con las condiciones del clima actual para, posteriormente, crear escenarios de cambio climático y evaluar si las modificaciones en el clima, tendrían repercusiones en la distribución de la vegetación, o bien analizar el tipo de vegetación actual que resultaría más afectada ante un eventual cambio en el clima. El presente estudio analiza este tipo de implicaciones.

2. Métodos

Con el fin de crear un mapa base de la vegetación actual de México y su relación con el clima, se hizo una correspondencia entre el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1988) y la tipología de vegetación realizada por Rzedowski (1978, 1992).

Para la generación de escenarios prospectivos, se aplicaron dos modelos que toman en cuenta la duplicación en la concentración de CO₂: el *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL-R30) y el *Canadian Climate Center* (CCC), (Conde, *et al*, 1995). Además se trabajó con un modelo de sensibilidad al cambio climático, en el que se aumentó homogéneamente la temperatura del país 2° C y se disminuyó 10% a la precipitación actual.

La clasificación climática de García (1989) para la República Mexicana fue cartografiada en una rejilla de 0.5 x 0.5 grados de latitud, longitud. Se estudiaron y evaluaron las estaciones meteorológicas que representaran las características climáticas del país a ese nivel de detalle y de las cuales se tuviera disponibilidad de datos de temperatura media y precipitación total a nivel mensual, para un periodo de 30 años, comprendidos entre 1950 y 1980. Así a cada uno de los 770 cuadros en los que está dividido el territorio mexicano, con la resolución antes mencionada, se le asoció una base de datos climática de 365 estaciones, con el promedio de los 30 años requeridos.

Los 29 tipos climáticos que define García se reordenaron en 16 grupos, con el fin de hacer más equilibrada la correspondencia entre éstos y los nueve tipos de vegetación delimitados por Rzedowski, y así facilitar su interpretación.

Se hicieron sobreposiciones de la carta de la vegetación que debería cubrir el territorio si no existiera ningún impacto humano (Rzedowski, 1992), con cada uno de los parámetros del clima, para reconocer las condiciones climáticas en las que preferentemente se distribuye cada tipo de vegetación, las sobreposiciones se hicieron en un sistema de información geográfica: ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*) ITC, 1992, instalado en computadoras personales. De esta manera fue posible, a nivel teórico, asignar a cada tipo de clima la vegetación correspondiente.

Con los datos de las estaciones climatológicas seleccionadas, se generó un mapa de clima actual, al que se le aplicaron las modificaciones de temperatura y precipitación que señalan los modelos utilizados, con lo cual se obtuvieron tres diferentes mapas de clima, de acuerdo con cada uno de los modelos propuestos.

Con la información anterior se generaron los mapas de la posible distribución de la vegetación, de acuerdo con las correspondencias clima-vegetación, por lo que se asignó a cada área la vegetación que potencialmente podrían sostener en esas nuevas condiciones climáticas.

Al sobreponer los mapas de escenarios climáticos con los del clima actual, se obtuvieron mapas en los cuales se muestran las áreas del país que presentarían modificaciones en el tipo climático, de acuerdo con cada modelo, en contraste con las que permanecerían sin cambio (mapas de variación climática).

Posteriormente, se sobrepusieron cada uno de los tres mapas de variación climática al de vegetación potencial actual, con el fin de señalar espacialmente las áreas de vegetación que serían afectadas, de acuerdo con cada uno de los escenarios de cambio climático.

En virtud de que los modelos CCC y GFDL-R30 predicen un cambio de temperatura y precipitación, según el área geográfica del país (aumentos en temperatura entre 2 y 4°C, así como incrementos o decrementos en precipitación), y que estas variaciones no implican forzosamente un cambio en el tipo de clima y, por lo tanto, la presencia de un tipo de vegetación diferente al actual, se cuantificó únicamente la proporción de cada tipo de vegetación que sí estaría expuesta a las diferentes variaciones climáticas.

Finalmente, se sobrepusieron los mapas de variación climática de los tres modelos al de vegetación y de uso actual del suelo, con el fin de evaluar el impacto del cambio climático considerando el estado de conservación que actualmente presentan los ecosistemas, ya que esto podría relacionarse posteriormente con la implantación de políticas de mitigación y adaptación.

3. Resultados

3.1 Vegetación que potencialmente se establecería en México debido a un cambio climático

A pesar de existir diferente grado de detalle entre la clasificación climática y la tipología de la vegetación, fue posible reconocer una correspondencia entre ambos, como se señala en el cuadro 1. Aun cuando algunas agrupaciones vegetales están en un espectro climático amplio, se logró asignar a cada tipo climático la vegetación potencial que se desarrolla bajo esas condiciones.

Con esta correspondencia se determinaron los cambios potenciales en la distribución de la vegetación; en el caso que los cambios climáticos fueran lo suficientemente lentos como para permitir la migración y adaptación de las especies. A continuación se describe la vegetación potencial que existiría en México, de acuerdo con los modelos.

El Modelo de Sensibilidad (+2C y -10% pp), predice un aumento en la distribución de los climas cálidos y una disminución de la humedad; estos cambios repercutirían en la distribución de la vegetación. Los bosques tropicales perennifolios, subperennifolios y caducifolios que hay en climas cálidos húmedos y subhúmedos del tipo 1 (temperatura media anual $> 22^{\circ}\text{C}$ y un cociente de precipitación/temperatura entre 43 y 55), aumentarían ligeramente su distribución; podrían establecerse en áreas con mayor altitud que las actuales.

De acuerdo con este modelo, el aumento de la temperatura favorecería el establecimiento de comunidades tropicales, restando terreno a bosques templados de encino y de coníferas establecidos en climas templados y semifríos; estos últimos desaparecerían al aplicar el modelo.

El límite latitudinal de los bosques espinosos se desplazaría hacia el sur, principalmente en la vertiente del Pacífico, ya que se serían favorecidos por las condiciones de mayor aridez, en estados como Sonora y Sinaloa, o en la Cuenca del Balsas e Istmo de Tehuantepec donde se ampliaría su distribución. En la vertiente del Golfo, estos bosques tendrían una mayor distribución en Tamaulipas y Nuevo León.

Cuadro 1. Correspondencia de los tipos de vegetación, según J. Rzedowski, con la clasificación climática de E. García para la República Mexicana.

Tipo de vegetación	Temperatura		Humedad	
	Cobertura en %	Tipo	Cobertura en %	Tipo
Bosque tropical perennifolio	91.9	Cálido	36.6	Subhúmedo2
			32.1	Húmedo
			15.7	Muy húmedo
Bosque tropical subperennifolio	98.9	Cálido	38.1	Subhúmedo1
			36.8	Subhúmedo0
			20.8	Subhúmedo2
Bosque tropical caducifolio	61.5 32.4	Cálido Semicálido	44.3	Subhúmedo0
			22.1	Subhúmedo1
			11.8	Subhúmedo2
Bosque espinoso	70.4 28.4	Cálido Semicálido	32.2	Semiárido
			24.5	Áridos
			18.4	Muy Áridos
			18.0	Subhúmedo1
Matorral xerófilo	60.5 20.6 18.7	Semicálido Cálido Templado	48.5	Muy Áridos
			26.3	Áridos
			21.5	Semiárido
Pastizal	65.8 31.0	Templado Semicálido	39.8	Semiárido
			27.1	Muy Áridos
			21.9	Áridos
Bosque templado (Coníferas y <i>Quercus</i>)	49.3 34.3 11.5	Templado Semicálido Cálido	24.4	Subhúmedo2
			22.9	Subhúmedo1
			18.8	Semiárido
			18.7	Subhúmedo0
Bosque mesófilo	55.6 32.9	Semicálido Cálido	44.7	Muy húmedo
			33.0	húmedo
			17.1	Subhúmedo2
Vegetación Acuática	86.4	Cálido	56.2	Húmedo
			18.2	Subhúmedo0

NOTA: La equivalencia entre los tipos climáticos aquí señalados con la clasificación de E. García es como sigue: Cálidos=A; Semicálidos=A(C) y C(A); Templados=C; para el régimen de lluvia: Húmedos y Muy húmedos=m y f; Subhúmedo2=w₂; Subhúmedo1=w₁; Subhúmedo0=w₀; Muy árido=BW; árido=BS0; Semiárido=BS1.

Asimismo, el pastizal y ciertos tipos de matorrales con afinidades templadas, serían desplazados por los matorrales xerófilos con preferencias de climas cálidos y más secos (cuadro 2).

Cuadro 2. Porcentajes de vegetación potencial actual de acuerdo con el clima actual y según modelos aplicados.

Tipo de clima (Köppen, modificado por García)	Tipo de vegetación (Rzedowski)	Potencial actual	Modelo de sensibilidad	Modelo CCC	Modelo GFDL-R30
Cálido húmedo	Bosque tropical perennifolio	5.86	6.40	3.67	7.85
Cálido subhúmedo2	Bosque tropical subperennifolio	3.67	1.33	1.71	6.35
Cálido subhúmedo1	Bosque tropical caducifolio y bosque tropical subperennifolio	17.70	20.12	20.20	22.80
Semicálido húmedo	Bosque mesófilo	2.10	0.26	0.54	1.30
Semicálido subhúmedo 2	Bosque tropical subperennifolio y bosque mesófilo	0.38	0.91	0.13	2.02
Semicálido subhúmedo 1	Bosque tropical caducifolio	6.58	4.62	0.52	5.97
Templado húmedo	Bosque de coníferas y <i>Quercus</i>	0.56	0.28	0.28	0.28
Templado subhúmedo 2	Bosque de coníferas y <i>Quercus</i>	2.67	1.32	1.31	2.12
Templado subhúmedo 1	Bosque de coníferas y <i>Quercus</i>	3.13	2.31	2.06	1.52
Semifrío	Bosque de coníferas	2.31	0	0	0
Seco cálido	Bosque espinoso y matorral xerófilo	11	19.67	18.10	18.38
Seco semicálido	Matorral xerófilo y bosque espinoso	10.50	11.03	21.96	15.68
Seco templado	Pastizal y matorral xerófilo	11.60	3.97	12.49	10.86
Árido cálido	Matorral xerófilo	6.07	16.88	7.96	4.33
Árido semicálido	Matorral xerófilo	11.37	10.26	1.58	0.51
Árido templado	Pastizal	4.72	0.03	0	0

NOTA: Los climas cálidos presentan temperatura media anual >22°C, los semicálidos entre 18 y 22°C y los templados entre 12 y 18°C. Los grupos de humedad se separan por el cociente P/T (precipitación/temperatura), ver: García, 1988.

De acuerdo con el modelo CCC, el aumento de la temperatura media anual en el país sería de 2.8°C y habría un decremento de 7% en la precipitación anual. Este modelo predice una tendencia muy similar a la del modelo anterior, para el caso de bosques tropicales perennifolios, subperennifolios y caducifolios. Estos últimos tenderían a ocupar zonas de mayor altitud que la actual, sobre todo en los estados de Jalisco y Guerrero.

Los climas secos cálidos y semicálidos incrementarían su superficie cubriendo áreas como la cuenca del Balsas, el Istmo de Tehuantepec, el centro del estado de Oaxaca, así como el norte de Tamaulipas, lo que propiciaría el establecimiento de bosques espinosos o bosques tropicales caducifolios en sus formas más secas en estas zonas. El incremento se observa también en los estados de San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas, donde los climas templados serían desplazados por otros más calientes, de tal manera que las comunidades vegetales de estas zonas serían matorrales xerófilos expuestos a condiciones más cálidas.

El escenario que plantea el modelo GFDL-R30 es el menos severo de los tres analizados. El modelo predice un aumento promedio de temperatura de 3.2°C y un incremento en precipitación del 20%. Estos incrementos no se reflejan en cambios fuertes a nivel de tipo climático.

Se observa un incremento en la presencia de climas más cálidos, tanto húmedos, como subhúmedos (de 27 a 37% de la superficie total del país). Esto beneficiaría a los bosques tropicales, los cuales podrían ampliar su distribución hacia zonas más al norte del país que las ocupadas actualmente. Los climas árido templado y semicálido prácticamente desaparecerían, por lo que los pastizales y los matorrales xerófilos serían desplazados por matorrales con afinidades a mayor humedad y mayor temperatura, o incluso por bosques espinosos.

Los bosques de coníferas asentados en climas semifríos, serían remplazados por comunidades más templadas, por ejemplo encinares, que, a su vez, tenderían a establecerse en lugares con mayor altitud.

3.2 Variación climática sobre la vegetación potencial actual

El cambio en la distribución de las comunidades vegetales que predi-

cen los modelos, implica que la vegetación debería tener la capacidad de respuesta para adaptarse o migrar en un tiempo menor del que normalmente requieren estos procesos, lo cual es poco probable (Markham, 1996). Por esta razón, en el presente apartado y en el siguiente, se evaluará el impacto del cambio climático en los ecosistemas actuales, sin considerar una redistribución de la vegetación.

En la figura 1 se grafican los resultados de la aplicación de los tres modelos de cambio climático al mapa de vegetación potencial actual. Alrededor de 50% del país se verá afectado por el cambio climático: 52.2% en el modelo de sensibilidad, 52% en el modelo CCC y cerca del 58% en el modelo GFDL-R30.

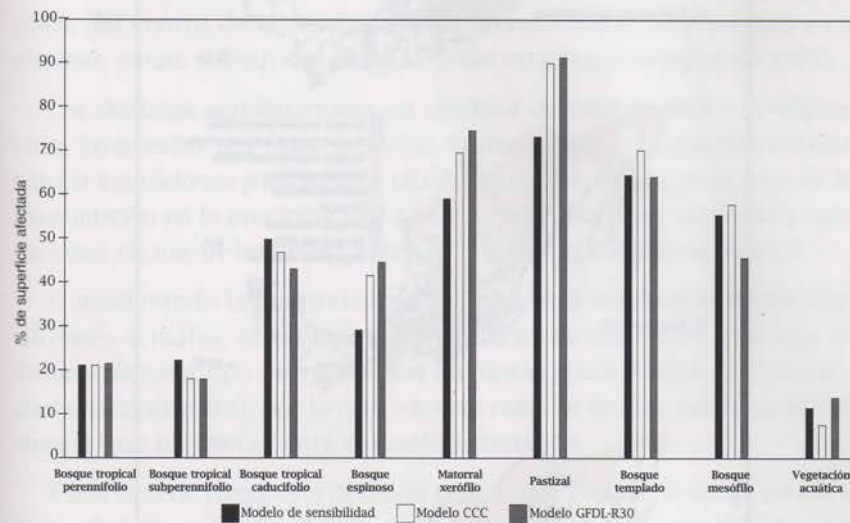


Figura 1. Vegetación potencial que resultaría afectada en México, de acuerdo con cada uno de los modelos de cambio climático.

Se observa que, dependiendo del modelo, las comunidades vegetales se verán afectadas diferencialmente. Las más sensibles son las que se establecen en lugares con climas templados, tales como los bosques de coníferas y encinos (bosques templados), bosques mesófilos, pastizales y matorrales xerófitos. Como puede observarse, entre 65 y 70% de la superficie total de los bosques templados resultaría afecta-

do; los bosques mesófilos estarían expuestos al cambio entre 46 y 58% de su extensión. Los pastizales, así como aquellos matorrales xerófilos con afinidades templadas, hasta 93% de su superficie total sería afectada por el cambio. En la figura 2 se muestran las áreas del país afectadas, de acuerdo con cada modelo aplicado.

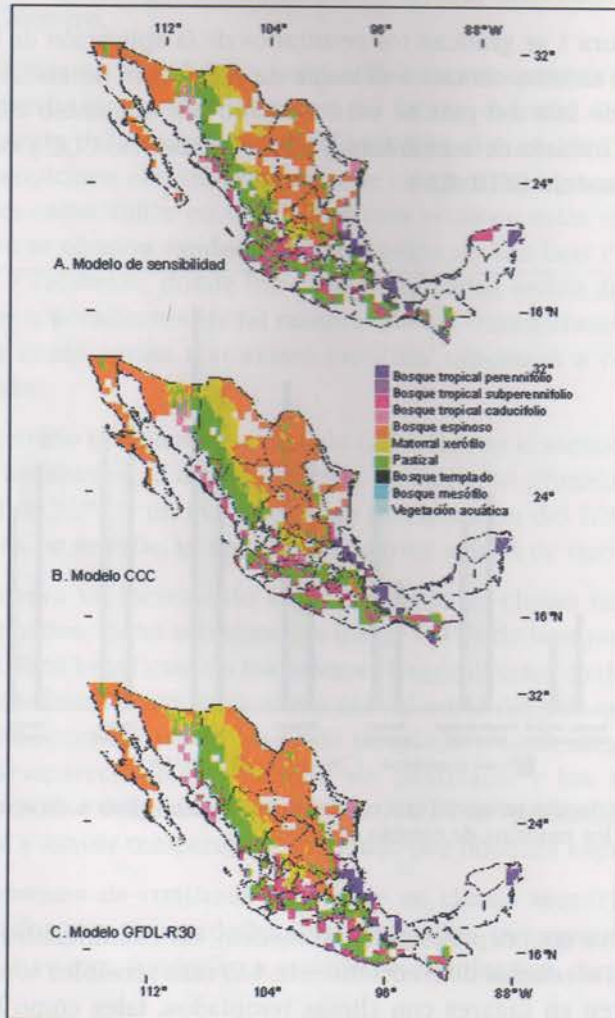


Figura 2. Áreas de vegetación afectadas por el cambio climático, según el modelo aplicado.

Las variaciones climáticas a las que estarían sujetos estos tipos de vegetación son muy amplias, de acuerdo con lo que predicen los modelos CCC y GFDL-R30. Los incrementos en temperatura varían de menos de 1.5°C a más de 4.5°C, a lo largo del territorio; las variaciones en la precipitación van de menos de 30% a más 40% en el modelo CCC, y de menos de 30% a más de 70% en el modelo GFDL-R30. Estos cambios se distribuyen de tal forma en el país que en áreas como el norte de México la temperatura media se elevaría más de 4°C, en contraste con zonas en el sur donde el incremento térmico estaría alrededor de los 2 y 2.5°C. Con respecto a las tasas de precipitación, el modelo CCC predice que la mayor parte del país estaría sujeto a decrementos en la precipitación; en contraste, el modelo GFDL-R30 predice incrementos diferenciales en precipitación. Por ejemplo, gran parte del centro de México presentaría tasas entre +20% y +30% y en algunas zonas del sur del país las tasas estarían alrededor de +40%.

Las distintas combinaciones en cambios de temperatura y precipitación, propuestas por estos modelos, implican que la vegetación debería tolerar condiciones más secas y cálidas que las actuales, en el caso de la disminución en la precipitación; o, por el contrario, estar expuesta a condiciones de mayor humedad, como lo propone el modelo GFDL-R30.

Considerando la distribución potencial de la vegetación en las condiciones actuales, se estimaron las variaciones climáticas a las que se sometería cada tipo de vegetación (distintas combinaciones en humedad y temperatura), por lo que, en este caso, se evalúa también la tendencia que presentan ante el cambio climático.

Cada tipo de clima está definido por ciertos rangos de temperatura y humedad (García, 1988); rebasar los límites de cada uno implica un cambio en el tipo climático; sin embargo, en ocasiones, los incrementos o decrementos no son lo suficientemente importantes como para pasar a un tipo climático distinto. De esta manera, cuando en un área aumenta la temperatura, sin sobrepasar el rango de clasificación, se considera que no hay cambio en ésta. Por ejemplo, el aumento en la temperatura de los climas semicálidos que no sobrepase el rango de clasificación, no produciría alteraciones en los ecosistemas establecidos; pero si se rebasa el límite de semicálido a cálido, se generaría una condición de estrés para la vegetación.

Con el modelo de sensibilidad, los tipos de vegetación más afectados por estas variaciones climáticas son los que están expuestos a condiciones más secas y más cálidas (señaladas como -Humedad +Temperatura en la figura 3A), y corresponderían al bosque mesófilo de montaña que tendrían alrededor de 31% de su superficie total afectada, seguido de los bosques templados (22%), el bosque espinoso y el bosque tropical caducifolio (10%). Las zonas más sensibles en las cuales se ubican los bosques templados son: la Sierra Madre Occidental, en los estados de Chihuahua y Durango, norte de Jalisco, las serranías al sur de Chapala, el oriente de Michoacán, norte de Morelos y la Sierra de Zongolica en Veracruz. Los bosques mesófilos que serían más afectados se localizan al oriente de Oaxaca y en la zona de Comitán, en Chiapas. Los bosques tropicales perennifolios y subperennifolios conservan alrededor de 80% de su superficie en áreas que mantendrán el mismo tipo de clima.

De acuerdo con el modelo CCC (figura 3B), casi todos los tipos de vegetación tendrían cerca de 10% de su superficie afectada por condiciones más secas y cálidas que las actuales, lo que representaría una fuerte presión para esas zonas. Los matorrales xerófilos situados al sur de Chihuahua, centro oriente de Coahuila, norte de Zacatecas y en San Luis Potosí tendrían una mayor superficie expuesta a climas más cálidos, principalmente en los pastizales, matorral xerófito y bosques templados.

En cambio, el modelo GFDL-R30 predice un panorama distinto (figura 3C), ya que en gran parte del país habría incrementos tanto en temperatura como en humedad. Los bosques espinoso, tropical caducifolio y tropical subperennifolio, tendrían parte de su área de distribución (entre 11 y 17% de su superficie) expuesta a incrementos en precipitación pero con temperatura constante, principalmente en Oaxaca y su colindancia con Guerrero. De igual manera, el bosque templado y el mesófilo de montaña tendrían cerca de 10% de su superficie expuesta a incrementos en precipitación, aun cuando gran parte de su área mostraría cambios hacia climas más cálidos. Esto último sucede también con el matorral xerófito y el pastizal.

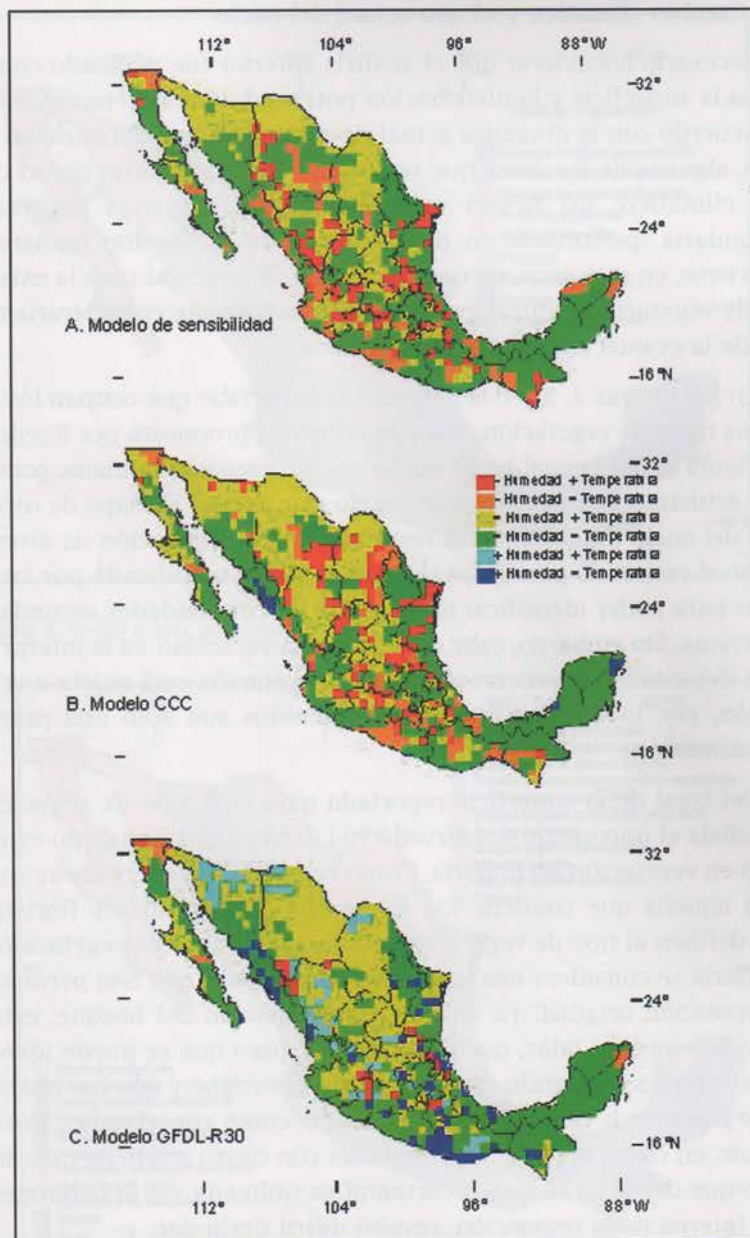


Figura 3. Áreas afectadas por las variaciones climáticas, de acuerdo con el modelo aplicado.

3.3 Cambio climático y el uso actual del suelo

Es necesario considerar que el análisis anterior fue realizado con base en la superficie y la distribución potencial de la vegetación, y que, de acuerdo con la dinámica actual de cambio de uso del suelo en México, algunas de las áreas que se señalan como afectadas por el cambio climático, no tienen cubierta vegetal o tienen vegetación secundaria (perturbada en distintos grados). La acción humana se convierte, en este caso, en una limitante fundamental para la existencia de vegetación natural, por lo que es importante considerarla dentro de la evaluación de cambio climático.

En las figuras 4, 5 y 6 se muestra la superficie que ocupan los distintos tipos de vegetación, tanto la potencial propuesta por Rzedowski (figura 4), en la cual no se analiza la intervención humana, como la que actualmente ocupa, considerando este factor. El mapa de uso actual del suelo (figura 5), es el resultado de la conjugación de diversas fuentes, resumido por Oropeza, *et al.* (1992) y modificado por las autoras para poder identificar el origen de las comunidades secundarias genéricas. Sin embargo, cabe aclarar que la veracidad en la interpretación del estado de conservación de la vegetación está sujeta a verificación, por lo que los resultados obtenidos son sólo una primera aproximación.

Del total de la superficie reportada para cada tipo de vegetación, se señala el porcentaje conservado y el deteriorado, agrupado éste último en vegetación secundaria. Como vegetación conservada se considera aquella que contiene los elementos estructurales y florísticos que definen al tipo de vegetación nativa. En el rubro de vegetación secundaria se considera una gama de comunidades que han perdido su composición original, ya sea por fragmentación del bosque, extracción de especies, talas, quemas, etcétera, pero que se puede identificar el tipo de vegetación original del cual proviene y que fue alterado. Cabe mencionar que las áreas señaladas como conservadas, pueden incluir, en cierta medida, comunidades con cierto grado de deterioro, pero que debido a la escala cartográfica utilizada y a la heterogeneidad interna de la vegetación, resultó difícil deslindar.

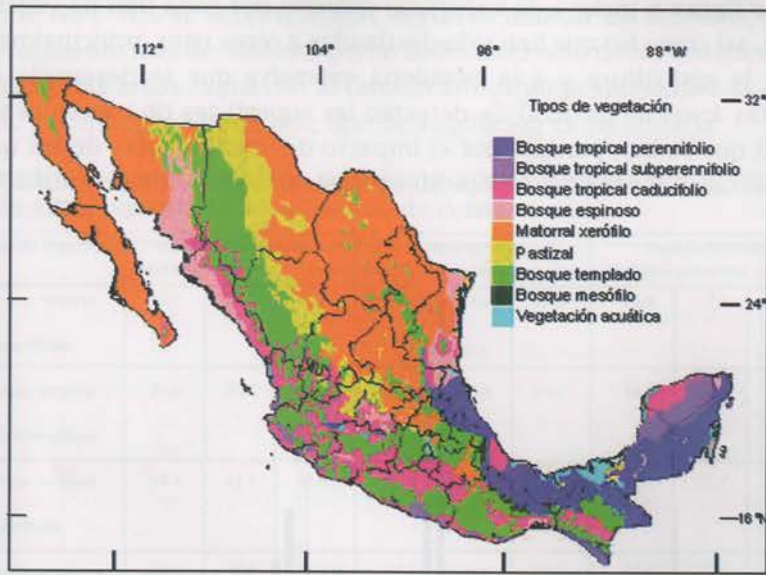


Figura 4. Vegetación potencial.

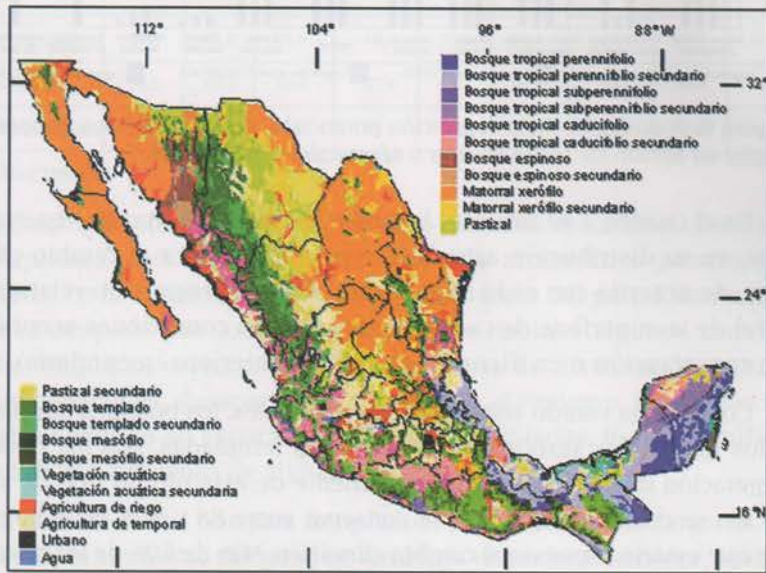


Figura 5. Vegetación actual.

La figura 6 incluye, la superficie cubierta por cada tipo de vegetación, así como las que han sido destinadas a otros usos, principalmente a la agricultura o a la ganadería extensiva que se desarrolla en ciertas áreas de pastizal. Se detectan las superficies de cobertura vegetal que se han perdido por el impacto del uso humano, de los que se destacan los bosques tropicales por su alto grado de deterioro.

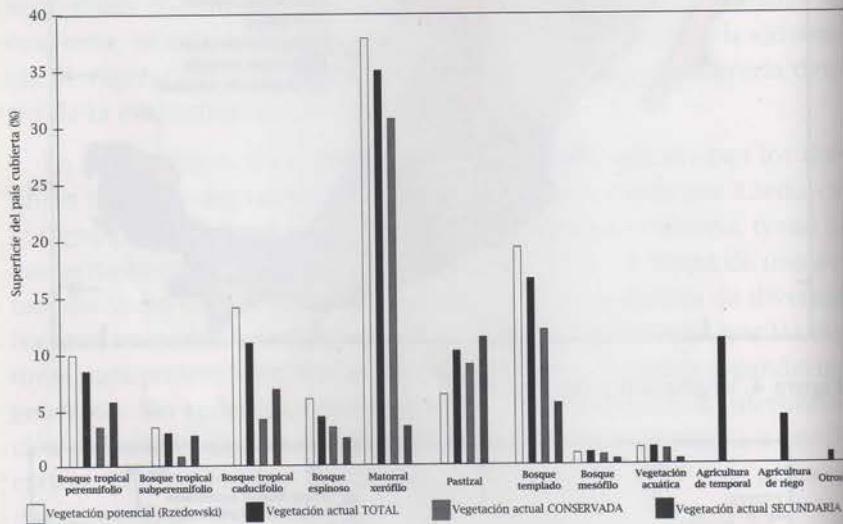


Figura 6. Porcentajes de la vegetación potencial y actual de México, proporción según su estado de conservación o afectación (secundaria).

En el cuadro 3 se muestra la superficie de cada tipo de vegetación que, en su distribución actual, se vería afectada por el cambio climático, de acuerdo con cada modelo, así como la proporción relativa del total de la superficie de cada tipo que está en condiciones aceptables de conservación o en distintos grados de deterioro (secundaria).

Como se ha venido señalando, los pastizales, los bosques templados y los matorrales xerófitos con afinidades templadas, son los tipos de vegetación más sensibles, principalmente de este último tipo de vegetación se considera que aún se conserva entre 88 y 90% de la superficie que estaría expuesta al cambio climático. Más de 60% de los bosques templados de pinos y encinos resultarían afectados, de los cuales se calcula que alrededor de 73% aún están conservados. De los pastizales,

entre 66 y 86% se vería afectado, según lo indican los modelos, pero actualmente más de 50% está perturbado. En el caso de los bosques tropicales, las áreas expuestas al cambio muestran proporciones muy altas, y entre 60 y 85% de este tipo de vegetación es secundaria.

Cuadro 3. Porcentaje de la vegetación actual afectada por el cambio climático, considerando su estado de conservación.

Tipo de vegetación	Modelo de sensibilidad			Modelo CCC			Modelo GFDL-R30		
	AFECTADA	Conservada	Secundaria	AFECTADA	Conservada	Secundaria	AFECTADA	Conservada	Secundaria
Bosque tropical perennifolio	18.7	21.3	78.7	19.5	14.8	85.2	19.4	17.8	82.2
Bosque tropical subperennifolio	20.4	30.6	69.4	15.5	25.8	74.2	16.9	29.5	70.5
Bosque tropical caducifolio	48.1	42.4	57.6	42.2	35.7	64.4	42.5	36.7	63.3
Bosque espinoso	28.4	78.0	22.0	37.1	76.0	23.9	37.6	73.0	27.0
Matorral xerófilo	59.5	89.1	10.9	72.9	90.0	10.0	74.2	88.2	18.8
Pastizal	66.1	48.4	51.6	78.1	49.0	51.0	85.5	46.3	53.7
Bosque templado	64.0	71.0	29.0	68.8	72.3	27.7	65.2	73.1	26.9
Bosque mesófilo	52.5	63.2	36.8	57.9	63.1	36.9	46.1	45.5	54.5
Vegetación acuática	24.8	96.5	3.5	29.7	96.7	3.3	25.7	99.5	0.5

4. Discusión

En general, de acuerdo con los distintos modelos de cambio climático, la duplicación en la concentración de CO₂ atmosférico promovería cambios en la cubierta vegetal, en grandes áreas del país. Disminuiría el área ocupada por los climas templados, incluso algunos como el árido templado, correspondiente a las áreas de distribución natural de los pastizales, desaparecería totalmente. Asimismo, los climas semifríos cederían su espacio a zonas más templadas, lo que significaría el desplazamiento de algunos bosques de coníferas.

El hábitat de los bosques templados, establecidos a lo largo de las cadenas montañosas del país, se reduciría considerablemente, lo cual implicaría la redistribución de estos bosques o el establecimiento de formas adaptadas a condiciones más secas y cálidas, como es el caso de

los bosques espinosos y los matorrales xerófitos. El modelo GFDL-R30 predice un aumento en la temperatura y la precipitación, por lo que los bosques tropicales ampliarían su distribución hacia el norte del país.

Lo anterior significa que ante el posible cambio climático, las comunidades vegetales tendrán que enfrentar presiones como el incremento en la aridez o rangos más altos de precipitación (dependiendo del modelo que se aplique) en tiempos relativamente cortos. La capacidad de respuesta se vería afectada por el estado de conservación de la vegetación y por factores como la deforestación. En este caso, alrededor de 67% de los bosques templados actuales, que representan 17% del territorio, resultarían afectados, de los cuales cerca de 70% están conservados. El matorral xerófito que cubre 30% del país, resultaría afectado, según los modelos, de 73 a 74% de la superficie y de este porcentaje se considera que 80% está conservada.

5. Conclusiones

La aplicación de los modelos de cambio climático proporciona información muy valiosa en relación con la vulnerabilidad de los ecosistemas, ante la duplicación en la concentración de CO₂ en la atmósfera. Los modelos aplicados resaltan los tipos de vegetación más sensibles y las áreas geográficas que podrían ser afectadas por los cambios. Igualmente, se analizaron, con cierto grado de detalle, las variaciones climáticas a las que estarían expuestos los diferentes tipos de vegetación.

Por otro lado, utilizar una clasificación difundida a nivel nacional permite conocer los tipos de vegetación que serían afectados por el cambio climático, como el bosque mesófilo de montaña, que aun cuando ocupan una pequeña superficie en el territorio, son altamente significativos a nivel biogeográfico y por su diversidad.

El rango en los incrementos de temperatura y la proporción del aumento o disminución de la lluvia varían para cada modelo, los escenarios planteados por cada uno de ellos sientan las bases para iniciar una discusión acerca del tipo de medidas que sería conveniente aplicar, con el fin de mitigar los efectos del cambio climático global en todo el país. En este sentido, sería importante hacer una evaluación de la respuesta y la capacidad de adaptación que tienen ciertos ecosistemas

ante las variaciones interanuales que existen actualmente en el país, como puede ser la sequía intraestival o de medio verano y su posible extrapolación a condiciones climáticas más severas y prolongadas.

Aunque existen modelos mucho más complejos que los aquí utilizados, se recomienda la aplicación de modelos que contengan información adaptada a las condiciones del país, como es el caso de los tipos de vegetación y clima de México, ya que, por un lado, sirven para corroborar los resultados con otros modelos y, por otro, se puede optimizar información de diversas fuentes nacionales que, a su vez, apoyarían el diseño de políticas propias en cuanto a medidas de adaptación y mitigación.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo brindado por la *Environmental Protection Agency* (EPA) de Estados Unidos, que por medio del INE (Instituto Nacional de Ecología) hicieron posible la realización del Estudio de País: México y al Instituto de Geografía de la UNAM por el soporte técnico y logístico ofrecido.

Referencias bibliográficas

- Bellón, M. R., O. Masera, and G. Segura, 1994, "Response Options for Sequestering Carbon in Mexico's Forests. Report to the F-7", en *International Network on Tropical Forestry and Global Climatic Change*, Energy and Environment Division, Lawrence-Berkeley Laboratory, Environmental Protection Agency, Berkeley, California, 27 pág.
- Bolin, B., Bo. R. Dôôs, J. Jager, and R. A. Warmick, (eds.), 1986, The greenhouse effect climatic change and ecosystems, Gran Bretaña, John Wiley & Sons.
- Conde, C., O. Sánchez, y C. Gay, 1995, "Escenarios básicos regionales", en *México ante el cambio climático. Primer Taller de Estudio de País: México ante el cambio climático*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 39-43.
- Emanuel, W. R., H. H. Shugart and M. P. Stevenson, 1985, "Climatic Change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes", en *Climatic Change*, Vol. 7, pp. 29-43.
- García, E., 1988, Modificaciones al sistema de clasificación climática

- de Köppen, México, Offset Larios, 217 p.
- García, E., 1989, Hoja IV.4.10, "Climas", *Atlas Nacional de México*, Vol. II, escala: 1:4,000 000, México, Instituto de Geografía, UNAM.
- ITC, 1992, The Integrated Land and Water Management Information System, Users Manual, Version 1.3, The Netherlands, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science, Enschede, p. 287.
- Kauppi, P., and Posch, M., 1985, "Sensitivity of boreal Forest to possible climatic warming", en *Climatic Change*, Vol. 7, pp. 45-54.
- Masera, O. R., Ordoñez, M. J. and Dirzo, R., 1992, "Carbon Emissions from Deforestation in Mexico: Current Situation and Long-term Scenarios", en W. Makundi and J. Sathaye (eds.), *Carbon Emissions and Sequestration in Forests: Case Studies from Seven Developing Countries*, Vol. IV, Mexico, Report No.LBL-32759, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory-US, Environmental Protection Agency, Berkeley, California.
- Markham, A., 1996, "Potential impacts of climate change on ecosystems: a review of implications for policymakers and conservation biologist", en *Climate Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 179-191, CR Special.
- Oropeza, O., Palacio-Aponte, A.G. y D´Luna-Fuentes, A., 1992, Hoja V.5.1. "Síntesis del medio ambiente", *Atlas Nacional de México*, Sección Medio Ambiente, Tomo II, escala 1:4 000 000, México, Instituto de Geografía, UNAM.
- Rzedowski, J., 1978, Vegetación de México, México, Ed. Limusa, 432 p.
- Rzedowski, J., 1992, Hoja IV.8.2. "Vegetación potencial", en *Atlas Nacional de México*, Sección Naturaleza, Tomo II, escala 1:4 000 000, México Instituto de Geografía, UNAM.
- Segura, G., 1992, "Deforestación y cambio climático", en *Memorias. Reunión anual del Programa Universitario de Medio Ambiente*, Vol 1, México, UNAM, pp. 6.
- Shugart, H.H., 1984, A Theory of Forest Dynamics. Springer-Verlag, Nueva York, N.Y.
- Smith, T.M., H. H. Shugart, G. B. Bonan, J. B. and Smith, 1992, "Modeling the Potential Response of Vegetation to Global Climate Change", advances in *Ecological Research*, 22, pp.13-113.

Capítulo V Zonas Costeras

REPERCUSIONES POR ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR EN EL LITORAL DEL GOLFO DE MÉXICO

Mario Arturo Ortiz Pérez* y Ana Patricia Méndez Linares*

Resumen

Si se considera el arreglo de la estructura fisiográfica y se identifican las características geomorfológicas del perfil longitudinal de la costa, se reconocen dos zonas: la de intermareas (infralitoral) como el escenario básico de impacto directo en las variaciones del nivel del mar, y una franja adyacente perimareal (supralitoral) que, por su disposición, constituye un área de amortiguamiento o de riesgo potencial al cambio climático. En ambos escenarios se llevó a cabo un inventario de la vegetación y uso de suelo con el objeto de conocer la composición y distribución de las áreas vulnerables al ascenso del nivel del mar. La identificación de uso de suelo se realizó mediante fotointerpretación con verificación de campo, los resultados se procesaron en un sistema de información geográfica.

A partir del análisis anterior se identificaron cinco zonas vulnerables o susceptibles a las variaciones del nivel medio del mar, en el Golfo de México y el Mar Caribe.

Palabras clave: Variaciones del nivel del mar, vulnerabilidad costera, cambio climático, humedales.

Introducción

Desde el punto de vista hidrológico, el Golfo de México es una provincia distributiva, integrada por un área sedimentaria del orden de 5.40×10^6 km²; es un sistema que contiene 159 890 km de ríos (entre los que

*Instituto de Geografía, UNAM.

sobresalen dos de los mayores sistemas deltaicos del mundo: el del río Mississippi, en Estados Unidos, y el de la cuenca del Grijalva-Usamacinta en México. Nuestro país posee 23 grandes sistemas lagunares-estuarinos; Tamaulipas tiene 41% de esta superficie estuarino-lagunar, Veracruz 19%; Tabasco 3% y Campeche 37% (Contreras, 1988; citado por Botello, *et al.*, 1992).

Estos sistemas estuarinos se han incorporado a cuatro de los más productivos ecosistemas tropicales conocidos: las marismas, los manglares, los pastos marinos y los arrecifes coralinos (Botello, 1992).

En épocas recientes se advierte que las modificaciones globales de las condiciones naturales pueden generar cambios severos en los diferentes tipos de ecosistemas (ITESM-Guaymas, 1993).

Una de las consecuencias esperadas por el aumento del nivel del mar es la pérdida de humedales (Titus, 1985 citado por Titus, 1987) el incremento del nivel de inundación en algunas áreas y el decremento en otras. Por otro lado con la pérdida de humedales se podría remover una importante barrera natural contra tormentas (Gagliano, *et al.* 1981; citado por Titus, 1987).

Por todo lo anterior, en este trabajo se consideraron de interés principal los humedales y usos de suelo ubicados en la costa atlántica de México. Se realizó un análisis de distribución a lo largo de las zonas infralitoral y supralitoral y se determinaron las áreas con mayor susceptibilidad a las variaciones del nivel del mar.

2. Antecedentes

Desde un punto de vista funcional, las zonas costeras representan áreas con estados físicos de alta energía en los cuales interactúan diversos procesos geofísicos, terrestres y oceánicos, que moldean de forma continua y permanente la geomorfología del borde continental y determinan a su vez, las propiedades biológicas, expresadas en la estructura y extensión espacial de los ecosistemas asociados (Pannier, 1992).

El cambio climático global en particular, puede generar en la Tierra cambios biogeográficos de gran importancia ecológica y socioeconómica. Un grupo de 29 expertos (*Task team on the Impact of Expected Climate Change on Mangroves*), designados por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental y Aspectos Marinos Relacionados (COMAR), conjuntamente con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) refieren las condiciones del cambio climático en el Golfo de México, con un aumento de 1.5°C en la temperatura y un incremento en el nivel del mar de 20 cm, para el año 2025 (Maul, 1993). Para algunos ecosistemas el aumento del nivel del mar y de la temperatura es muy importante, por ejemplo, los deltas y las playas son vulnerables al ascenso del nivel del mar, pero no al ascenso de la temperatura. En el caso de estuarios, humedales, lagunas y pastizales podrían ser afectados moderadamente por ambos fenómenos. Otros ecosistemas muy importantes como son los manglares y los arrecifes coralinos tienen una vulnerabilidad al cambio climático entre baja y moderada, *per se*, pero ambos experimentan la presión de las actividades antropogénicas como la deforestación, la sobrepesca, el turismo, etcétera (Pannier, 1992).

Pannier (1992) considera a los arrecifes coralinos, a los manglares, a las praderas de fanerógamas marinas, a las lagunas costeras, a la costa rocosa, a las playas y a la vegetación costera terrestre entre los ecosistemas que con mayor facilidad pueden afectarse por cambios globales.

El cambio climático no implica una elevación homogénea del nivel del mar. Durante los últimos 100 años, en todas las latitudes la elevación global del nivel medio del mar ha sido de +/- 15 cm; sin embargo, la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos ha predicho que el nivel del mar puede ascender a un máximo de 4.5 m en corto tiempo. Existe gran controversia al respecto, especialmente por las variaciones que ocurren en escala local (Maul, 1993).

Diversos factores controlan los cambios en el nivel medio del mar (Dawes, 1986):

- 1) Cambios en masas oceánicas, debidos al aporte por el derretimiento de hielo y de glaciares en regiones polares, en respuesta al calentamiento global.
- 2) Alteraciones en el volumen del océano como resultado de cambios en la temperatura.
- 3) Cambios en el campo gravitacional, debidos a la redistribución del hielo, agua y ajuste dentro del manto de la Tierra.
- 4) Modificaciones en las formas de las cuencas oceánicas.
- 5) Movimientos de la corteza terrestre.
- 6) Cambios en el espesor de los sedimentos costeros no consolidados, como resultado de la compactación, consolidación, sedimentación y erosión de sedimentos, así como extracción de aguas freáticas, petróleo y gas, de los sedimentos.
- 7) Alteraciones en el nivel de las mareas costeras, como consecuencia de cambios en los vientos locales y en la presión atmosférica.
- 8) Cambios en el régimen de descargas de ríos.
- 9) Variaciones en las corrientes oceánicas.

3. Método

Con el fin de determinar la vulnerabilidad de las costas, se regionalizaron el Golfo de México y el Mar Caribe; esta regionalización consistió en dividir convencionalmente al litoral en cinco amplias regiones, que corresponden de cierta manera a las condiciones naturales, porque desde el punto de vista climático, geomorfológico e hidrológico hay ciertas correspondencias.

Se identificaron las zonas infralitoral y supralitoral, con base en los criterios sugeridos por Davies (1980). No obstante, la delimitación de la zona supralitoral es un problema complejo de resolver debido a la falta de cartografía. Por ello, y de manera convencional, el área de riesgo potencial se delimitó definiendo a la zona en cuestión como una estrecha franja comprendida entre dos líneas imaginarias aproximadas: a) la línea de la altura media de las mareas altas; y b) la zona de inundación estacional o excepcional por marea de tormenta.

Una vez zonificadas las áreas costeras en dos franjas marginales, la infralitoral y la supralitoral, se efectuó el levantamiento de las áreas naturales y uso del suelo para la línea de costa del Golfo de México, a manera de inventario. Éste se realizó básicamente con fotografías aé-

reas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) que cubrieron toda la franja costera. Debido a la amplitud de la zona de estudio, las fotografías fueron de diversas escalas y con fechas de los años 80's.

En este estudio de gran visión, en la zona intermareal sólo se distinguieron las marismas cubiertas de manglar y a las marismas sin vegetación aparente (es decir, las planicies de inundación con pastos halófitos, ensalitradas o con blanquizales) y a los cuerpos lagunares, sin llegar a pormenorizar en la diversidad del gradiente ambiental.

Con el propósito de obtener la caracterización y la composición de los escenarios de vulnerabilidad para la zona supralitoral, se agruparon cinco clases de uso de suelo y vegetación (pantanos, pastizales, cultivos, campos de dunas y asentamientos humanos) y de esta forma se estimaron las áreas potencialmente afectables.

Las unidades fotointerpretadas fueron transferidas a una cartografía base, escala 1:50 000, se hizo uso del transferómetro y stereosketch, que después fue digitalizada en un sistema de información geográfica (ILWIS). Posteriormente se obtuvieron las áreas de las unidades resultantes y se llevó a cabo el análisis de la distribución espacial de los componentes naturales y uso de suelo.

Se proyectaron los niveles de 1 y 2 m, con el fin de conocer el arreglo de distribución espacial o la configuración tentativa, de las áreas de peligrosidad, y estimar cuáles son las localidades o tramos costeros de mayor fragilidad por dónde penetrará la inundación. Se generaron los modelos digitales de elevación, a partir del banco de datos altimétricos de INEGI, dispuestos en una malla o caneavá con bases equidistantes cada 90 metros. Conocida la altitud de estos puntos georeferenciados se procedió a la interpolación de los valores y se obtuvo el modelo del terreno aproximado, con curvas de nivel a cada metro.

4. Resultados

La regionalización obtenida a partir de las características climáticas, geomorfológicas (Ortiz, P. y L. M. Espinosa, 1991) e hidrológicas de la zona costera del Golfo de México y del Mar Caribe se observa en la figura 1.

Los resultados de este trabajo se expresan en los cuadros 1 y 2. En ellos se observa la distribución de los componentes naturales y de uso del suelo para las zonas intermareal y supralitoral, a lo largo de la costa del Golfo de México y del Mar Caribe.

En el cuadro 1 se observa que las áreas de manglar alcanzan 38% de la superficie total de la costa, con respecto al resto de los componentes. De este total, 15% se concentra en la porción centro-sur del Golfo de México (fig. 2); comprende a los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche. Ahí las características climáticas son óptimas dentro del contexto general, para el desarrollo de estos ecosistemas. Además, como ya se mencionó, la zona recibe un gran aporte de escurrimientos y, por lo tanto, de nutrientes debido a que encierra a los principales sistemas deltaicos.

En orden de menor importancia se ubica el litoral oriental y el litoral del Mar Caribe; se advierte una disminución relativa en los manglares, esto se explica por las condiciones climáticas que cambian gradualmente a climas menos húmedos.

Las marismas con halófitas constituidas por los géneros de *Spartina*, *Salicornia*, *Suaeda*, etcétera (Rzedowski, 1978) se extienden en un área de 2 460 km², superficie equivalente a 20% con respecto al total; incluye las áreas de manglar y de lagunas correspondientes a la zona infralitoral. De ese 20% la mitad se localiza en el litoral centro-sur, decrece hacia los extremos, tanto hacia el litoral norte como al litoral sur de la costa, esta disminución se acentúa todavía más en el Mar Caribe hasta un rango menor de 0.6%, debido al carácter climático de mayor humedad.

Cuadro 1. Áreas estimadas para la vegetación y uso del suelo ubicadas en la zona infralitoral, considerada como el escenario de impacto directo ante las variaciones del nivel del mar.

ÁREAS TOTALES (Km ²) PARA LA ZONA INFRA LITORAL (Intermareal)						
	MARISMA CON MANGLAR		MARISMA CON HALÓFITAS		LAGUNAS	
		%		%		%
Litoral Nor-Occidental (Tamaulipas)	50	0.4	481	3.9	1797	14.6
Litoral Centro-Occidental (Veracruz)	401	3.3	207	1.7	688	5.6
Litoral Centro-Sur (Ver, Tab. y Camp.)	1891	15.4	1168	9.5	1430	11.6
Litoral Oriental (Campeche y Yucatán)	1293	10.5	531	4.3	351	2.9
Litoral Caribe (Q. Roo)	1050	0.6	72	7.2	886	7.6
Total	4685	38.1	2456	20.0	5152	41.9

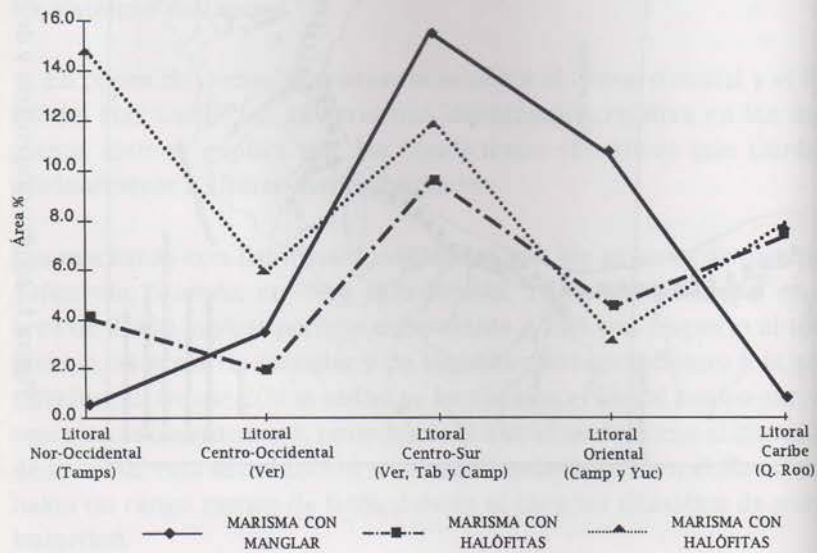


Figura 2. Distribución de los componentes naturales de la franja intermareal en la línea del Golfo de México y del Mar Caribe.

El componente lagunar se extiende por 5 152 km² equivalente a 42% de la superficie total; cabe señalar que si bien 15% se concentra en el litoral nor-occidental (Laguna Madre), se estima que representa un sistema con factores físicos limitantes, si se compara con el complejo deltaico tabasqueño y el sistema fluvial Usumacinta, correspondientes al litoral centro-sur.

En la zona supralitoral (cuadro 2 y fig. 3) se distingue la proporción de la vegetación de pantanos y pastizales 37.5 y 32.8%, es decir, 70% del área total; del porcentaje restante, 25% corresponde a campos agrícolas y 5% a campos de dunas y asentamientos urbanos. De total de pantanos, 17% se ubica en el litoral del Mar Caribe y 12% en el centro-sur. 15% de los pastizales se concentran hacia el litoral centro-sur. En muchas ocasiones, estas comunidades se asocian, ya que el tular y el popal crecen en superficies pantanosas o bien en agua dulce permanentemente estancada, de 0.5 a 1.5 m de profundidad en la planicie costera de Tabasco y al sur de Veracruz y Campeche. En una buena parte de Tabasco y en algunas áreas adyacentes constituye la vegetación más difundida y característica, ya que se trata de llanuras aluviales, prácticamente sin declive, atravesadas por caudalosos ríos cuyos cauces están topográficamente por arriba de las llanuras de inundación. Estas áreas de pantano también tienen alto desarrollo hacia el litoral del Mar Caribe, donde cubren casi una quinta parte del área total, con respecto a las demás comunidades de vegetación.

Otras áreas en riesgo potencial son las zonas agrícolas, mismas que pueden ser afectadas por altas concentraciones salinas, se ubican en las áreas más extensas del litoral centro-occidental y centro-sur. Asimismo, en la zona centro-occidental y oriental, los campos de dunas adyacentes se encuentran en mayor proporción con respecto a toda la costa; amortiguan con ello el peligro de inundación. Otro uso de suelo importante lo constituyen los asentamientos urbanos sobre las zonas costeras, es mayor la afectación hacia el litoral centro-occidental siguiendo en orden de importancia el litoral oriental y del Mar Caribe.

Cuadro 2. Áreas estimadas para la vegetación y uso del suelo ubicadas en la zona supralitoral, considerada como área de amortiguamiento o riesgo potencial ante los impactos causados por las variaciones del nivel del mar.

ÁREAS TOTALES (Km ²) PARA LA ZONA SUPRALITORAL (Amortiguamiento o riesgo potencial)										
	PANTANOS		PASTIZALES		AGRICULTURA		CAMPOS DE DUNAS		ASENTAMIENTOS URBANOS	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Litoral Nor-Occidental (Tamaulipas)	57	0.3	361	2.2	41.02	0.2	84	0.5	6.12	0.0
Litoral Centro-Occidental (Veracruz)	739	4.5	1134	6.9	1486	9.0	255	1.5	77	0.5
Litoral Centro-Sur (Ver, Tab. y Camp.)	2101	12.7	2577	15.6	1543	9.3	31	0.2	14	0.1
Litoral Oriental (Campeche y Yucatán)	482	2.9	1217	7.4	987	6.0	216	1.3	37	0.2
Litoral Caribe (Q. Roo)	1050	17.1	132	0.8	83	0.5	22	0.1	36	0.2
Total	6215	37.5	5421	32.8	4140	25	608.1	3.7	170.47	1.0
Total	6215	37.5	5421	32.8	4140	25	608.1	3.7	170.47	1.0

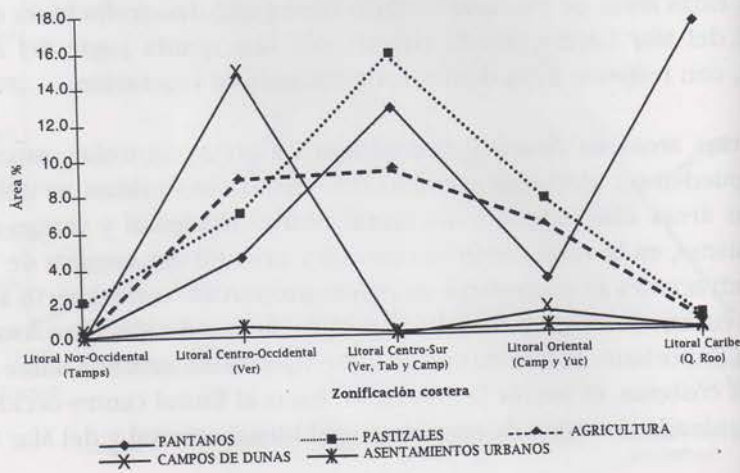


Figura 3. Distribución de los componentes naturales de la franja supralitoral o escenario de riesgo potencial en la línea del Golfo de México y del Mar Caribe.

Con estos elementos de análisis y los modelos resultantes de elevación del terreno, se detectaron cinco regiones críticas o vulnerables (fig. 4). Tres se relacionan con las cuencas geológicas marginales de los grandes sistemas deltaicos de los ríos Bravo o Grande, Papaloapan y el complejo deltaico del Grijalva-Mexcalapa-Usumacinta; en todos hay claras evidencias de hundimiento en la costa por subsidencia de las cuencas. Las otras dos áreas se sitúan en la península de Yucatán, corresponden a plataformas calcáreas con problemas estructurales de tectónica de hundimiento, asociadas con disolución cárstica y de comportamiento geohidrológico.

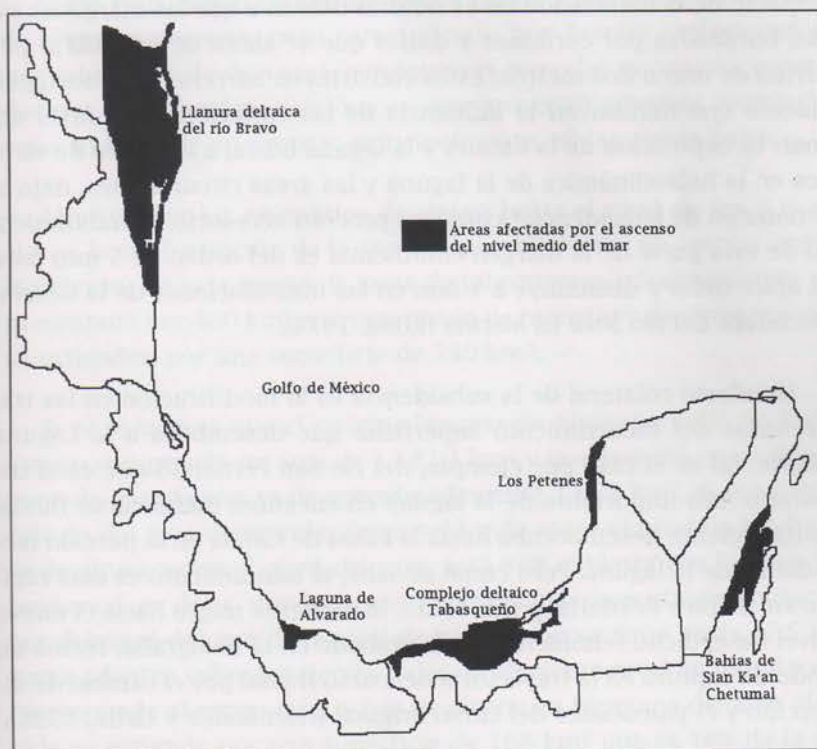


Figura 4. Localización de las cinco zonas susceptibles o vulnerables al ascenso o descenso del nivel medio del mar.

4.1 Llanura Deltaica del río Bravo

Entre los fenómenos o procesos naturales sobresalientes que impactan esta zona costera se distinguen los que ocurren en el amplio sistema lagunar de la Laguna Madre que se extiende más de 200 km de largo. Sobre la superficie del embalse, la marea de viento es de tal importancia que sobre-eleva el nivel del agua entre los 0.30 y 1.20 m, en el sector sur de la laguna, cuando predominan los vientos del norte y, por lo tanto, se abate el tirante de agua en el sector septentrional a menos de 0.80 m. Con vientos del sur-sureste las condiciones se invierten, llegan a abatirse alrededor de 1.00 m en el sector sur y se elevan 0.60 m en la porción septentrional (CIFSA, 1967). Sin embargo, el impacto de la inundación no es notorio debido a que las márgenes están bordeadas por cordones y dunas que se alzan de inmediato por arriba de uno o dos metros; éstas constituyen barreras de amortiguamiento que minimizan la influencia de las variaciones del nivel del mar. La exposición de la llanura y la laguna litoral a la marea de vientos en la hidrodinámica de la laguna y las áreas circundantes, deja al fenómeno de subsidencia¹ como un proceso accesorio. El hundimiento de esta parte de la margen continental es del orden de 5 mm para el ápice delta y disminuye a 1 mm en las inmediaciones de la desembocadura del río Soto La Marina (Rona, 1974).

Un efecto colateral de la subsidencia es la modificación en las trayectorias del escurrimiento superficial que desemboca a la Laguna Madre, tal es el caso por ejemplo, del río San Fernando que es el tributario más importante de la laguna en cuestión; dicho curso fluvial antiguamente desembocaba hacia la Bahía de Catán, en la porción meridional de la laguna. Pero como se sabe, el hundimiento es más rápido en el ápice del delta, por lo tanto, la corriente migró hacia el nuevo nivel base, dicho fenómeno queda grabado en la fisiografía, forma un codo de captura en la trayectoria del curso fluvial por el cambio de dirección y el paleocauce del curso original (Hernández y Ortiz, 1995).

¹El fenómeno de subsidencia en cuencas geológicas marginales deltas tiene un comportamiento análogo a los efectos del ascenso del nivel del mar. Sin embargo, la velocidad de hundimiento no es constante y regular para toda la cuenca, debido al diferente espesor de la columna de sedimentos en el arreglo de distribución de los sedimentos acumulados. El hundimiento diferencial se refleja en la expresión superficial de las tierras bajas y en las características de distribución que adquiere la zona comprendida entre la planicie de intermareas (infralitoral) y la zona perimareal (supralitoral), es decir, la franja comprendida por la ruptura de pendiente de la playa que se toma como el límite del nivel medio de las pleamares y los dos metros que representa a la zona potencial de afectación.

4.2 Laguna de Alvarado y curso bajo del río Papaloapan, Veracruz

La región del curso bajo del río Papaloapan, constituye una zona de mayor fragilidad y riesgo potencial del litoral centro-occidental del Golfo. Se expresa en el relieve como una planicie fluvio-deltaica cuyos brazos deltaicos distributarios emergen sobre el nivel de tierras bajas de inundación y de pantanos de inundación permanente. Desde el punto de vista geológico, consiste en una cuenca geológica marginal con un espesor de sedimentos del orden de 700 m (Lozano, 1995); procesos de hundimientos sucesivos durante el Cenozoico y eventos de transgresiones marinas y de cobertura continental (Viniegra, 1992).

El río Papaloapan es uno de los de mayor escurrimiento del país, de régimen perenne, pero caracterizado por fuertes variaciones en sus volúmenes de descarga, con intensas avenidas de verano, generadas por perturbaciones ciclónicas, que provocan extensas inundaciones a lo largo de su cauce y, principalmente, en las zonas bajas.

Al proyectar los escenarios de riesgo hasta el nivel de los 2 m de altura, la configuración de la zona vulnerable forma un amplio embalamiento. De esta forma, la zona de intermareas infralitoral está representada por 400 km² con vegetación de manglar y de pantanos que se extienden por una superficie de 740 km².

Si se considera que el sistema lagunar de Alvarado y del río Papaloapan comprende un área de 1 183.3 km² y la extensión que cubre la zona de inundación es de aproximadamente 1 074 km², al obtener el cálculo del área de inundación, establecida entre el nivel de los 0 y 1 m de altura sobre el nivel del mar, está 84% cubierta por la zona intermareal, es decir, donde tienen lugar las más importantes variaciones del nivel del mar. Este nivel de inundación se sitúa hasta 47.5 km tierra adentro sobre las tierras bajas. El siguiente nivel de inundación corresponde al rango de 1 a 2 m de altura; en términos del área afectada se extiende por una superficie de 168 km² que es 16% de la superficie total.

4.3 Complejo deltaico Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta, Tabasco

El complejo deltaico Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta aporta, en promedio, una descarga de 87 millones de metros cúbicos por año, volumen que transita y alimenta los ecosistemas de extensos humedales y aguas costeras que representan cerca de 30% del escurrimiento total del país; es así el sistema deltaico más importante de Mesoamérica (Chávez, 1988).

Por la magnitud de la extensión y por las consecuencias y cambios en los sistemas naturales sobresale como el área de mayor susceptibilidad. Al igual que el caso anterior, este complejo deltaico está sujeto a una subsidencia, con la particularidad de tener hundimientos diferenciales, debido a las distintas velocidades de descenso, contrastes que son impartidos por las estructuras mayores del subsuelo como las fallas geológicas que originan depresiones y pilares entre los cuales hay desplazamientos activos muy recientes, pues tienen expresión superficial y controlan estructuralmente la red hidrográfica de las llanuras fluviales (Ortiz, 1992).

De esta manera, en las fosas o depresiones donde hay una mayor velocidad de descenso, se establece una analogía semejante a la de un ascenso del nivel del mar, hecho que se traduce en una mayor erosión de la playa y su consecuente retroceso de la línea de costa hacia el continente (Ortiz 1992, 1994, 1988; Ortiz, P. y J. Benítez, 1996).

La zona comprendida entre 0 y 2 m de elevación sobre el nivel del mar tiene una extensión aproximada de 5 000 km², de los cuales 60% representa la zona infralitoral y 40% corresponde a la supralitoral.

En la zona de la Laguna de Términos, una de las entrantes de mayor longitud, en el nivel de entre 0 y 1 m es de 20 km. En la zona del río Usumacinta el nivel de inundación de entre 0 y 1 m alcanza hasta 55 km y se proyecta el siguiente nivel hasta 62 km tierra adentro. En el área que corresponde al río Grijalva la extensión del primer nivel de inundación es de aproximadamente 25 km, el segundo es de 32 km.

En el punto donde se ubica la Laguna Machona los niveles de inundación disminuyen, es así para el rango establecido entre 0 y 1 m de 6 km y para el rango de 1 a 2 m es de 8 km; en promedio se tienen diferentes niveles de inundación en diversos puntos del complejo Grijalva-Usumacinta, lo cual es un reflejo o manifestación de la irregularidad del terreno de las diferentes entrantes del mar.

4.4 Los Petenes, Campeche

La región de los Petenes, enclavada en la costa norte de Campeche, es una planicie de inundación que se extiende con anchura media de 15 km y con una dirección generalizada norte-sur.

El área en estudio está ocupada por ciénagas y marismas de una amplia diversidad florística. Estas zonas se caracterizan por la presencia de una planicie con poca pendiente y constituyen un nivel de transición en la interfase tierra/mar, nivel sobre el cual se presentan innumerables surgencias o manantiales ("petenes") de acuífero someros o subsuperficiales, marcando condiciones palustres que derivan gradualmente a fases salinas en las marismas adyacentes a la costa.

Los componentes naturales de la franja costera se estructuran con un arreglo de franjas paralelas a la línea de costa, motivadas por la presencia del manglar de franja costera, dispuesta directamente a las aguas marinas sin la presencia de una playa. Estos componentes indican, por un lado, la baja energía física del ambiente y, por otro, el papel geomorfológico del manglar para retener sedimentos y hojarasca de la biomasa del propio mangle. Este proceso contribuye a elevar las riberas de la costa y de los esteros, forma bordos bajos perimetrales o marginales que causan represamiento del agua y originan deficiencias de drenaje que se traducen en cuencas de evaporación o blanquiales típicas de la planicie externa. Gradualmente, hacia el interior de la llanura se identifica a la marisma ensalitrada con parches de manglar que es sustituida por una asociación mixta de manglar y tular con petenes intercalados, en el sector septentrional. Para la porción meridional, con características climáticas de mayor humedad, se observan manchas más extensas de manglar y petenes de extensión más amplia, en contacto con selvas medianas subcaducifolias.

Las características, en su conjunto, dan lugar a un complejo de humedales único por la distribución de estructura espacial y sumamente frágil desde el punto de vista de la vulnerabilidad por variaciones del nivel del mar.

De acuerdo con el emplazamiento geológico, constituye la zona de mayor hundimiento de toda una serie de planicies estructurales o bloques tectónicos escalonados de baja altura que parten del centro-sur de la península de Yucatán, y caen hacia la periferia en el litoral. Es difícil constatar si persiste aún la subsidencia, pero si ése fuese el caso, el proceso de hundimiento se contrarrestaría con el aporte continuo de sedimentos de deriva costera, provenientes de la costa de Yucatán, y que se manifiestan claramente en los ganchos de barra formados en la isla de Celestún y la Isla Arena con un aumento en la línea de costa hacia el mar. Esta sedimentación se contempla como un proceso a largo plazo, en términos de tiempo geológico; sin embargo, hay que recordar que gracias a este marco geológico-tectónico tiene las condiciones de ambiente mixto costero que dan lugar a una reserva muy importante de humedales.

La región de los Petenes, alcanza extensas áreas de inundación. En este sentido, la configuración de las entrantes de inundación se comportan de la siguiente manera: de 0 a 1 msnm, alcanza una penetración tierra adentro de aproximadamente 16 km de longitud con una área de inundación aproximada a los 520 km². El nivel correspondiente entre 1 y 2 m alcanza hasta 19 km de penetración salina con una área de 200 km².

4.5 Bahías de Sian Ka'an-Chetumal, Quintana Roo

Sian Ka'an constituye un humedal importante que se localiza en la costa del Caribe en el extremo suroriental de la península de Yucatán, en el Estado de Quintana Roo; comprende 528 000 ha, de las cuales 120 000 son marinas (SEDUE, 1987). Esta zona es considerada como Reserva de la Biosfera (SEDUE, 1987). Tectónicamente son fosas en proceso de hundimiento, constituidas de sedimentos calcáreos de origen marino.

Se ubica en un área poco elevada sobre el nivel del mar, por lo cual los pequeños cambios topográficos tienen mucha importancia en la configuración del paisaje. En las partes bajas hay pantanos, mientras que los lugares más elevados están cubiertos de selvas. Variaciones edáficas y, sobre todo, topográficas en un área tan plana y tan baja ocasionan diferencias en los periodos de inundación, y la interacción de estos factores con la salinidad determinan, en gran medida, el tipo de vegetación que se establece en cada sitio (Olmsted y Durán, 1986).

El hundimiento de las fosas da lugar a un comportamiento transgresivo del espacio litoral, toda vez que el proceso es análogo a los efectos del ascenso del nivel del mar y permite una migración del ambiente costero hacia el interior de la porción continental, origina con ello un gradiente ambiental de las hidros series que varía principalmente de unidades de manglar y marismas de inundación marginal (pantanos y selvas bajas inundables).

La extensión de las áreas de inundación, comprendida en la porción meridional de Sian Ka'an y para los niveles establecidos entre los 0 y 2 m de altura sobre el nivel del mar, se manifiestan de la siguiente manera: el primer nivel es considerado dentro de la zona intermareal y es ahí donde tienen lugar las más importantes variaciones del nivel del mar. Para el área en estudio su importancia es tal que ocupa 97%, representado por casi 585 km². Este nivel de inundación se sitúa bordeando la bahía a través de una franja de unos 500 m de anchura aproximadamente, aunque puntualmente en los esteros llega a alcanzar hasta 32 km tierras adentro. Esta zona es la de más alta peligrosidad o de alto riesgo, ya que representa a la franja directamente afectada por la sobre-elevación de las mareas de tormenta, además de constituir porciones de las áreas deprimidas en las cuales reconoce el escurrimiento superficial y subsuperficial. El siguiente nivel de inundación corresponde al rango de 1 a 2 m de altura. La gran amplitud del área evaluada como peligrosa o de alto riesgo, sobresale de una manera absoluta, atributo al que se debe agregar el arreglo de la distribución espacial, pues el avance marino se lleva a cabo esencialmente a lo largo de la depresión limitada por fallas geológicas, por las cuales reconoce la cuña de penetración marina que llega a alcanzar hasta 29 km tierra adentro.

5. Conclusiones

Por primera vez se hace un inventario de los componentes naturales y del uso de suelo de forma sistemática para toda la línea de la costa Atlántica del Golfo de México, basado en un reconocimiento cartográfico escala 1:50 000.

El aporte fundamental es el conocimiento de la distribución espacial de los componentes naturales y de uso de suelo para la zona infralitoral y supralitoral de la costa; se determina de este modo, la magnitud aproximada de las áreas que se consideran como vulnerables o de amortiguamiento a los efectos del ascenso del nivel del mar. Se reúne esta información en un banco de datos, utilizando un sistema de información geográfica.

Estos elementos de análisis en su conjunto representan la estructura básica de datos, que determinan a la zona centro-sur como área de mayor peligro a las variaciones del nivel del mar, en ellas hay grandes extensiones de marismas con manglar y halófitas. De la misma forma se identifican y delimitan las áreas de riesgo potencial en pastizales, pantanos y zonas agrícolas.

Las zonas sujetas a inundación con la sobre-elevación del nivel del mar por mareas de tormenta, indican que la penetración de la cuña marina se llevaría a cabo con una distribución no uniforme y de manera muy irregular, a lo largo de amplios tramos de la costa.

En las zonas de mayor vulnerabilidad, la influencia marina se siente a 40 y hasta 50 km tierra adentro, por ejemplo, el caso del río Mezcalapa-Usumacinta y humedales de Centla, Tabasco.

Desde el punto de vista técnico, se considera que el uso de los modelos de terreno son una herramienta de utilidad para extrapolar patrones de relieve en zonas donde no existen mapas con curvas de nivel a equidistancias tan cortas y de altura pequeña.

En el presente trabajo, desde el punto de vista metodológico se requiere mejorar las estimaciones y medidas. Se considera que la escala fue la adecuada en este enfoque de tipo regional.

Deberá actualizarse la base de datos con fechas de años recientes, con objeto de contar con una referencia para comparar los cambios y las modificaciones del uso de suelo y conocer la magnitud de los impactos.

Referencias bibliográficas

- Botello, A., G. Ponce, A. Toledo, G. Díaz y S. Villanueva, 1992, "Ecología recursos costeros y contaminación en el Golfo de México", en *Ciencia y Desarrollo*, Vol. XVII, (102), pp. 28-48.
- CIFSA, 1967, Estudio regional de la laguna Madre de Tamaulipas. Estudio preliminar para la rehabilitación de la laguna Madre de Tamaulipas, México, 458 p.
- Chávez, L., 1988, Ecología y conservación del delta de los ríos Usamacinta-Grijalva, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, División Regional Tabasco y Gobierno del Estado de Tabasco, 720 p.
- Davies, J. L., 1980, Geographical Variation in Coastal Development, (ed.) K. M. Clayton, Logman, 2nd edition.
- Dawes, C., 1986, Botánica Marina, México, Limusa.
- Hernández, L. y P. Ortiz, 1995, "Evidencias geomorfológicas de subsidencia en el sistema deltaico del río Grande, Tamaulipas, México, utilizando percepción remota" en *Memorias. SELPER VII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota*, México, pp. 243-246.
- ITEMS-Guaymas, CECARENA, 1993, *Memorias del Taller para el manejo de humedales costeros en el noroeste de México*, 7 al 11 de diciembre de 1993, p. 8.
- Lozano, R. F., 1955, "Bosquejo geológico de la provincia del Papaloapan. Estado de Veracruz. México", en *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, Vol. VII, No. 1-2.
- Maul, G. A., 1993, Climatic Change in the Intra-Americas Sea, UNEP, Gran Bretaña, 389 pp.
- Olmsted, I. y R. Durán, 1986, "Aspectos ecológicos de la selva baja inundable de la reserva Sian Ka'an, Quintana Roo, México", en *Biótica*, Vol. 11, Núm. 3, pp. 151-179.
- Ortiz, P., 1994, "Repercusiones del ascenso del nivel del mar en costas bajas de planicies deltaicas", en *Geografía y Desarrollo*, Num 11, Vol 2, pp 69-72.

- Ortiz, P., 1988, "Evidencias de cambios geomorfológicos del sistema litoral mediante el análisis de imágenes aéreas", en *Memorias. Ecología y Conservación del Delta de los Ríos Usumacinta y Grijalva*, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, División Regional Tabasco y Gobierno del Estado de Tabasco, pp. 43-54.
- Ortiz, P., 1992, "Retrosceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche-Tabasco", en *Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de Geografía*, Núm. 25, pp. 7-23.
- Ortiz, P. y J. Benítez, 1996, "Elementos Teóricos para el Entendimiento de los Problemas de Impacto Ambiental en Planicies Deltaicas: la región de Tabasco y Campeche", en *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*, Botello, A. V., J. L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lomelí (Eds.), EPOMEX, Serie Científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 483-503.
- Ortiz, P. y L. M. Espinosa, 1991, "Una clasificación geomorfológica de las costas de México", en *Geografía y Desarrollo*, Vol. 2, Núm. 6, pp. 2-9.
- Pannier, F., 1992, "El ecosistema de manglar como indicador de cambios globales en la zona costera tropical", en *Ciencia*, Número especial 43, pp. 111-113.
- Rona, P. A., 1974, "Subsidence of Atlantic Continental Margins" in *Tectonophysics*, No. 22, pp. 283-299.
- Rzedowski, J., 1978, *Vegetación de México*, México, Limusa, 432 pp.
- SEDUE, 1987, *Plan de manejo de la reserva de la biosfera Sian Ka'an*, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México, 140 p.
- Titus, J., 1987, *Sea level rise and wetland loss: an overview. In greenhouse effect sea level rise and coastal wetlands*, EPA (Environmental Protection Agency), United States, 35 p.
- Viniegra, O., 1992, *Geología histórica de México*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 218 p.

Capítulo VI Agricultura

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS POTENCIALMENTE APTAS PARA MAÍZ DE TEMPORAL EN MÉXICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

Margarita Flores*, Raquel Araujo* y Edith Betancourt.*

Resumen

En este artículo se presentan los resultados finales del estudio Vulnerabilidad de la agricultura ante el cambio climático, que forma parte del Estudio de País: México, para el cual se generaron siete escenarios climáticos, uno actual, dos con los modelos de circulación general *Geophysical Fluid Dynamic Laboratory* (GFDL-R30) y *Canadian Climate Center* (CCC) y cuatro de sensibilidad; se determinó para cada uno de ellos, la vulnerabilidad de la práctica del cultivo de maíz de temporal ante el cambio climático y las zonas potencialmente aptas para este cultivo.

En cada escenario climático se identificaron las zonas aptas, medianamente aptas y no aptas para el cultivo de maíz, así como su superficie en kilómetros cuadrados.

Finalmente, la construcción de los Mapas de vulnerabilidad al cambio climático permite identificar las áreas en las que se modificaría su aptitud ante el cambio climático. Esto se realizó al comparar el escenario actual con los de cambio, de tal manera que las zonas que tuvieron un cambio positivo, es decir, que aumentó su aptitud, tienen una vulnerabilidad nula, mientras que aquellas que tuvieron un cambio negativo fueron consideradas las más vulnerables.

Palabras clave: Agricultura de temporal, aptitud agroclimática, cambio climático.

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

1. Introducción

La producción agrícola en México, como lo señalan Liverman y Apendinni (1994), cada año se ve amenazada por la sequía en alguna parte del país; esto obedece a que 85% de la superficie corresponde a las zonas áridas y semiáridas que se caracterizan por la baja y variable precipitación. Además, a estas condiciones de climas secos se agrega la limitante topográfica, lo cual hace que la zona con capacidad agrícola sea apenas de 16%.

La presencia de la sequía sitúa actualmente a la agricultura de temporal como altamente vulnerable a la variabilidad climática. Esto cobra particular importancia por la gran superficie destinada a los cultivos de temporal, como el maíz.

En 1994, el INEGI (1995) reportó que prácticamente todo el país fue afectado por la sequía, de tal manera que de las 186 000 hectáreas siniestradas (reportadas ese año), la mayor parte se debió a este fenómeno, seguido por inundaciones y granizadas. Los estados más afectados fueron: Quintana Roo (55 942 ha), Chihuahua (38 419 ha), Puebla (34 283 ha), Veracruz (17 743 ha) y Jalisco (15 439 ha), los cultivos más afectados fueron maíz, frijol y trigo.

En general, los estudios sobre cambio climático hasta el momento predicen aumentos de la temperatura y disminución de la precipitación por el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, situación que afectaría notablemente a la agricultura de temporal en México.

La producción de maíz ha sido tradicionalmente muy importante porque constituye la base de la alimentación y, aun cuando ha estado sujeta a las políticas de precios de garantía y al desplazamiento por cultivos más rentables, el simple hecho de verse afectada por un cambio de clima con las magnitudes que los modelos predicen, ocasionaría graves problemas sociales y económicos.

Cabe recordar que una gran proporción de la población, independientemente del proceso creciente de urbanización, depende de la producción de maíz de temporal para subsistir. Además, en el aspecto económico, el país destina importantes recursos a la compra de maíz en el exterior.

Actualmente, se cultiva maíz prácticamente en todos los municipios del país, con rendimientos bajos, menores a tres toneladas por hectárea (Liverman, 1995), que no satisfacen la demanda interna.

Como se ha mencionado, el cultivo de maíz de temporal tiene una gran vulnerabilidad a la variabilidad climática bajo las condiciones ambientales actuales, por lo que es de suponer que de presentarse un eventual cambio climático, esta actividad será una de las más afectadas.

En este trabajo se ofrecen los resultados de la vulnerabilidad de la agricultura, a partir de la zonificación de las áreas potencialmente aptas para el cultivo de maíz, considerando fundamentalmente el clima.

2. Aspectos teóricos y metodológicos

2.1. Límites de tolerancia climática para el maíz

El modelo conceptual en el que sustentamos este trabajo obedece a la Amplitud de los Límites de Tolerancia, señalado por Wilsie desde 1956. De acuerdo con este principio, las plantas tienen un rango de valores óptimos de crecimiento. Cuando estos valores empiezan a disminuir o a sobrepasarse, se provoca un decremento en el desarrollo de las plantas que en ocasiones llegan a morir (cuadro 1).

Cuadro. 1 Amplitud de los límites de tolerancia.

LÍMITE MÍNIMO DE DISTRIBUCIÓN	OSCILACIÓN DEL VALOR ÓPTIMO O CENTRO DE DISTRIBUCIÓN	LÍMITE MÁXIMO DE DISTRIBUCIÓN
AUSENTE		AUSENTE
DISMINUCIÓN		DISMINUCIÓN
	ESCALA PARA CUALQUIER FACTOR	

Fuente: Wilsie, 1956

A lo largo de su desarrollo fenológico, el maíz requiere diferentes condiciones de temperatura y humedad. Para fines de este trabajo se consideraron cinco subperiodos fenológicos para el maíz: germinación, crecimiento vegetativo, floración, formación de fruto y madurez.

2.2. Requerimientos o tolerancia de temperatura para el maíz

El maíz tiene tres valores: óptimo, mínimo y máximo, éstos no son homogéneos sino que fluctúan según el subperiodo fenológico. Los requerimientos óptimos de temperatura son de 20 a 30°C, exceptuando el periodo de germinación, que es de 20 a 25°C. Los valores mínimos fluctúan entre 10 y 20°C y los máximos entre 30 y 40°C (cuadro 2).

Cuadro 2. Requerimiento de temperatura en el ciclo fenológico del maíz.

Subperiodos fenológicos	Requerimientos térmicos (grados centígrados)		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
1o. Germinación	10	20 a 25	40
2o. Crecimiento vegetativo	15	20 a 30	40
3o. Floración	20	20 a 30	30
4o. Formación de fruto: estado lechoso y masoso	20	20 a 30	30
5o. Madurez	20	20 a 30	30

Fuente: Centro de Investigación Agrícola. Morelia, Mich. INIA, SARH, 1983

2.3. Requerimientos o tolerancia de precipitación para el maíz

Los requerimientos de precipitación para el maíz en todo su ciclo de desarrollo fluctúan entre 500 y 1000 milímetros. En la etapa de germinación es cuando el maíz requiere la menor cantidad de lluvia, tan sólo 45 milímetros, pero sus necesidades hídricas aumentan, sobre todo en la etapa de floración, que es cuando demanda 220 milímetros y 215 en la etapa de formación de fruto, mientras que para madurar le bastan 90, según se aprecia en el cuadro 3.

Cuadro 3. Requerimiento de precipitación en el ciclo fenológico del maíz.

Subperiodos Fenológicos	Requerimientos hídricos (milímetros)		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
Total ciclo vegetativo	400 - 500	500- 1000	> 1000
1o. Germinación	-	45	-
2o. Crecimiento vegetativo	-	170	-
3o. Floración	-	220	-
4o. Formación de fruto: estado lechoso y masoso	-	215	-
5o. Madurez	-	90	-

Fuente: SEP 1983.

2.4. Metodología

2.4.1. Selección de variables

Para caracterizar las zonas potencialmente aptas para el cultivo del maíz se construyó, en primera instancia, el escenario climático base o actual, tomando en cuenta temperatura y precipitación y, por tratarse de la agricultura de temporal, nuestro escenario consideró exclusivamente los valores de mayo a octubre.

Los valores examinados en el caso de la temperatura fueron las medias mensuales, la máxima y mínima promedio y la máxima y mínima extrema y, en el caso de la precipitación, la media mensual.

2.4.2 Selección de estaciones meteorológicas

Se seleccionaron originalmente 162 estaciones meteorológicas, uniformemente repartidas en el país. Sin embargo, no todas presentaron datos de las cinco variables seleccionadas de 1950 a 1980. Las estaciones que cumplieron con esta condición fueron 83 para temperatura y 95 para precipitación. Con esta base de datos se generaron resultados preliminares, pero la red de estaciones utilizada no era suficiente y daba lugar a espacios sin información acerca de la aptitud para el cultivo de maíz.

Por ello, se amplió la base de datos y se incluyó la base Douglas (<http://hurricane.ncdc.noaa.gov>), que consiste en una base de datos de estaciones seleccionadas con criterios homogéneos, independientemente de la continuidad de los registros en el tiempo.

De esta forma se incrementaron de 83 a 158 estaciones para temperatura y, en el caso de la precipitación, aumentaron de 95 a 171; con esto se logró una cobertura de estaciones más homogénea.

Los datos de las variables meteorológicas seleccionadas fueron obtenidos del programa CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional y de la base Douglas.

2.4.3. Definición de escenarios

Con los datos de las estaciones se generó el escenario base o actual y con los modelos proporcionados por la línea de escenarios el GFDL-

R30 y el CCC se construyeron dos escenarios de cambio (Magaña, *et al.*, 1997). Posteriormente se crearon cuatro escenarios de sensibilidad:

1. Más dos grados centígrados y más 20% de precipitación.
2. Más dos grados centígrados y menos 20% de precipitación.
3. Más cuatro grados centígrados y más 20% de precipitación.
4. Más cuatro grados centígrados y menos 20% de precipitación.

2.4.4. Aplicación de los modelos GFDL-R30 y CCC

En el caso de estos modelos, fue necesario obtener los incrementos de temperatura y precipitación a partir de los modelos de cambio y sumarlos a los datos con los que se construyó el escenario base.

2.4.5. Generación de mapas de isotermas e isoyetas, insumos para la definición de áreas de aptitud de los cultivos.

Con la base de datos y mediante interpolación, utilizando el paquete SURFER, se obtuvieron los mapas de isotermas e isoyetas. Los mapas generados fueron integrados a un Sistema de Información Geográfica (SPANS) que facilitó el manejo de la información cartográfica.

2.4.6. Generación de mapas de aptitud

Se generaron siete mapas con las áreas potencialmente aptas para el maíz, uno con el escenario climático actual y el resto con los escenarios de cambio, de la siguiente forma: a) más dos grados centígrados y más 20% de precipitación, b) más dos grados centígrados y menos 20% de precipitación, c) más cuatro grados centígrados y más 20% de precipitación, d) más cuatro grados centígrados y menos 20% de precipitación; e) escenario con la aplicación del modelo CCC y f) escenario con el modelo GFDL-R30. Con ellos se pudo obtener la superficie apta, medianamente apta y no apta para el cultivo de maíz de temporal. Estos rangos se establecieron con base en los requerimientos óptimos de temperatura y precipitación del cultivo.

Se analizaron los valores de temperatura y precipitación, tanto en el escenario actual como para los de cambio, y se confrontaron con los requerimientos en cada una de las etapas fenológicas del maíz; las etapas corresponden a los meses de mayo a octubre, de tal manera

que se asigna un valor de aptitud de 1 a 3, de acuerdo con la siguiente clasificación: no aptas (1), medianamente aptas (2) y aptas (3), pero siempre se le dio mayor peso a los valores de precipitación que a los de temperatura, por ser el cultivo más sensible a los primeros.

A partir de esta ponderación se sobrepusieron los mapas de isoyetas e isotermas de cada una de las etapas de desarrollo y, posteriormente también se combinaron los resultados de estas sobreposiciones de tal manera, que se consideraron como aptas las zonas que durante los seis meses presentan los requerimientos necesarios para el maíz.

2.4.7. Mapas de vulnerabilidad al cambio climático

Los mapas de vulnerabilidad identifican las áreas en las que se presentaría un cambio en la aptitud. Para ello se comparó el escenario actual con los de cambio. Así, las zonas que tuvieron un cambio positivo, es decir que incrementarían su aptitud, tienen una vulnerabilidad nula, mientras que aquellas que tuvieron un cambio negativo fueron consideradas las más vulnerables.

3. Resultados y discusión

Los resultados que se presentan a continuación están resumidos en el cuadro 4, para una mejor comparación visual de los resultados.

3.1. Escenario actual

Este escenario muestra a la mayor parte del país, 59.6%, como no apto para el cultivo de maíz en condiciones de temporal y corresponde prácticamente a las zonas de clima árido y semiárido del noroeste, norte y centro de México, además de la costa del Pacífico, desde Jalisco hasta Chiapas. La zona apta ocupa 7.6% y corresponde a algunas regiones de Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Chiapas, mientras el resto del país, 32.8%, es medianamente apto (fig. 1).

3.2. Escenarios con los modelos de circulación general

En el escenario de cambio obtenido a partir del modelo CCC, los incrementos de temperatura y precipitación serían diferentes; en algunos meses, se presentarían valores de temperatura que fluctúan desde 2°C al sur del país hasta 4°C en algunas zonas del norte. Los resultados de

aptitud para el cultivo de maíz fueron los siguientes: las zonas no aptas ocuparían 75% de la superficie total del país, mientras que las medianamente aptas ocuparían 22% y las zonas aptas 2.5% (fig. 2).

Cuadro 4. Comparativo de escenarios.

Aptitud	Escenario actual		Escenario de cambio incremento de 2°C y más 20% de precip.		Diferencia escenario actual / escenario de cambio		Escenario de cambio incremento de 2°C y menos 20% de precip.		Diferencia escenario actual / escenario de cambio	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Apta	151 012	7.6	258 310	13.0	+ 107 298	+ 5.4	174 856	8.8	+ 23 844	+ 1.2
Medianamente apta	651 736	32.8	353 428	18.0	- 298 308	- 13.0	280 187	14.0	- 371 559	- 18.8
No apta	1 184 252	59.6	1 335 264	67.2	+ 151 012	+ 7.6	1 531 977	77.2	+ 347 725	+ 17.5
Total	1 987 000	100.0	1 987 000	100.0	—	—	1 987 000	100.0	—	—

Aptitud	Escenario Actual		Escenario de cambio incremento de 4°C y más 20% de precip.		Diferencia escenario actual / escenario de cambio		Escenario de cambio incremento de 4°C y menos 20% de precip.		Diferencia escenario actual / escenario de cambio	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Apta	151 012	7.6	186 908	9.4	+ 35 896	+ 3.8	4 788 8	0.24	- 146 243.2	- 7.36
Medianamente apta	651 736	32.8	290 587	14.6	- 361 149	- 22.7	72 328 8	3.64	- 579 408.2	- 29.16
No apta	1 184 252	59.6	1 619 405	81.5	+ 435 153	+ 21.9	1 909 904.0	96.12	+ 725 652.2	+ 36.52
Total	1 987 000	100.0	1 987 000	100.0	—	—	1 987 000.0	100.00	—	—

Aptitud	Escenario Actual		Escenario de cambio CCC		Diferencia escenario actual / escenario de cambio		Escenario de cambio GFDL - R30		Diferencia escenario actual / escenario de cambio	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Apta	151 012	7.6	49 675	2.5	- 101 337	- 5.1	315 933	15.9	+ 163 921	+ 8.3
Medianamente apta	651 736	32.8	437 140	22.0	- 214 596	- 10.8	186 908	9.4	- 464 828	- 24.4
No apta	1 184 252	59.6	1 498 185	75.5	+ 313 948	+ 15.9	1 504 199	75.7	+ 305 988	+ 15.4
Total km ²	1 987 000	100.0	1 987 000	100.0	—	—	1 987 000	100.0	—	—



Figura 1. Superficie potencialmente apta para el cultivo de maíz de temporal. Escenario actual.

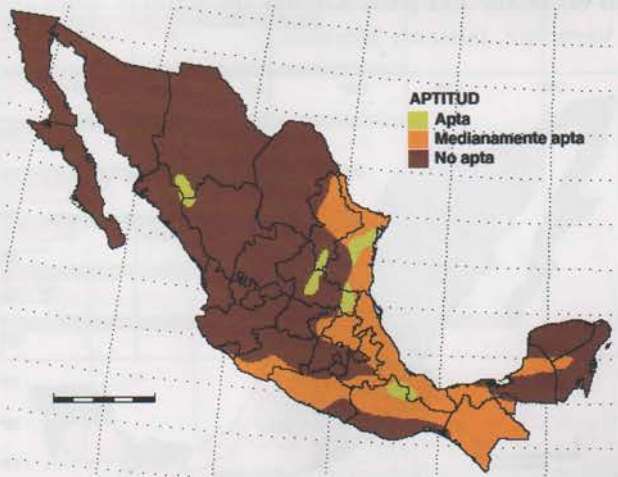


Figura 2. Superficie potencialmente apta para el cultivo de maíz de temporal. Modelo CCC.

De acuerdo con el escenario de cambio obtenido a partir del modelo GFDL-R30, el incremento de temperatura promedio para el país sería de 3°C. Los resultados en la aptitud para el cultivo de maíz son: 75% de la superficie del país no sería apta para el cultivo, 8.4% sería medianamente apta y 15.9% sería apta. Este modelo es uno de los que refleja condiciones menos drásticas, porque es el único en el que la superficie apta alcanzaría 15.9%, en todos los demás esta superficie se encuentra por abajo de este valor (fig. 3).

3.3. Escenarios de sensibilidad

Escenario de cambio: más dos grados centígrados y más 20% de precipitación. Bajo estas condiciones incrementaría la aptitud para cultivar maíz en algunas regiones, principalmente en el sur, donde la zona apta ocuparía 13.0% del territorio. Mientras que las zonas medianamente aptas ocuparían 19.8% y las no aptas 67.2%; esta última zona, se incrementaría al centro y norte de México con respecto al escenario actual.

Escenario de cambio: más dos grados centígrados y menos 20% de precipitación. De presentarse este escenario habría un incremento de las zonas no aptas ya que éstas ocuparían 77.1% del territorio, las medianamente aptas 14% y las aptas apenas 8.8%. Estas últimas se con-

centrarían en el sur del país, además de algunas áreas dispersas al norte de Veracruz, Jalisco y Morelos.

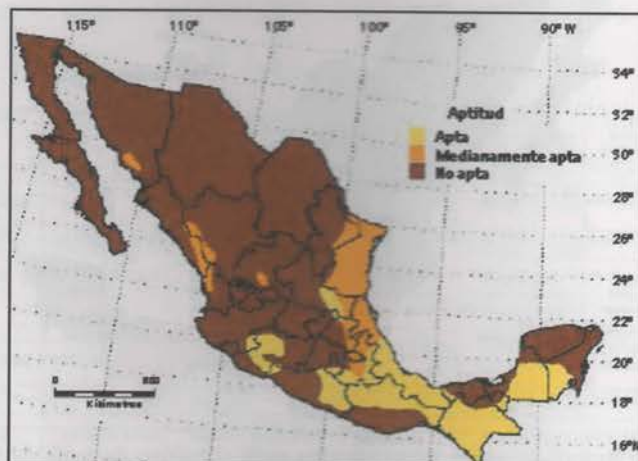


Figura 3. Superficie potencialmente apta para el cultivo de maíz de temporal. Modelo GFDL-R30.

Escenario de Cambio: más cuatro grados centígrados y más 20% de precipitación. En este escenario, a pesar de tener un incremento en la precipitación, el aumento de la temperatura generaría un incremento en las zonas no aptas, ya que éstas cubrirían 81.5% de la superficie del país, 10.1% sería de zonas medianamente aptas y 8.4% sería de zonas aptas.

Escenario de Cambio: más cuatro grados centígrados y menos 20% de precipitación. En este escenario las zonas aptas disminuirían de tal manera que sólo 0.24% sería potencialmente apta para el cultivo del maíz, 3.64% medianamente apta y 96.12% no apta. Este escenario, junto con el anterior, proyectan condiciones que pondrían en riesgo la producción y el abasto del maíz.

3.4. Comparación de los escenarios de cambio climático

En la figura 4 se ilustra la superficie del país ocupada por tipo de aptitud en cada uno de los siete escenarios generados; el de más 4°C y menos 20% de precipitación proporcionó los resultados más severos, mientras que los escenarios optimistas los constituyen el GFDL-R30 y el de más 2°C y más 20% de precipitación.

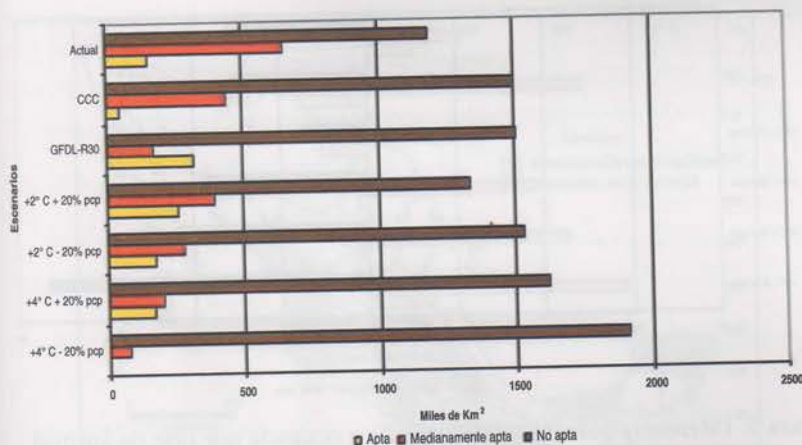


Figura 4. Superficie del país que ocuparían los tres grados de aptitud para el cultivo de maíz de temporal en cada uno de los escenarios de cambio.

En los siete escenarios, la fluctuación de las superficies de cada uno de los grados de aptitud tiene comportamientos similares entre sí, a excepción de las zonas aptas, en relación con el escenario actual, (fig. 5). La superficie no apta se incrementa en cada uno de los escenarios de cambio con respecto al escenario actual. Mientras que la medianamente apta disminuye, por estar en los límites de tolerancia para el desarrollo del maíz de temporal y, por lo tanto, sería más susceptible al cambio en los escenarios propuestos.

En ambas figuras se puede observar que la superficie apta aumentaría en el modelo GFDL-R30 y en los escenarios de más 2° C, disminuyendo drásticamente en los de más 4° C y en el modelo CCC la disminución representa más de la mitad de la superficie apta actual.

3.5. Áreas vulnerables al cambio climático

Las áreas más vulnerables serían aquellas en las que disminuye su aptitud para cada escenario con respecto al escenario base; estas áreas tienen cambio negativo. Sin embargo, también se obtuvieron resultados con cambio positivo en zonas que mejorarían su aptitud para el cultivo de maíz de temporal.

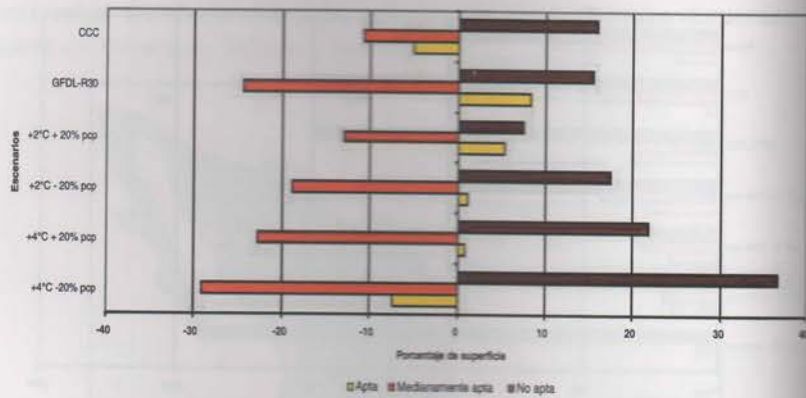


Figura 5. Diferencia porcentual de superficie ocupada por tipo de aptitud para el cultivo de maíz de temporal en cada uno de los escenarios de cambio, con respecto al escenario actual.

De los mapas de vulnerabilidad (figs. 6 y 7), del cuadro 5 y de la figura 8 se puede decir lo siguiente: el escenario de más 2°C y más 20% de precipitación presentaría una superficie vulnerable de 262 252 km² y con cambios positivos de 113 010 km². Mientras que el escenario más 2°C y menos 20% de precipitación, la superficie vulnerable es de 397 700 km² y 38 740 km² con cambio positivo.

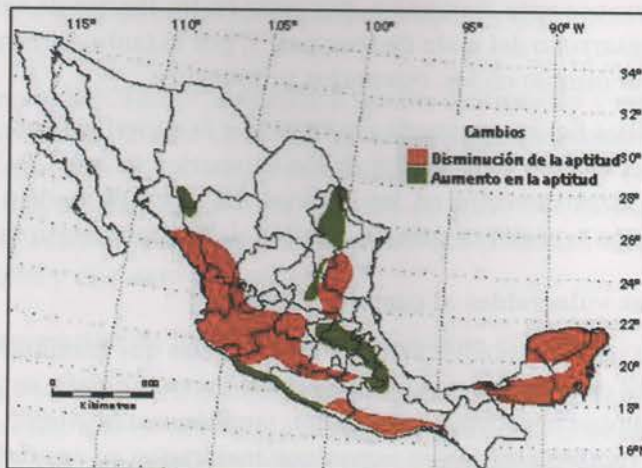


Figura 6. Áreas con cambio en la aptitud para el cultivo del maíz de temporal. Modelo CCC.

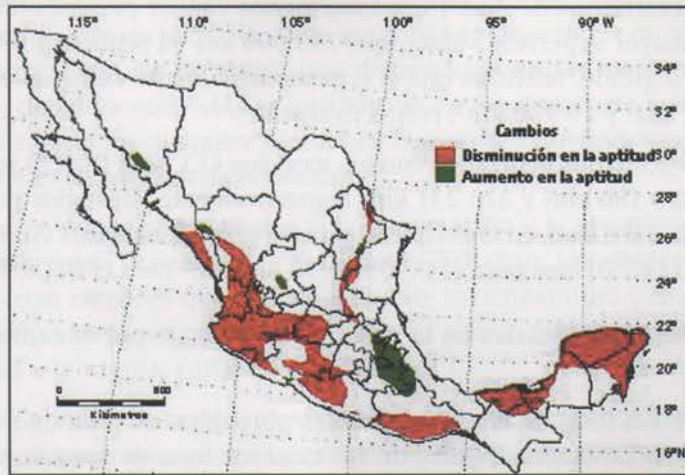


Figura 7. Áreas con cambio en la aptitud para el cultivo del maíz de temporal. Modelo GFDL-R30.

Cuadro 5. Áreas vulnerables con escenario de cambio climático

	Cambio positivo* km ²	Cambio negativo** km ²
Sensibilidad + 2°C y + 20% de precipitación	113 010	262 252
Sensibilidad + 2°C y - 20% de precipitación	38 740	429 180
Sensibilidad + 4°C y + 20% de precipitación	12 190	397 700
Sensibilidad + 4°C y - 20% de precipitación	19 130	603 600
CCC	113 270	429 180
GFDL-R30	50 530	370 231

* Áreas que cambian de no aptas a aptas o medianamente aptas.
 ** Áreas que cambian de aptas o medianamente aptas a no aptas.

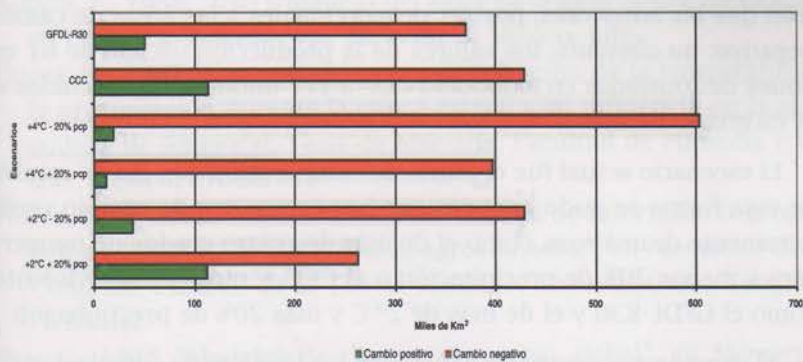


Figura 8. Superficie del país vulnerable al cambio climático en cada uno de los escenarios de cambio.

Los escenarios de más 4°C y más/menos 20% de precipitación son los de mayor superficie vulnerable, 753 900 km² el primero y 603 600 km² el segundo. Mientras que el área medianamente vulnerable es de 12 190 km² y 19 130 km², respectivamente.

Los escenarios generados con los modelos CCC y GFDL-R30 presentaron 429 180 km² y 370 231 km² respectivamente, afectados por una alta vulnerabilidad, en tanto que la superficie medianamente vulnerable fue de 113 270 km² para el CCC y de 50 330 km² para el GFDL-R30.

4. Pérdidas potenciales en la producción de maíz por el cambio climático

A partir del total de áreas vulnerables obtenidas de cada uno de los escenarios de cambio, se hizo un ejercicio con base en dos valores medios de rendimiento para el país: el primero de 1.7 ton/ha (rendimiento nacional promedio de 1980-1988) y el segundo de 2.36 ton/ha (rendimiento potencial que se alcanzaría al aplicar tecnologías apropiadas).

Al multiplicar estos valores por el número de hectáreas vulnerables al cambio climático, se obtiene que con el rendimiento de 1.7 ton/ha el modelo GFDL-R30 mostraría pérdidas de 62 millones de ton de maíz, el modelo CCC mostraría menores pérdidas con 44 millones de ton, mientras que el escenario de más 4°C y menos 20% de precipitación muestra una pérdida de 128 millones de toneladas.

Las pérdidas con rendimientos de 2.36 ton/ha siguen el mismo patrón que las anteriores, por ser proporcionales a las áreas de cambio negativo; no obstante, los valores de la producción oscilan de 61 millones de toneladas en el modelo CCC a 177 millones de toneladas en el escenario de más 4° C y menos 20% de precipitación.

El escenario actual fue el punto de comparación con los de cambio; de esta forma se pudo apreciar que hay escenarios de cambio verdaderamente dramáticos, como el de más de cuatro grados de temperatura y menos 20% de precipitación o el CCC, y otros menos violentos como el GFDL-R30 y el de más de 2° C y más 20% de precipitación.

Al comparar el escenario actual con los Modelos de Circulación General y los escenarios de sensibilidad, se observa que los más favora-

bles son el GFDL-R30 y el de más 2°C y más 20% de precipitación, ya que pronostica un incremento en las zonas aptas, aunque de igual forma sucede con las no aptas, una disminución en las medianamente aptas, debido a que éstas se encuentran en los límites de los umbrales, por lo tanto, cualquier cambio en las variables temperatura o precipitación les afectan directamente.

Así, se puede observar que si la temperatura y la precipitación aumentan, como lo pronostica el modelo GFDL-R30, los efectos negativos serían menores que cuando aumente la temperatura y disminuya la precipitación, ya que, en este caso, se tienen escenarios más propensos a la sequía, como en el modelo CCC.

Este estudio se realizó a escala nacional, por lo que los resultados son muy generales, además, las variables utilizadas son temperatura y precipitación, sin tomar en cuenta los suelos, la erosión y las pendientes para obtener mejores resultados. Sin embargo, da la pauta para realizar mapas de aptitud para regiones más específicas, con más detalle y con las variedades utilizadas en las zonas de estudio, con el fin de considerar los efectos de cambio climático a nivel regional.

Agradecimientos

Al Dr. Carlos Gay, a la M. en C. Cecilia Conde y al Fís. Óscar Sánchez por el apoyo y comentarios que enriquecieron este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Aceves, E., 1988, "Uso y manejo del agua en la agricultura mexicana", en *Comercio Exterior*, vol. 38, núm. 7, México, julio.
- Flores, M., 1987, Comportamiento y distribución de la temperatura y la precipitación durante la época estival y su influencia en la agricultura de temporal. Tesis de Maestría, Facultad de Filosofía y Letras, México, UNAM.
- Flores, E. M., 1992, "Aplicación de un sistema de información geográfica en estudios de zonificación agroclimática", en *Memorias del II Congreso Ciencias de la Tierra*. Santiago, Chile, Instituto Geográfico Militar.
- Gay, C., 1992, "Modelos de clima y el cambio global", en *Memorias. Reunión anual del Programa Universitario de Medio Ambiente*,

- UNAM, México.
- Liverman, D., 1992, "The regional impact of global warming in Mexico", en J. y J. Clarkson (eds.), *The Regions and Global Warming*, Schmandt, Oxford Univ. Press.
- Liverman, D., 1992^a, "Posibles impactos de los cambios climáticos en México", en *Memorias. Reunión anual del Programa Universitario de Medio Ambiente*, UNAM, México.
- Liverman, D., 1993, "Global Change and Mexico", en *Earth and Mineral Sciences*, 60(4), pp. 71-76.
- Liverman, D., 1995, Mapas de producción, superficie cosechada y áreas siniestradas de maíz de temporal en México, 1990. Comunicación personal.
- Maderey, Mendoza y Villanueva, 1995, Reportes técnicos de hidrología, Estudio de País: México.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, C. Gay, 1997, "Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico", en *Climate Research*, Vol. 9, Nos. 1 y 2, pp. 107-114.
- Sánchez, S. L., 1983, Comunicación personal, México, Centro de Investigación Agrícola, Morelia, Mich.
- Secretaría de Educación Pública, 1983, Manuales para la Investigación Agropecuaria, No. 10, área de producción vegetal, México, Trillas.
- Oropeza, O. y Hernández, M.E., 1995: Reportes técnicos de desertificación y sequía, Estudio de País: México.
- Ortiz-Solorio, C., 1987, Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana, Departamento de suelos, México, UACH. Chapingo.
- Villers L. y Trejo I., 1995, Reportes técnicos de ecosistemas forestales, Estudio de País: México.
- Wilsie, C., 1956, Cultivos, aclimatación y distribución, Zaragoza, España, Acribia.

ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA DE MAÍZ DE TEMPORAL MEDIANTE EL MODELO CERES - MAIZE

Cecilia Conde*, Rosa Ma. Ferrer* y Diana Liverman**.

Resumen

Existen diferentes modelos agroclimáticos y de simulación del desarrollo de las plantas que pueden utilizarse para evaluar el impacto del cambio climático en la agricultura. En el Estudio de País: México, se empleó el modelo de simulación CERES-Maize.

En la mayoría de los sitios seleccionados en este estudio, los efectos de un cambio climático en los rendimientos de maíz de temporal serían negativos, con reducciones en la duración de la estación de crecimiento del maíz, particularmente en la fase de llenado de grano. Sin embargo, en los sitios con una altura mayor de los 2 000 msnm en el centro de México, los incrementos de temperatura propuestos resultan benéficos, aún en los casos de disminución en la precipitación.

Al aplicar estudios de sensibilidad, se observó que en todos los casos un incremento de 20% en la precipitación implicaba una disminución en los rendimientos. Este efecto se debe al lavado de nutrientes del suelo, hecho que se refleja en el aumento en el estrés por nitrógeno durante las diferentes fases de crecimiento de la planta.

En el caso de los sitios ubicados al este del país habría un adelanto de un mes en la sequía intraestival bajo condiciones de cambio climático.

Con el objeto de reducir los impactos del cambio climático, se estudiaron medidas de adaptación como el cambio en la fecha de siembra, el incremento en la aplicación del fertilizante, el cambio en la variedad de las semillas, la aplicación de la irrigación y combinaciones de éstas. La más exitosa de estas medidas fue la aplicación de fertilizante, sola o combinada con alguna de las otras propuestas.

* Centro de Ciencias de la Atmosfêra, UNAM

** Latin American Center, University of Arizona

A partir del análisis de costos, se determinó la viabilidad de las medidas de adaptación en función de un incremento en los rendimientos. Si bien este análisis fue muy simple, se puede observar que en algunos casos dichas medidas implicarían pérdidas económicas para el productor. También se incluye un estudio de costos en el que se considera el retiro del subsidio a los precios del maíz en México, lo que muestra que este cultivo no sería redituable en algunos de los sitios, aún en las condiciones actuales.

Palabras clave: Agricultura de temporal, modelo CERES-Maize, vulnerabilidad, adaptación.

1. Introducción

Los escenarios de cambio climático, generados mediante los Modelos de Circulación General (MCG), suponen una duplicación en la concentración del bióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera. La respuesta de los cultivos a este cambio es variable, pero diferentes experimentos de laboratorio han mostrado un probable efecto fisiológico benéfico ante este incremento del CO_2 (Parry, 1993). En los cultivos de plantas C_3 , por ejemplo el trigo y el arroz que requieren mayores concentraciones de CO_2 para iniciar la síntesis de materia orgánica, se puede esperar una respuesta positiva promedio de 30%. En contraste, en los cultivos de plantas C_4 , como serían el maíz y la caña de azúcar, que son más eficientes en la fijación del CO_2 , se calcula un efecto positivo promedio de 5%. Por otra parte, es importante considerar que las llamadas malezas de las plantas C_4 son del tipo C_3 y viceversa.

Lo anterior, junto con los incrementos de temperatura, mayores conforme aumenta la latitud, podrían propiciar un desplazamiento de las condiciones favorables para la agricultura de cereales hacia las latitudes altas, en un rango de 150 a 200 km, o bien, entre 150 y 200 metros más en altura. No obstante, el desarrollo de los cultivos quedaría aún condicionado por las variaciones ambientales, como las que se proyectan para la precipitación y la radiación solar. Otras limitantes para el desarrollo de los cultivos son los posibles cambios en las características de los suelos, en la disponibilidad del agua, así como en la distribución de las plagas y enfermedades de las plantas (IPCC, 1995).

La agricultura en México es vulnerable a las variaciones climáticas extremas, como son las sequías, las inundaciones y las heladas, debido a que se desarrolla fundamentalmente bajo condiciones de temporal.

El cultivo de maíz de temporal se realiza prácticamente en todo el país, aún en aquellas zonas con climas, suelos o pendientes no propicios. Contrasta con lo anterior el alto consumo del maíz como alimento básico en la mayor parte de la población (Liverman, 1994), tanto rural como urbana (250 kg por habitante/año).

2. Modelo empleado

El modelo CERES - Maize (Jones, *et al.*, 1986; Ritchie, *et al.*, 1989) simula los incrementos diarios de crecimiento, desarrollo y producción del cultivo del maíz. Puede utilizarse para la toma de decisiones en el manejo de los cultivos y en el análisis de riesgo.

Para simular el crecimiento, el desarrollo y la producción del maíz, el modelo considera los siguientes procesos:

- El desarrollo fenológico, especialmente la forma en la que es afectado por las características genéticas y los factores climáticos.
- El grado de crecimiento de hojas, tallos y raíces.
- La acumulación de biomasa, especialmente la manera en la que el desarrollo fenológico afecta el desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos.
- El balance del agua del suelo y el uso del agua por el cultivo.
- Las transformaciones del nitrógeno del suelo y su incorporación en las diferentes partes de la planta.

El modelo está diseñado para simular los efectos del clima y los cambios en el manejo del cultivo.

Para la construcción del *escenario base*, el modelo requiere de bases de datos de clima, de suelo, de manejo del cultivo y de las variedades de maíz empleadas, con el objeto de simular la producción real (fig. 1). El modelo caracteriza a las diferentes variedades de maíz, considerando cinco coeficientes genéticos (P1, P2, P5, G2, G5), dos de ellos se pueden calcular a partir de los parámetros climáticos

y los tres restantes se ajustan por medio de pruebas de ensayo y error, hasta obtener la fenología y los rendimientos esperados para cada variedad.

MODELO CERES-Maize

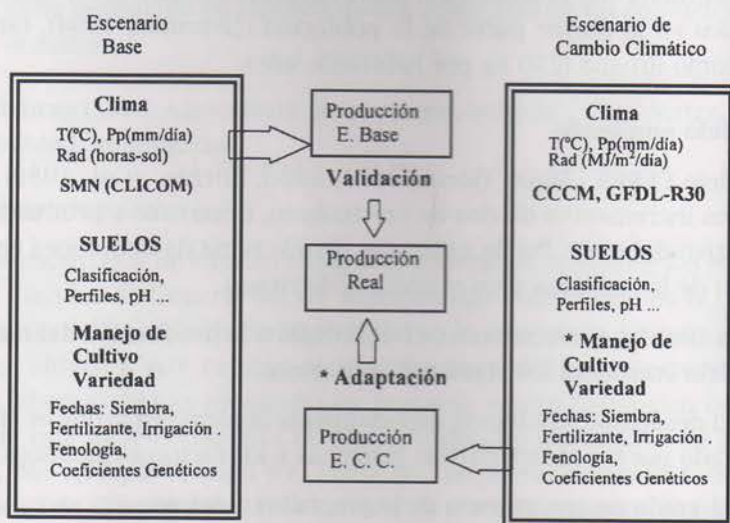


Figura 1. Esquema que describe al modelo CERES-Maize. A la izquierda se ilustran los archivos de entrada para construir el escenario base. A la derecha se muestran los correspondientes para construir escenarios de cambio climático. Al centro, las simulaciones de producción de maíz, que deben ser contrastadas con la producción real.

La comparación entre la producción simulada y la real permite calibrar el modelo antes de introducir las condiciones de cambio climático. O bien, es posible realizar estudios de sensibilidad, proponiendo incrementos tales en temperatura y precipitación que permitan analizar la capacidad de respuesta del cultivo a dichos cambios.

En la figura 1 se observa que la construcción del escenario de cambio climático se basa en la introducción de las modificaciones propuestas por los modelos CCC y GFDL-R30 (Magaña, *et al.*, en este volumen), bajo condiciones de una duplicación en la concentración de bióxido de

y
ra
carbono. Los otros archivos de entrada (suelos y manejo de cultivos, entre otros) se mantienen sin cambios.

La diferencia observada entre la simulación de la producción real y la obtenida al aplicar los modelos de simulación de cambio climático, representa la medida del impacto que puede tener dicho cambio en la producción agrícola para el sitio seleccionado.

El modelo también permite sugerir medidas de adaptación, al variar las condiciones de manejo del cultivo y/o proponiendo un cambio en la variedad de la semilla empleada.

Para el estudio de los efectos de un cambio climático en la producción de maíz se utilizan dos tipos de escenarios: Uno con incrementos arbitrarios, construidos mediante el aumento de temperatura de 2 y 4°C y modificaciones en la precipitación de 20%, así como combinaciones de éstos. El segundo tipo de escenarios corresponde a las salidas generadas por dos modelos de circulación general GFDL-R30 y CCC. En el marco de estos escenarios se puede o no incluir el efecto fisiológico que la duplicación en la concentración de CO₂ tiene sobre el cultivo.

Los datos diarios de temperaturas máxima y mínima así como de precipitación, se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que utiliza el sistema CLICOM. Los datos de la radiación solar se calculan a partir de las horas sol, proporcionadas por el mismo SMN. Cuando sólo se tienen datos promedios mensuales, se utiliza el programa WFORM (Jones, *et al.*, 1986) para generar los diarios.

3. Selección de los sitios estudiados

En el cuadro 1 y en la figura 2 se muestran los siete sitios estudiados, indicando el estado del país al que corresponden, su latitud, su longitud y su altitud. También se señala la serie de tiempo disponible en cada caso.

Los estados citados en el cuadro 1 representan los de mayor productividad del país en la producción de maíz desde hace dos décadas, razón por la cual se seleccionaron sitios representativos de su producción. El cuadro 2 muestra el lugar que ocuparon dichos estados en

la producción nacional de maíz en el año de 1993. Se seleccionaron sólo sitios de maíz de temporal, para el ciclo primavera-verano.

Cabe señalar que en el caso de Puebla se eligieron algunos sitios con bajos rendimientos, con el objeto de analizar el impacto del cambio climático en áreas de cultivo para autoconsumo.

Cuadro 1. Ubicación, altitud y series de tiempo de los sitios seleccionados.

SITIO	ESTADO	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	ALTITUD (msnm)	AÑOS
Atacomulco	México	19° 49'	99° 42'	2 520	1961-1974
Izúcar	Puebla	18° 37'	98° 28'	1 285	1974-1989
Ixcamilpa	Puebla	18° 02'	98° 42'	806	1975-1990
Coatepec	Veracruz	19° 32'	96° 55'	1 110	1967-1985
Tuxpan	Veracruz	20° 57'	97° 24'	25	1971-1988
La Huerta	Jalisco	19° 22'	105° 0'	28	1962-1986
Magdalena	Jalisco	20° 55'	103° 58'	1 359	1961-1988

msnm = metros sobre el nivel del mar

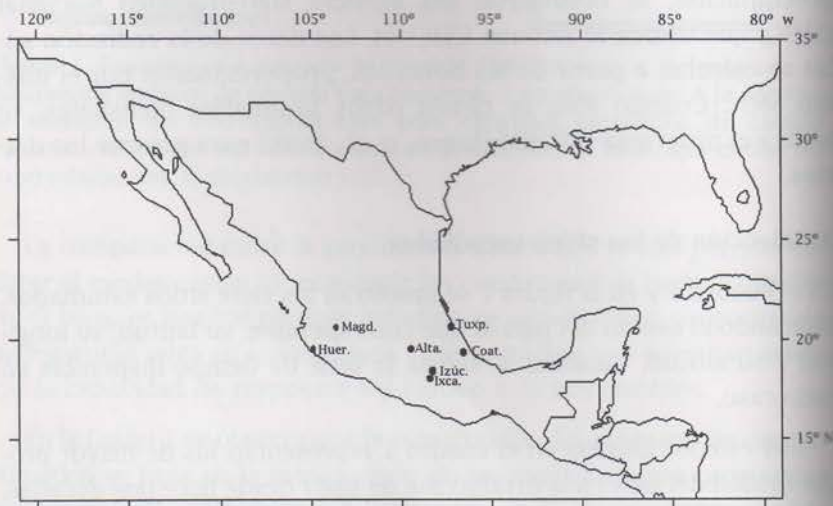


Figura 2. Localización de los sitios de estudio.

Cuadro 2. Estados del país, lugar en la producción nacional e información del cultivo en el ciclo primavera - verano.

ESTADO	LUGAR EN PRODUCCIÓN NAL. (1993)	RÉGIMEN	SEMBRADA (miles ha)	COSECHADA (miles ha)	PRODUCCIÓN (miles ton)
JALISCO	1	RIEGO	39.7	38.2	152.3
		TEMPORAL	641.8	611.3	2 268.9
MÉXICO	2	RIEGO	107.6	102.4	321.5
		TEMPORAL	480.3	466.6	912.0
PUEBLA	4	RIEGO	41.9	41.9	130.3
		TEMPORAL	560.3	498.1	888.5
VERACRUZ	9	RIEGO	5.1	4.3	14.4
		TEMPORAL	482.0	401.4	765.5

4. Escenarios base y de cambio climático

Con los datos diarios de temperaturas máxima y mínima, precipitación y horas sol (convertidas a MJ/m²/día), se calcularon para todos los sitios los promedios mensuales para las series de tiempo mostradas en el cuadro 1. Esto permitió construir el escenario climático base (fig. 3) para cada sitio.

Para los estados de México, Puebla y Veracruz es notorio el fenómeno de sequía intraestival. A excepción de La Huerta, el valor más alto de la temperatura máxima se presenta antes del periodo de lluvias y alcanza valores cercanos al crítico en el rango que se considera óptimo para el desarrollo de la planta. En los sitios en los que este valor se aproxima a 34°C, un cambio climático como el propuesto por los modelos, difícilmente permitiría la producción de maíz.

Muchas de las semillas empleadas en México están adaptadas tanto a la sequía intraestival como a rangos de temperatura más amplios que las variedades de otras regiones. Lo anterior se debe considerar para las propuestas de cambio en la fecha de siembra o cambio en la variedad, como medidas de adaptación.

Se generaron escenarios de cambio climático de dos formas: uno con incrementos de temperatura de +2 y +4°C y de precipitación de 20% y el otro con combinaciones de éstos. Los efectos de estos cambios se analizaron en los estudios de sensibilidad que se muestran en la siguiente sección. La segunda forma fue utilizar las simulaciones de dos modelos de circulación general: GFDL-R30 y CCC (Conde, *et al.*, 1997).

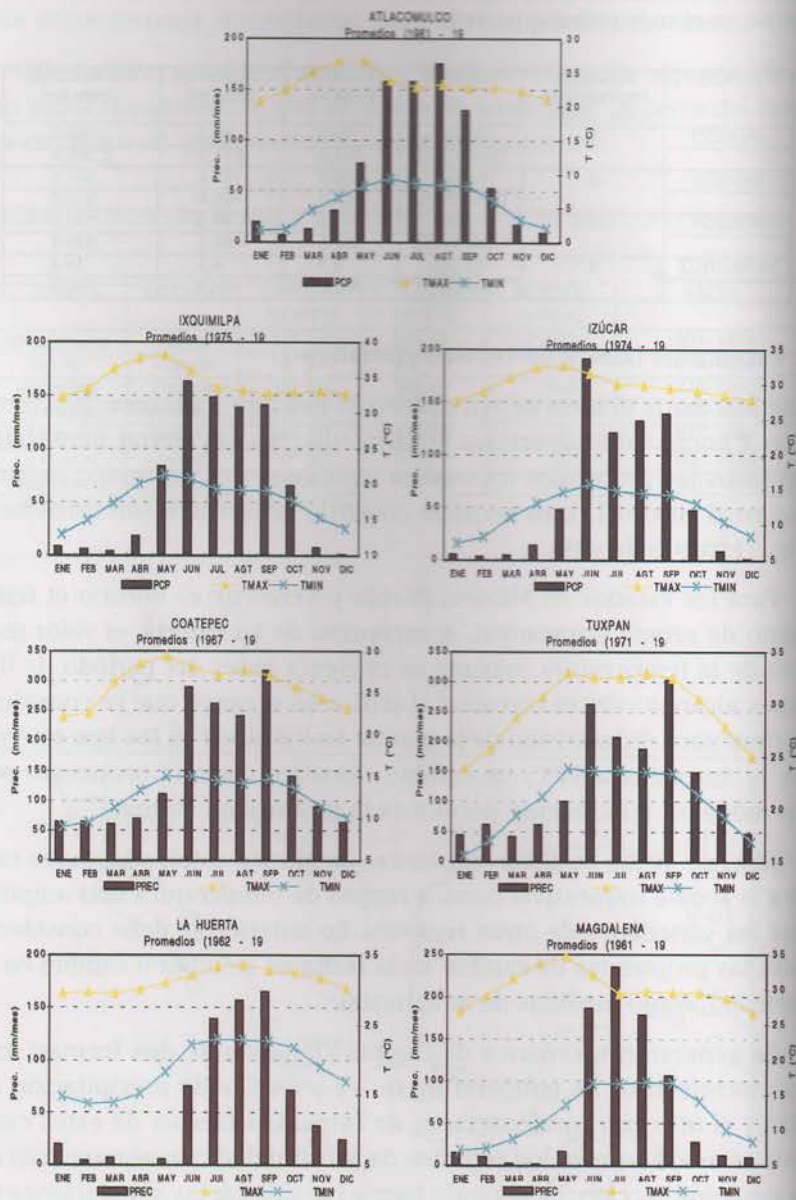


Figura 3. Climatología de los sitios de estudio.

Las variaciones en la temperatura, la precipitación y la radiación solar de los modelos aquí utilizados se muestran en los cuadros 3, 4 y 5.

Cuadro 3. Incrementos de temperatura (°C) en cada sitio, según los Modelos de Circulación General.

	ATLA		IZUC		IXCA		COAT		TUXP		HUER		MAGD	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
ENE	3.6	1.5	2.4	1.6	2.4	1.6	2.4	1.4	2.2	1.4	3.8	1.9	4.0	1.9
FEB	3.2	1.9	2.9	1.6	2.9	1.6	2.9	1.7	3.0	1.7	3.3	1.9	3.7	1.9
MAR	3.6	2.0	3.0	1.6	3.0	1.6	3.0	1.7	2.9	1.7	3.4	2.0	4.1	2.0
ABR	3.2	2.4	3.0	1.9	3.0	1.9	3.0	2.7	3.0	2.7	2.4	2.1	2.9	2.1
MAY	2.4	2.3	2.1	1.9	2.1	1.9	2.1	2.3	2.4	2.3	2.5	2.1	2.5	2.1
JUN	2.7	1.9	2.7	1.8	2.7	1.8	2.7	1.5	2.7	1.5	2.6	2.0	2.4	2.0
JUL	2.1	2.1	2.5	1.7	2.5	1.7	2.5	1.9	2.9	1.9	2.3	2.2	1.9	2.2
AGO	2.3	2.4	2.6	2.0	2.6	2.0	2.6	2.3	3.2	2.3	2.4	2.4	2.1	2.4
SEP	2.5	2.4	2.7	2.0	2.7	2.0	2.7	2.4	3.2	2.4	2.5	2.3	2.3	2.3
OCT	2.5	2.7	2.6	2.2	2.6	2.2	2.6	2.9	3.0	2.9	2.8	2.1	2.7	2.1
NOV	2.6	2.3	2.6	2.2	2.6	2.2	2.6	2.2	3.3	2.2	2.4	2.1	2.7	2.1
DIC	3.8	1.8	3.2	1.8	3.2	1.8	3.2	1.6	3.3	1.6	3.6	1.9	3.7	1.9

Cuadro 4. Razón de cambio para la precipitación en cada sitio, según los Modelos de Circulación General.

	ATLA		IZUC		IXCA		COAT		TUXP		HUER		MAGD	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
ENE	1.44	0.70	1.64	1.04	1.64	1.04	1.64	0.83	1.41	0.83	1.01	0.60	1.07	0.60
FEB	0.88	0.97	0.84	0.99	0.84	0.99	0.84	0.77	0.92	0.77	0.72	0.91	0.79	0.91
MAR	1.36	0.72	1.27	1.16	1.27	1.16	1.27	0.78	1.35	0.78	0.76	0.66	1.07	0.66
ABR	1.15	1.12	1.03	1.44	1.03	1.44	1.03	1.39	0.97	1.39	1.13	0.73	1.12	0.73
MAY	1.22	1.37	1.08	0.95	1.08	0.95	1.08	1.13	1.18	1.13	1.45	1.39	1.44	1.39
JUN	1.42	0.85	1.42	0.66	1.42	0.66	1.42	0.76	1.22	0.76	1.42	1.14	1.18	1.14
JUL	1.25	0.60	1.14	0.64	1.14	0.64	1.14	0.71	1.20	0.71	1.43	0.92	1.40	0.92
AGO	1.32	1.04	1.35	0.85	1.35	0.85	1.35	1.07	1.38	1.07	1.23	1.08	1.24	1.08
SEP	1.29	0.73	1.34	0.73	1.34	0.73	1.34	0.64	1.31	0.64	1.23	0.97	1.29	0.97
OCT	1.02	1.28	1.08	1.31	1.08	1.31	1.08	1.13	0.99	1.13	1.10	1.22	0.98	1.22
NOV	1.19	0.76	1.15	1.00	1.15	1.00	1.15	1.00	1.17	1.00	1.36	0.74	1.35	0.74
DIC	0.98	0.93	1.17	0.95	1.17	0.95	1.17	0.80	1.15	0.80	0.67	1.30	0.85	1.30

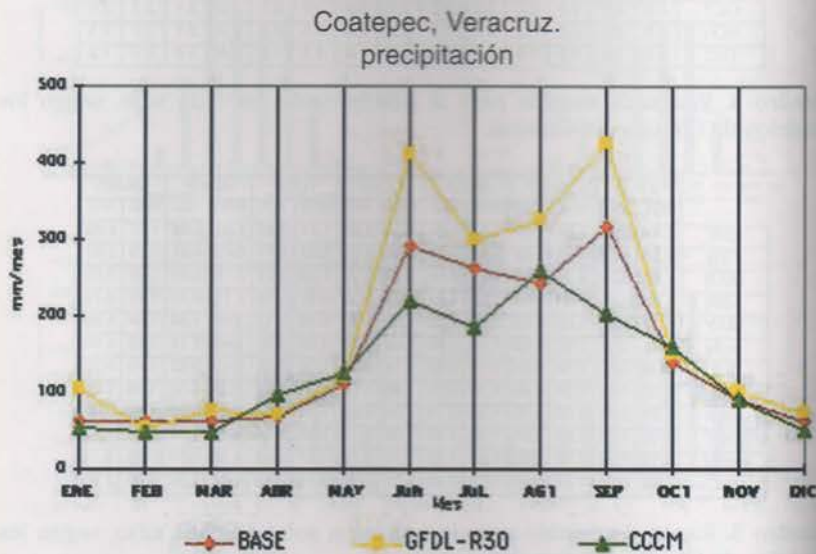
Cuadro 5. Razón de cambio para la radiación solar en cada sitio, según los Modelos de Circulación General.

	ATLA		IZUC		IXCA		COAT		TUXP		HUER		MAGD	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
ENE	1.01	1.02	0.87	1.00	0.87	1.00	0.87	1.12	0.88	1.12	1.05	0.99	1.00	0.99
FEB	1.04	1.00	1.16	0.96	1.16	0.96	1.16	1.04	1.14	1.04	1.04	0.98	1.05	0.98
MAR	0.97	1.03	0.94	1.01	0.94	1.01	0.94	1.10	0.98	1.10	1.01	1.03	1.01	1.03
ABR	1.00	0.95	1.00	0.95	1.00	0.95	1.00	0.94	1.02	0.94	1.01	0.99	1.01	0.99
MAY	1.01	0.93	1.00	0.94	1.00	0.94	1.00	0.93	0.96	0.93	0.99	0.92	0.97	0.92
JUN	0.89	0.99	0.96	0.98	0.96	0.98	0.96	1.05	1.00	1.05	0.94	0.87	0.95	0.87
JUL	0.96	1.10	0.99	1.08	0.99	1.08	0.99	1.05	0.90	1.05	0.98	0.98	0.85	0.98
AGO	0.97	0.98	0.89	0.99	0.89	0.99	0.89	0.94	0.99	0.94	0.88	0.93	0.94	0.93
SEP	0.93	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	1.05	1.06	1.05	0.96	0.93	0.95	0.93
OCT	0.93	0.90	1.18	0.94	1.18	0.94	1.18	0.96	1.18	0.96	0.99	0.92	1.01	0.92
NOV	1.03	0.96	0.97	0.94	0.97	0.94	0.97	0.99	1.07	0.99	1.02	0.94	1.02	0.94
DIC	1.03	1.00	0.96	1.00	0.96	1.00	0.98	1.09	0.98	1.09	1.08	0.99	1.03	0.99

El modelo GFDL-R30 propone, en general, incrementos positivos para las tres variables climáticas empleadas, mientras que el CCC muestra a su vez decrementos en la precipitación y en la radiación.

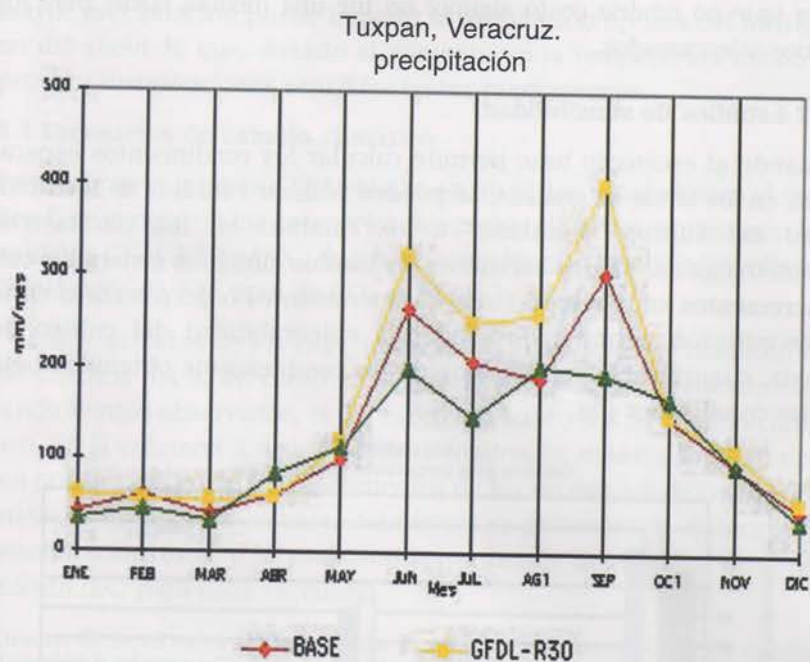
Es importante destacar el efecto que tienen los cambios climáticos proyectados por los modelos en la sequía intraestival en los sitios del estado de Veracruz. El valor mínimo de precipitación tiene un mes de adelanto con respecto al escenario base (figs. 4 y 5).

Figura 4a. Modificación del comportamiento de la sequía intraestival en Coatepec. El mínimo se presentaría en julio en lugar de agosto (escenario base).



Las estimaciones de los modelos para la temperatura máxima indican que Ixcamilpa, en el estado de Puebla, estaría fuera de los rangos óptimos supuestos para el cultivo de maíz. En contraste, sitios como Atlacomulco, en el Estado de México, resultarían beneficiados en términos de la temperatura mínima, ya que ésta alcanzaría valores por encima de la temperatura base.

Figura 4b. Modificación del comportamiento de la sequía intraestival en Tuxpan. El mínimo se presentaría en julio en lugar de agosto (escenario base).



5. Resultados

5.1 Vulnerabilidad y adaptación

En México, la producción de maíz de temporal es sumamente vulnerable al cambio climático, en particular, para las condiciones propuestas por el modelo GFDL-R30.

Al Considerar el VII Censo Agrícola-Ganadero (INEGI, 1994), se observa que, si bien en la mayor parte del territorio nacional se siembra maíz, aún en la actualidad, en la minoría de esas áreas dedicadas a este cultivo se obtienen rendimientos superiores a dos ton/ha. Se puede afirmar además que esa producción, en buena parte, está dedicada al autoconsumo y que difícilmente habría una relación costo beneficio de 1:3, aún en las zonas más aptas.

De lo anterior podemos concluir que un cambio climático impactaría con dureza a las regiones más pobres del país, en las cuales dicho

cultivo prácticamente depende de las condiciones climáticas. En los estudios realizados en este trabajo, el simple cambio en la fecha de siembra (que no tendría costo alguno) no fue una medida viable para los sitios seleccionados.

5.2 Estudios de sensibilidad

Cuando el escenario base permite calcular los rendimientos esperados en los sitios de análisis, se pueden realizar estudios de sensibilidad del cultivo "simulado" a los cambios en los parámetros climatológicos. Así, los escenarios de cambio climático generados con incrementos en la temperatura y/o incrementos o decrementos en la precipitación permiten investigar la vulnerabilidad del cultivo de maíz, cuantificable en términos de los rendimientos obtenidos bajo esas condiciones (fig. 5).

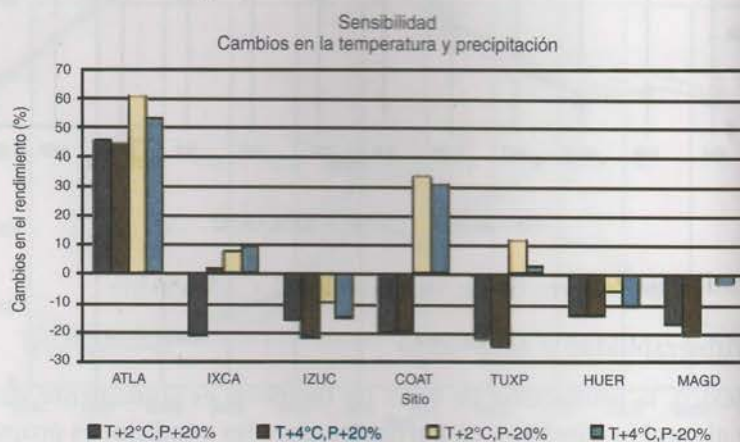


Figura 5. Cambio porcentual en los rendimientos bajo incrementos arbitrarios en la temperatura y precipitación.

En la figura 5 destacan los resultados para Atlacomulco, en donde el aumento en la temperatura beneficiaría la producción, ya que esto significaría la posible disminución de las heladas que impactan fuertemente a la producción agrícola en el centro del país, particularmente en las zonas altas. En estos sitios, inclusive los cambios en la precipitación (sin importar su signo) no producen decrementos significativos en la producción.

Es interesante destacar que el aumento de 20% en la precipitación no necesariamente produce un efecto positivo en el cultivo. Una mayor precipitación puede impedir la asimilación óptima del nitrógeno del suelo, lo que, aunado al aumento en la temperatura máxima, provoca disminuciones sensibles en los rendimientos.

5.3 Escenarios de cambio climático

Para aplicar el modelo CERES-Maize en los sitios señalados en el cuadro 1, se generaron los escenarios de cambio climático, empleando los modelos GFDL-R30 y CCC, donde se consideraron también los efectos fisiológicos de 555 ppm de CO₂ en el maíz.

Los resultados de los experimentos sin adaptación se destacan en los cuadros 6 a 9, así como en la figura 6, en la que se muestran los rendimientos observados, el del escenario base y los de cambio climático. En la columna 3 de los cuadros citados, se observa la diferencia (en porcentaje) entre los rendimientos de los escenarios de cambio climático con respecto al base. Asimismo, se presentan la duración, la precipitación total y la evapotranspiración de la estación de crecimiento (EC) para cada escenario.

Cuadro 6. Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de México.

Sitio Atlacomulco

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.8				
BASE	2.06		171.29	735.36	512.79
GFDL SIN EF CO ₂	2.82	36.77	143.36	900.71	433.42
GFDL CON EF CO ₂	2.77	34.59	143.36	900.71	353.79
CCC SIN EF CO ₂	3.22	56.12	144.79	601.50	461.79
CCC CON EF CO ₂	3.29	59.47	144.79	601.50	377.71

Las proyecciones propuestas por el modelo GFDL-R30, a excepción de Atlacomulco, resultan en la disminución de los rendimientos del cultivo, debido, fundamentalmente, a que los incrementos en la precipitación, generados por este modelo, son muy altos, lo que provoca condiciones semejantes a las descritas en el estudio de sensibilidad.

En el modelo CCC, las variaciones en el rendimiento pueden ser positivas o negativas, debido a que sus cambios en el clima son más mo-

derados. En algunos casos, sobresale el hecho de que el escenario de cambio climático generado por este modelo sería favorable a la producción de maíz.

Cuadro 7. Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de Puebla.

Sitio Ixcamilpa

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	0.49				
BASE	0.52		136.13	445.81	456.81
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	0.36	-30.22	124.38	558.56	459.94
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.26	-50.10	124.38	558.56	370.81
CCC SIN EF CO ₂	0.66	26.46	122.81	366.31	439.00
CCC CON EF CO ₂	0.53	0.99	125.69	368.13	359.94
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	3.48	568.89	120.40	568.87	561.31
GFDLR-30 CON EF CO ₂	3.50	571.90	122.53	569.07	496.50
CCC SIN EF CO ₂	3.63	597.80	121.33	375.87	509.25
CCC CON EF CO ₂	3.75	620.16	123.80	376.00	445.19

Sitio Izúcar

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	0.80				
BASE	0.88		110.06	369.61	392.00
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	0.71	-19.17	94.11	470.78	364.44
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.63	-27.98	94.39	472.33	293.83
CCC SIN EF CO ₂	0.80	-8.93	97.39	296.83	352.22
CCC CON EF CO ₂	0.79	-10.30	98.11	298.94	284.55
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.71	95.47	94.19	481.69	394.50
GFDLR-30 CON EF CO ₂	1.73	96.80	94.19	481.69	333.83
CCC SIN EF CO ₂	1.75	99.67	97.88	305.81	377.17
CCC CON EF CO ₂	1.76	100.76	97.88	305.81	321.39

Cuadro 8. Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de Veracruz.

Sitio Coatepec

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACION DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACION DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.71				
BASE	1.56		134.63	1070.68	476.00
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.14	-26.86	112.32	1258.84	429.26
GFDLR-30 CON EF CO ₂	1.08	-30.68	112.32	1258.84	353.16
CCC SIN EF CO ₂	2.05	31.52	114.53	800.00	428.11
CCC CON EF CO ₂	2.01	28.89	114.53	800.00	356.58
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.47	58.36	112.32	1258.84	427.47
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.60	66.24	112.32	1258.84	355.42
CCC SIN EF CO ₂	2.79	78.27	114.53	800.00	427.00
CCC CON EF CO ₂	2.92	86.76	114.53	800.00	358.05

Sitio Tuxpan

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACION DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACION DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.21				
BASE	1.24		117.72	924.33	492.17
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	0.92	-25.50	110.44	1070.28	489.67
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.91	-26.41	110.44	1070.28	409.72
CCC SIN EF CO ₂	1.33	7.09	111.11	668.50	499.55
CCC CON EF CO ₂	1.33	7.28	111.11	668.50	414.28
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.78	124.45	110.44	1070.28	512.67
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.88	133.04	110.44	1070.28	471.67
CCC SIN EF CO ₂	2.84	129.24	111.11	668.50	528.78
CCC CON EF CO ₂	2.96	130.34	111.11	668.50	463.05

Cuadro 9. Resultados de las simulaciones para escenarios base, de cambio climático y adaptaciones, en el Estado de Jalisco.

Sitio La Huerta

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	1.34				
BASE	1.31		121.84	527.08	359.08
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.00	-23.07	113.88	652.56	355.60
GFDLR-30 CON EF CO ₂	0.96	-26.17	113.88	652.56	291.20
CCC SIN EF CO ₂	1.04	-19.93	114.32	526.08	341.56
CCC CON EF CO ₂	1.00	-23.56	114.32	526.08	278.88
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.54	94.99	113.16	652.56	378.16
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.68	105.63	113.88	652.56	324.52
CCC SIN EF CO ₂	2.60	99.23	113.80	526.08	366.20
CCC CON EF CO ₂	2.76	111.48	114.32	526.08	315.00

Sitio Magdalena

ESCENARIO	RENDIMIENTO (ton/ha)	DIF (%)	ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (días)	PRECIPITACIÓN ESTACIÓN DE CRECIMIENTO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (mm)
OBSERVADO	2.60				
BASE	2.50		145.39	648.68	469.50
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	1.76	-29.54	126.00	831.50	409.07
GFDLR-30 CON EF CO ₂	1.71	-31.43	126.00	831.50	338.43
CCC SIN EF CO ₂	2.13	-14.95	125.93	655.25	410.64
CCC CON EF CO ₂	2.09	-16.47	125.93	655.25	340.96
AD1					
GFDLR-30 SIN EF CO ₂	2.82	12.68	125.86	844.36	410.64
GFDLR-30 CON EF CO ₂	2.96	18.20	125.86	844.36	353.86
CCC SIN EF CO ₂	2.87	14.96	125.71	668.25	409.71
CCC CON EF CO ₂	3.02	20.92	125.71	668.25	347.18

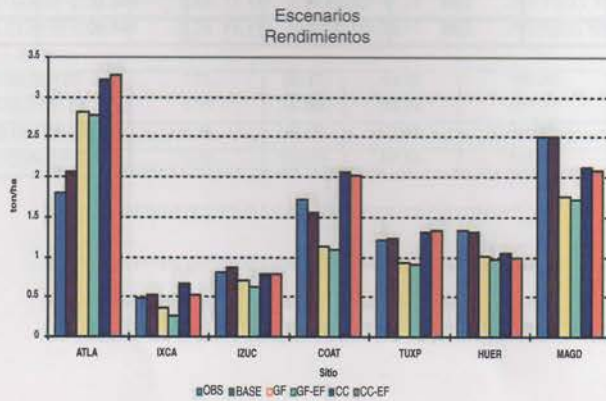


Figura 6. Comparación entre el rendimiento observado y los rendimientos simulados en los diferentes escenarios: GFDL-R30 y CCC sin efectos asociados a la duplicación de CO₂ (GF) y CC con efectos fisiológicos (GF-EF y CC-EF).

5.4 Adaptaciones

Se simularon diversas medidas de adaptación, se seleccionaron únicamente las que proporcionaron rendimientos significativos y se ordenaron en función del costo requerido para su aplicación. La medida de adaptación que resultó eficiente en todos los sitios fue la aplicación de fertilizante (urea), simulando o no los efectos fisiológicos asociados a la duplicación en la concentración de CO₂. Los resultados de este último caso se muestran en los cuadros 6 a 9, con las siglas AD1, y en la figura 7.

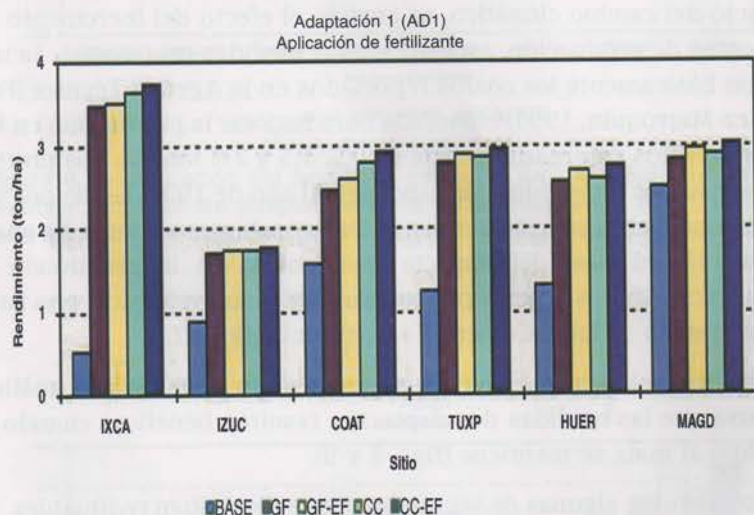


Figura 7. Rendimientos simulados al aplicar fertilizante como medida de adaptación en todos los sitios estudiados.

También se probaron otras medidas de adaptación combinadas con la anterior, como cambio en la fecha de siembra o cambio en la variedad de la semilla. En el último caso, los rendimientos obtenidos fueron notablemente altos con respecto a la producción actual. Sin embargo, no en todos los sitios sería posible aplicar dicha medida, si como se describe en el análisis de costos, se toma en cuenta su costo y la situación económica de los productores.

En todos los escenarios de cambio climático y en todos los sitios, hubo una disminución en la duración de la estación de crecimiento (15 días, en promedio); la mayor de ellas en Atlacomulco (28 días) y la

menor en Izúcar (6 días), como se ilustra en la columna 4 de los cuadros 6 a 9.

5.5 Análisis de costos

Se realizó un análisis de costos sumamente simple, que no supone variaciones con el tiempo ni los efectos inflacionarios. El objetivo básico de este análisis fue tener un marco económico mínimo que permitiera decidir la viabilidad económica de las medidas de adaptación propuestas.

Una vez seleccionadas las medidas de adaptación que mitigarían el impacto del cambio climático, se analizó el efecto del incremento en los costos de producción, asociados a las medidas propuestas. Se utilizaron básicamente los costos reportados en la Agenda Técnica (Fernández-Marroquín, 1995) elaborada para mejorar la producción en los casos de sitios con rendimientos de 0.5, 1.5 y 2.0 ton/ha. Los precios de los insumos requeridos corresponden al año de 1994. Se dio por supuesto que dichos precios permanecerían constantes a futuro. Se analizó también el caso del impacto que tendría en la producción la liberalización de los precios por tonelada de maíz en México; previstos por el Tratado de Libre Comercio a partir del siglo XXI.

Para todos los casos, excepto para el Estado de Puebla, el análisis muestra que las medidas de adaptación resultan benéficas cuando el subsidio al maíz se mantiene (figs. 8 y 9).

Sin subsidio, algunas de las medidas que resultaban redituables, se muestran no viables en función de los costos de producción; existe así disminución en la ganancia o inclusive pérdidas (figs. 10 y 11).

6. Discusión

La producción de maíz en México depende ante todo del clima. Los bajos rendimientos y la gran superficie siniestrada registrada año con año, son indicativos de que este cultivo no se desarrolla ni exclusiva ni fundamentalmente para su comercialización a gran escala.

La producción extensiva para el autoconsumo, muy vulnerable a los eventos climáticos extremos y al posible cambio climático, se realiza con semillas locales, adaptadas a las condiciones y patrones culturales de los sitios estudiados.

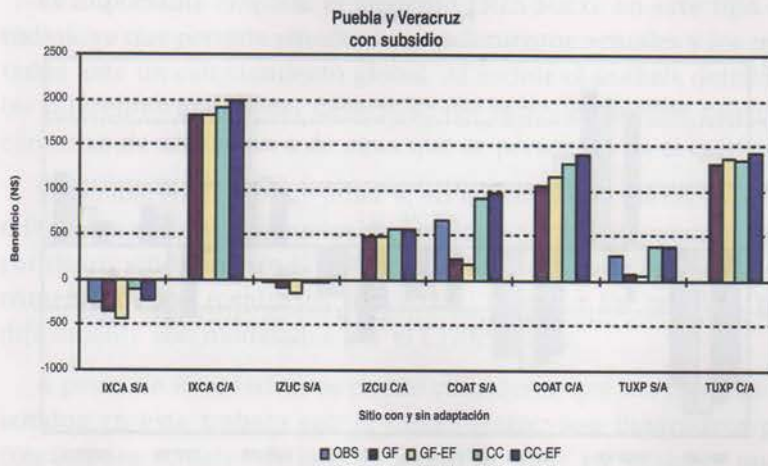


Figura 8. Comparación del beneficio, en pesos de 1994, para los sitios de Puebla y Veracruz sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que la producción de maíz continúa subsidiada.

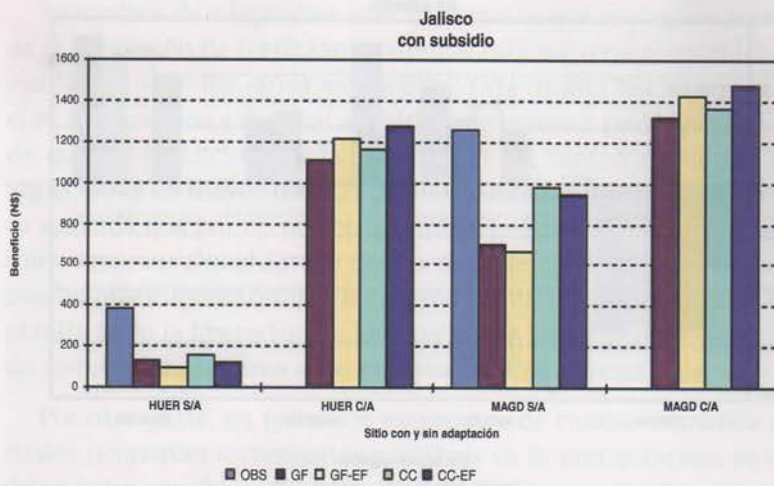


Figura 9. Comparación del beneficio, en pesos de 1994, para los sitios de Jalisco sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que la producción de maíz continúa subsidiada.

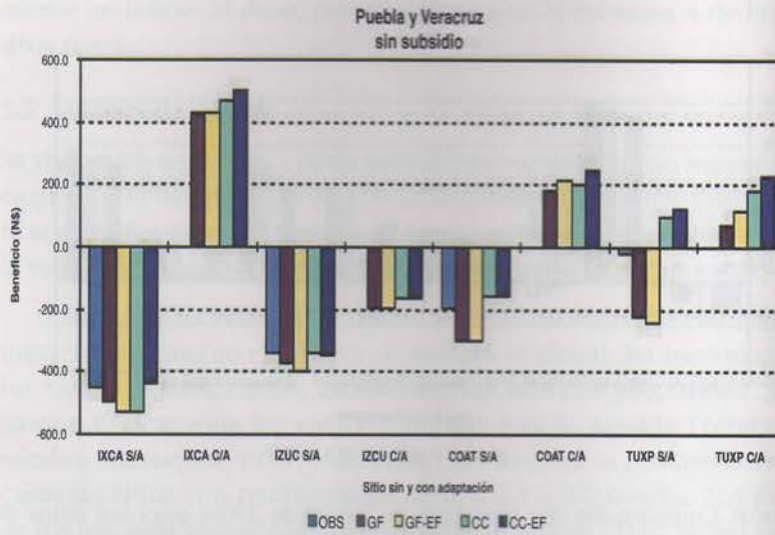


Figura 10. Comparación del beneficio, en pesos de 1994, para los sitios de Puebla y Veracruz sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que se ha retirado el subsidio a la producción de maíz.

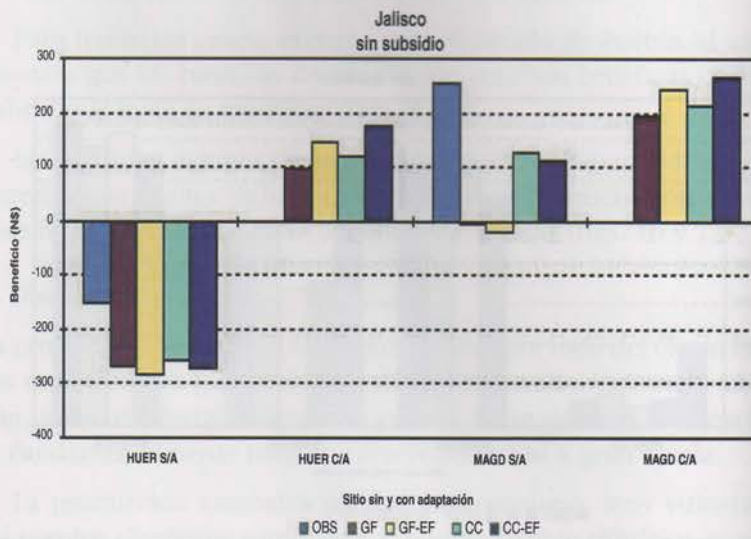


Figura 11. Comparación del beneficio, en pesos de 1994, para los sitios de Jalisco sin adaptación (S/A) y con adaptación (C/A), para cada escenario. Se considera que se ha retirado el subsidio a la producción de maíz.

Es importante emplear el Modelo CERES-Maize en este tipo de estudios, ya que permite simular los rendimientos actuales y los proyectados ante un calentamiento global. Al incluir el análisis detallado de las diferentes etapas del desarrollo del maíz, es posible calcular las carencias de nitrógeno o de agua que se presenten en el cultivo.

Sin embargo, la complejidad y, en ocasiones, la carencia de datos referentes al clima, los suelos, la fenología y los rendimientos históricos de los sitios en estudio, obligan a efectuar generalizaciones en detrimento de los resultados obtenidos. También las semillas locales difícilmente son modeladas por el CERES-Maize.

A pesar de lo anterior, se puede considerar que los resultados obtenidos en este trabajo con el CERES-Maize, son ilustrativos de las condiciones actuales de la producción de maíz en México y que permiten hacer proyecciones de los impactos ante el cambio climático.

Una conclusión importante de este trabajo es que no por fuerza el cambio climático impactaría negativamente al cultivo de maíz, sobre todo en el caso de las regiones altas de México. Sin embargo, este resultado tendría que analizarse en el marco de los estudios de erosión del mismo Estudio de País: México.

La medida de adaptación más importante que se sugiere aquí, es la de la aplicación de fertilizante, aunque ésta no sería económicamente viable en todos los sitios estudiados. Este último hecho se agravaría si se retiraran los subsidios al cultivo. Lo anterior puede ser indicativo de que las condiciones y la producción del campo en México serían impactadas en mayor medida por los cambios en la política económica aplicada que por un posible cambio climático. En cualquier caso, un calentamiento global futuro resalta la urgencia de diseñar estrategias mucho más coherentes que las existentes en la política agraria actual, planificando la liberación de los precios de los insumos y desarrollando sistemas de seguros a los cultivos básicos en este país.

Por otra parte, en todos los escenarios de cambio climático en los cuales ocurrirían incrementos positivos en la precipitación, se obtendrían bajas sensibles en los rendimientos. Este sorprendente resultado se relaciona con la necesidad de aplicación de fertilizante al suelo. De la misma manera explica porqué la irrigación no resultaría una medi-

da de adaptación viable. Si se efectuara un análisis de suelos más minucioso en los sitios seleccionados, posiblemente se modificaría este resultado.

En estudios posteriores sería necesario enriquecer las bases de datos requeridas para el funcionamiento óptimo del CERES, tanto para maíz como para otros cultivos, como el frijol y el trigo. En particular, se podría enriquecer el CERES con información sobre las plagas que afectan estos cultivos.

Por último, y para enmarcar los resultados que se obtienen con el modelo, sería necesario incluir como factores importantes en el análisis, las tendencias históricas de la producción real, las proyecciones de la política agraria en México (por ejemplo, en las formas de tenencia de la tierra) y las adaptaciones a los cambios extremos que históricamente han aplicado los productores afectados.

Referencias bibliográficas

- Conde, C., O. Sánchez, V. Magaña, C. Gay, 1995, "Escenarios climáticos básicos y regionales", en *México ante el Cambio Climático. Segundo Taller de Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 39 - 44.
- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villarreal, C. Gay, 1997, "Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change", en *Climate Research*, 9 (1 and 2), pp. 17 - 23.
- INEGI, 1994, VII Censo Agrícola-Ganadero de los Estados Unidos Mexicanos, México, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- IPCC, 1995, Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis, Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, pp. 427 - 467.
- Fernández-Marroquín, O., 1995, Jefe del programa de Fomento Agrícola, Delegación Puebla, SARH, Comunicación personal.
- Jones, C.A. and J.R. Kiniry (eds.), 1986, CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development, Texas A&M Press, College

Station, 194 pp.

- Liverman, D., M. Dilley, K. O'Brian, L. Menchaca, 1994, "Possible Impacts of Climate Change on Maize Yields in Mexico", en *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study*, Cynthia Rosenzweig and Ana Iglesias, (Eds), EPA.
- Magaña, V., 1995, "A Strategy to Determine Regional Climate Change", en *México ante el Cambio Climático. Memorias. Primer Taller de Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 45 - 51.
- Parry, M., 1993, "Climate change and the future of Agriculture", en *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 3, Nos. 1 - 3, pp. 13-30.
- Ritchie, J., U. Singh, D., Godwin and I. Hunt, 1989, A User's Guide to CERES - Maize V2.10, Michigan State University, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, EUA.
- Rosenzweig, C., J. Jones, 1990, Climate Change Crop Modeling Study, Handbook. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy, Planning and Evaluation, U.S. Agency for International Development S&T/AGR/RNRM, 31 p.

Capítulo VII Energía e industria

LA VULNERABILIDAD DE LA INDUSTRIA Y LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

María Teresa Sánchez Salazar* y Maribel Martínez Galicia*

Resumen

Los diversos giros industriales y los sistemas energéticos tienen entre sí diferencias notables en su grado de sensibilidad climática, lo cual necesariamente influye en su nivel de vulnerabilidad ante un cambio climático global. Ello se debe a una serie de factores de diversa índole, entre los que se puede mencionar la relación directa con los recursos naturales, los procesos industriales, los mercados o la ubicación geográfica, entre otros.

Por otra parte, estas diferencias entre los grados de sensibilidad climática se combinan entre sí de manera más o menos compleja, pues existen sectores industriales cuya ubicación geográfica es preferentemente dispersa, en tanto que otros tienden a concentrarse en áreas urbanas. La combinación territorial de los sectores industriales y los sistemas energéticos, y de diversos grados de sensibilidad frente a un cambio climático, provoca diferencias regionales y locales marcadas, en términos de vulnerabilidad. De ahí que en este trabajo se presenten, para el caso de México, las diferencias territoriales en el comportamiento de ambos sistemas, considerando una situación de cambio global, con base en la aplicación de los modelos CCC y GFDL-R30.

Palabras clave: vulnerabilidad, sensibilidad climática, energía, industria, mercados.

* Instituto de Geografía, UNAM.

1. Introducción

Este trabajo tiene como objetivos destacar los factores que inciden en la vulnerabilidad de la industria y de los sistemas energéticos ante un posible cambio climático y su nivel de incidencia; determinar la dinámica de su comportamiento territorial, en particular los sectores más vulnerables ante el cambio climático, tomando como referencia el escenario base; y, finalmente, definir las particularidades y diferencias regionales que hay en México en el comportamiento de la industria y los sistemas energéticos, considerando una situación de cambio climático global, con base en la aplicación de los modelos de circulación general *Canadian Climate Center Model (CCC)* y *Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL-R30)*.

2. Metodología

La metodología puede resumirse en los siguientes pasos: primero se determinaron los factores que influyen en la vulnerabilidad de la industria y de los sistemas energéticos y su nivel de incidencia y, segundo, se realizó un diagnóstico, tanto en el marco de un escenario base o actual, como en el caso de que llegara a presentarse un cambio climático. Para lograr esto último, se determinó la dinámica del comportamiento territorial y se definieron las particularidades y diferencias regionales que se presentan en México, con base en la aplicación de los modelos GFDL-R30 y CCC.

3. Marco de referencia

En la elaboración de este estudio, se partió de las siguientes premisas:

- a) Existe una escasez de estudios sobre la sensibilidad de los sectores industrial y de energía al cambio climático, debido a la percepción de su relativamente baja sensibilidad y de su alto poder de adaptación, en comparación con otros sectores. Asimismo, hay una ausencia de estudios regionales relativos a los impactos del cambio global en la población y en las actividades económicas de nuestro país.
- b) Los estudios realizados sobre energía e industria centran su atención en la mitigación del cambio climático mediante de la reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero.

c) La mayor parte de la literatura sobre el tema se refiere a los países desarrollados, y considera los impactos potenciales del cambio climático, al tomar como base los patrones de actividad existentes en ellos. Es decir, se hace abstracción de la tendencia de los cambios socioeconómicos mundiales y de la gran cantidad de factores que los afectan, entre ellos, la coyuntura internacional por los procesos de globalización económica a nivel mundial.

Un primer factor que incide en la vulnerabilidad de estos sistemas está relacionado con la importancia que tienen ambos dentro de la economía de un país, es decir, su participación en el producto interno bruto, puesto que, una vez que se ha determinado su grado de vulnerabilidad, es posible inferir la forma en que dicha vulnerabilidad afectaría a la economía del país en su conjunto.

Otro aspecto importante es que, tanto el sector energético (en particular por el empleo de combustibles fósiles en las centrales termoelectricas) como el industrial, guardan una relación biunívoca con el cambio climático global (CCG), porque ambos sectores son los que más contribuyen a la acumulación de gases invernadero en la atmósfera. Por lo tanto, otro hecho que se puede inferir de ello es que las áreas en donde se concentra la infraestructura de dichos sectores económicos serán también las más afectadas por las acciones encaminadas a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otra parte, la capacidad de adaptación de las empresas al CCG dependerá de la posibilidad económica que tengan para contar con sistemas tecnológicos modernos que se ajusten en forma dinámica a sus necesidades. Ello dependerá, en primera instancia, de la envergadura de las operaciones de las empresas y de su estructura empresarial. Las empresas más grandes serán menos vulnerables en este sentido, por tener mayor capacidad económica para adaptarse a las nuevas condiciones climáticas y adoptar tecnologías para mitigar las emisiones.

A continuación se exponen otros factores que influirán en la mayor o menor vulnerabilidad de estos sectores.

Uno de los efectos del cambio climático sería el ascenso del nivel del mar; de ahí que una ubicación costera en donde se espere un as-

censo más marcado de este nivel, será por tanto desventajosa. Las instalaciones industriales o de generación de energía, localizadas en la costa, serán más vulnerables, al igual que las terminales de abastecimiento y distribución de hidrocarburos y sus derivados, y la infraestructura de conexión (carreteras, vías férreas) con la misma ubicación.

Otro efecto del cambio climático, sería el ascenso de temperatura, que se reflejaría, en primera instancia, en un aumento de la evaporación y de la evapotranspiración, y en una reducción de la precipitación y de los escurrimientos, lo que incidiría, en un plazo mediano, en la aceleración de los procesos de desertificación y de redistribución del recurso hídrico. En consecuencia, la vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos estaría en función de sus necesidades de abastecimiento de determinados volúmenes de agua, de la regularidad con que se requieren dichos abastos y del clima donde se ubica la empresa. Así, a mayor volumen requerido, el abasto sería más constante, el clima más seco y la empresa correspondiente sería más vulnerable. En este último caso, es decir, en las zonas secas, en las cuales existe una mayor presión y competencia sobre los recursos hídricos, la vulnerabilidad de las empresas industriales y generadoras de energía se incrementaría; por ejemplo, en las zonas donde coexisten la agricultura de riego, el abastecimiento urbano, la industria y la generación de electricidad.

Las centrales eléctricas tienen una demanda de agua variable. En las hidroeléctricas, el consumo es elevado, pero se trata sólo de agua turbinada, por lo tanto, no tiene una utilización única, sino que se comparte con otros usos. En cambio, las termoeléctricas pudieran requerir de un menor consumo de agua en cuanto a volumen, pero su uso es más directo y es para dos fines; uno como materia prima del proceso de generación de energía en las centrales de vapor, y otro como agua de enfriamiento. En ambos casos, bajo condiciones de aridez, en que el agua utilizada no siga procesos de reciclaje, la vulnerabilidad sería alta.

Las modificaciones en la precipitación implican variaciones en el costo de obtención del agua; donde el agua comience a escasear habría que incrementar las inversiones para obtenerla y asegurarse un abasto continuo, de tal manera que su precio sufriría un incremento,

y ello repercutiría en el costo de obtención de la energía eléctrica, y en el de extracción y refinación de los combustibles fósiles.

El aumento en la temperatura, como efecto directo del CCG, sería diferencial geográficamente; esto necesariamente afectaría a aquellas empresas que demandan energía para los procesos industriales de calentamiento o enfriamiento. En el primer caso, la vulnerabilidad disminuiría porque el calentamiento atmosférico implicaría un ahorro en el consumo de energía y de electricidad para el desarrollo de los mismos (por ejemplo, la industria siderúrgica y metalúrgica); en cambio, se incrementaría la vulnerabilidad de aquellas empresas que requieren de procesos de enfriamiento o congelación, en zonas en las cuales se incremente la temperatura, como es el caso de las industrias pesqueras o empacadoras de productos ganaderos y agrícolas perecederos, que requieren cámaras de refrigeración o congelación.

Las variaciones en la distribución del agua y la temperatura tendrían efectos sobre el uso del suelo y la distribución de los seres vivos, sean cultivos, ganado o asociaciones vegetales naturales. Ante esta situación, las industrias más vulnerables serían las que dependen de materias primas derivadas de actividades como la extracción de madera, la producción de papel, la industria textil, la alimentaria, la del cuero y las empacadoras de productos del mar, entre otras.

Por lo tanto, existen diferencias entre los diversos giros de la industria, en cuanto a su sensibilidad hacia el clima. En este sentido, las industrias se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- A) **Industrias que dependen de recursos naturales sensibles al clima:** agropecuarios, forestales, marinos, agua y energía. Por lo tanto, las industrias más afectadas serían: la alimentaria, la de bebidas y tabaco; la textil; la de celulosa y papel; la maderera y la de energéticos renovables. De todas ellas, las más sensibles son las agroindustrias y la industria pesquera.
- B) **Industrias cuyo proceso industrial es directamente sensible al clima:** tanto por sus consumos de agua y energía y, por ende, por los costos de los mismos, como por la incorporación de procesos de calentamiento o enfriamiento.

Las industrias y los sectores más afectados por la sensibilidad de su proceso industrial al clima, son:

1. Producción de energía eléctrica. Ésta es vulnerada por las siguientes razones:

- a) En el caso de las centrales termoeléctricas, éstas requieren de elevados volúmenes de agua como insumo para generar el vapor y para enfriamiento. Si se reduce la disponibilidad de agua, disminuyen las operaciones de generación de electricidad; en condiciones extremas, los niveles de agua pueden desplomarse por debajo del mínimo indispensable para el funcionamiento de la central. Asimismo, la eficiencia en la generación de electricidad, a partir de vapor y gas, puede afectarse en forma negativa con un incremento en la temperatura; lo mismo ocurre con la capacidad de transmisión de las líneas eléctricas, que disminuye cuando se incrementan las temperaturas.
- b) Por su parte, la generación de hidroelectricidad puede verse afectada por un cambio en la precipitación, o en las condiciones que afectan la evaporación, a partir de un embalse. Muchas plantas hidroeléctricas sirven a múltiples propósitos; el CCG podría afectar a la hidroelectricidad a través de la presión sobre otros sistemas. En ese caso, las operaciones hidroeléctricas deben recalendarizarse, para adaptarse a las necesidades de irrigación y de abasto de agua a los centros de población, más que a los picos de la demanda de energía.

2. Producción de petróleo y gas. Se ve afectado por el consumo de energía y de agua, y porque las plataformas marinas son vulnerables al ascenso en el nivel del mar por el incremento en el oleaje.

3. Industria de fundición y refinación de metales. En este caso destacan la industria del aluminio, la siderúrgica que utiliza hornos eléctricos, y la metalúrgica; la primera requiere de un alto consumo de hidroelectricidad.

4. Industria alimentaria. Principalmente por el empleo de sistemas de almacenamiento y conservación que utilizan refrigeración o congelación.

5. Industria textil. Esta industria consume grandes volúmenes de agua en los procesos de teñido y limpieza.

C) **Industrias cuya localización es vulnerable ante el CCG:** como ocurre con las costas, o en la ribera de ríos susceptibles a inundacio-

nes. En este caso, se trata de industrias cuya ubicación obedece a sus necesidades de abastecimiento de materias primas, su acceso a las rutas de transporte, a los energéticos o a la disponibilidad de agua. Las industrias más afectadas por este factor, en el caso mexicano, serían: la petrolera, la petroquímica y la química; las centrales eléctricas, la siderúrgica, la pesquera y algunos ingenios azucareros.

D) **Industrias cuyos mercados son sensibles al CCG:** el cambio climático influirá en la demanda de energía y, en consecuencia, en la necesidad de invertir en la construcción de nuevas centrales y en otras instalaciones de abastecimiento. Asimismo, la demanda de ropa, bebidas y aire acondicionado, se vería afectada. Por otra parte, se modificará la demanda de agua, por lo que sería necesario invertir en nuevas obras de abastecimiento de agua. Por lo tanto, los sectores más afectados serían: el de producción de energía, las industrias del aire acondicionado, del vestido y de bebidas.

Estas dos últimas, aunque puedan ser vulnerables a un aumento en la demanda de ciertos productos, suelen ser más flexibles, dada su mayor sensibilidad a los cambios en las preferencias de los consumidores.

Los cuadros 1 y 2 sintetizan los aspectos anteriores y señalan cuáles son los sectores y subsectores, *a priori*, más sensibles al clima. Como puede observarse, tanto en el sector energético como en el industrial confluyen una serie de factores que los hacen ser sensibles al clima, casi en igual medida. En el primer caso, tanto la industria petrolera como la generación de electricidad son altamente sensibles, porque se suman en ellas varios factores, entre los que destacan la ubicación geográfica, el que sus procesos industriales y mercados son influidos por las variaciones climáticas y por la influencia que ambos subsectores tienen en la emisión de gases de efecto invernadero; de los tipos de centrales eléctricas, las más vulnerables son las que utilizan como insumo el agua, como las centrales termoeléctricas convencionales y las hidroeléctricas.

Por su parte, la industria de transformación parece ser menos sensible que la pesada, en virtud de que en la industria pesada tienden a predominar los establecimientos mayores y, los consumos de agua y

energía son superiores; en la industria de transformación el número de factores que inciden en la vulnerabilidad es mayor, aunque los consumos de materias primas o insumos sean inferiores y eso puede hacer que, en apariencia, la vulnerabilidad sea menor.

Dentro del subsector de la industria pesada, las más sensibles al clima son la petroquímica, la química, la siderúrgica y la metalúrgica; en tanto que las industrias papelera, alimentaria (frutas, hortalizas, azucarera y pesquera), y textil son las más sensibles en el subsector de la industria de transformación.

Cuadro 1. Factores y grados de sensibilidad climática de los sistemas energéticos y la industria.

FACTORES DE VULNERABILIDAD	Proceso industrial sensible al clima											Grados de vulnerabilidad			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	#			
SECTORES ECONÓMICOS															
1. SECTOR ENERGÉTICO	A	A	M	A	A	A	A	(-)	A			A	A8 M1 (-)	MUY ALTA	
Industria petrolera	A	A										A	A7	MUY ALTA	
Electricidad	S	A	A	A	A	A						M	A7 M1 B1	MUY ALTA	
Hidroeléctrica	S												A4 B2	ALTA	
Termoeléctrica	S	A	A	A	A	A	(-)					A	A8 B1 (-)	MUY ALTA	
Ciclo combinado	S	M	M	M	M	M	(-)					M	M7 B1 (-)	MEDIA	
Turbogás	S	M	S	S	M	S	S	(-)				M	M3 B5 (-)	BAJA	
Carboeléctrica	S	A	A					(-)				A	A6 B1 (-)	MUY ALTA	
Geotérmica	S	M										M	M3 B2 (-)	MEDIA BAJA	
Nuclear	S	M										A	A2 M3 B2 (-)	MEDIA	
Diesel	S	M	S	S	M	S	S	(-)				M	M3 B6 (-)	BAJA	
Energías renovables	S											M	A2 M1 B2	MEDIA	
2. SECTOR INDUSTRIAL	A	A	A	M	A	A	A					M	B	A6 M2 B1	ALTA
2.1. INDUSTRIA PESADA	A	A	A					(-)	M	M	B		A6 M2 B1 (-)	ALTA	
Siderúrgica	M	A	A					(-)	M	M			A5 M3 (-)	ALTA	
Metalúrgica	M	A	A					(-)	S				A5 M1 B1 (-)	ALTA	
Minería	S	M	A					(-)	S				A4 M1 B2 (-)	MEDIA ALTA	
Petroquímica	A	A	S						A	A			A7 B1	MUY ALTA	
Química	A	A	M						A	M			A6 M2	ALTA	
Maquinaria y equipo (aire acond.)	A	M	S						S	A			A3 M3 B2	MEDIA ALTA	
Metalmeccánica	A	M	S						S				A2 M3 B2	MEDIA	
Materiales de construcción	M	A	M						S				A3 M3 B1	MEDIA ALTA	
2.2. INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN	A	S	M						M	M	S	B	A4 M4 B3	MEDIA ALTA	
Alimentaria	A	S	S						A	M	S	B	A4 M2 B5	MEDIA ALTA	
Empacadora de granos	A	S	S						S				A1 M1 B5	BAJA	
Prod. de alimentos balanceados	A	S	S						S				A1 M2 B4	MEDIA BAJA	
Empacadoras de frutas	A	S	S						A			M	A4 M2 B3	MEDIA ALTA	
Empacadoras de hortalizas	A	S	S						A				A4 M1 B3	MEDIA ALTA	
Azucarera	A	A	M									M	A5 M4	MEDIA ALTA	
Bebidas	A	S	M						A	M		M	A3 M6 B1	MEDIA	
Pesquera	A	S							A	A			A4 M2 B2	MEDIA ALTA	
Textil, cuero y vestido	M	A	A						M	M		M	A4 M5 B1	MEDIA ALTA	
Madera	S	S	S						S	S			A1 B6	BAJA	
Papel y celulosa	M	A	M									M	A5 M3	ALTA	

- 1. PIB
- 2. Influencia en el CCG
- 3. Clima
- 4. Dependencia de recursos naturales sensibles al clima
- 5. Consumo de energía (petróleo)
- 6. Consumo de agua
- 7. Competencia por el agua
- 8. Proceso de calentamiento
- 9. Proceso de enfriamiento
- 10. Ubicación costera
- 11. Ubicación junto a ríos
- 12. Mercado sensible al clima
- (-) Disminución de la sensibilidad ante un cambio climático

Fuentes: Acosta Moreno, R. y Siles, J., 1994. *Industry, Energy and Transportation: Impacts and Adaptation*. IPCC Working Group 2: Subgroup A. Kashwagi, Takao, 1994. *Mitigation Options*. Industry, IPCC Working Group 2: Subgroup A. Sánchez-Salazar, M.T. (1995). "Marco de referencia sobre la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y la industria ante el Cambio Climático Global: el caso de México". *México ante el Cambio Climático. Memorias Primer Taller Estudio de País: México*. Cuernavaca, Mor. 18 - 22 abril 1994. INE/US. Country Studies Program Support for Climatic Change Studies. C/C/CCA.

Cuadro 2. Grados de sensibilidad climática de los sectores energético e industrial.

SECTORES ECONÓMICOS	Grados de Sensibilidad
1. SECTOR ENERGÉTICO	MUY ALTA
Industria petrolera	MUY ALTA
Electricidad	MUY ALTA
Termoeléctrica	MUY ALTA
Carboeléctrica	MUY ALTA
Hidroeléctrica	ALTA
Ciclo combinado	MEDIA
Energías renovables	MEDIA
Nuclear	MEDIA
Geotérmica	MEDIA BAJA
Turbogás	BAJA
Diesel	BAJA
2. SECTOR INDUSTRIAL	ALTA
2.1. INDUSTRIA PESADA	ALTA
Petroquímica	MUY ALTA
Química	ALTA
Siderúrgica	ALTA
Metalúrgica	ALTA
Minería	MEDIA ALTA
Maquinaria y equipo (aire acond.)	MEDIA ALTA
Materiales de construcción	MEDIA ALTA
Metalmecánica	MEDIA
2.2. INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN	MEDIA ALTA
Papel y celulosa	ALTA
Textil, cuero y vestido	MEDIA ALTA
Alimentaria	MEDIA ALTA
Azucarera	MEDIA ALTA
Empacadoras de hortalizas	MEDIA ALTA
Empacadoras de frutas	MEDIA ALTA
Pesquera	MEDIA ALTA
Bebidas	MEDIA
Prod. de alimentos balanceados	MEDIA BAJA
Empacadora de granos	BAJA
Madera	BAJA

Fuente: Cuadro 1.

4. Diagnóstico de los sectores industrial y energético y su distribución geográfica.

En 1990, los sectores industrial y energético participaban con 30.7% del PIB total. Ambos sectores están altamente concentrados desde el punto de vista espacial, porque solamente el Distrito Federal y el Estado de México reúnen 38% del PIB en dichos rubros, seguidos de Nuevo León, Jalisco y Veracruz, cuyo PIB en el sector secundario va de 6% a 8%. El resto de las entidades no sobrepasa 4% del PIB secundario nacional (INEGI, 1993).

Dentro del sector energético, el subsector petrolero también está muy concentrado. Entre Campeche y Tabasco concentran 77% del PIB del sector, Veracruz y Chiapas juntos representan 15% del mismo, y los otros tres estados del noreste fronterizo se reparten el porcentaje restante del PIB petrolero. Por su parte, la producción de carbón y coque se deriva casi totalmente de Coahuila. En contraste, la distribución geográfica del subsector eléctrico abarca todo el país (INEGI, 1993).

Por su parte, el PIB manufacturero también se concentra en unas cuantas entidades, en virtud de que la industria, por lo general, tiende a ubicarse donde existan mayores ventajas por el factor de aglomeración en las ciudades grandes. Así, entre el D. F. y el Estado de México concentran 41% del PIB manufacturero, le siguen Nuevo León, Jalisco y Tlaxcala, con porcentajes entre 5% y 10%; y el resto del país concentra menos de 3% del mismo (INEGI, 1993).

De los subsectores de la industria manufacturera, los de la industria pesada o de equipamiento son los más concentrados geográficamente, en virtud de que son los que más buscan las ventajas de las economías de escala.

La minería está ampliamente distribuida por diversos puntos del país, principalmente en el centro y norte-noroeste. Las grandes empresas mineras se caracterizan por su grado de modernización tecnológica, que implica el empleo de cada vez menor número de trabajadores mineros y, por ende, un consumo cada vez mayor de energía. Así, en algunos sitios mineros del noroeste, norte y centro-norte, donde se desarrollan actividades de gran envergadura, los con-

sumos energéticos y de agua suelen ser elevados y, por tratarse además de zonas secas y, en ocasiones, densamente habitadas, tienden a ser más sensibles al clima (Coll-Hurtado y Sánchez-Salazar, 1991).

La industria siderometalúrgica y metalmecánica -se trata siempre de grandes empresas-, se concentra en unos cuantos puntos del país: el acero se produce en Monclova-Frontera, Lázaro Cárdenas, Monterrey, Xoxtla, Xicoténcatl y Guadalajara. En San Luis Potosí hay dos importantes fundiciones de cobre y zinc. De estos sitios, cuatro de ellos se ubican en zonas áridas y semiáridas, lo que hace que ejerzan una presión importante sobre los recursos hídricos de su zona de influencia, además de que corresponden a zonas densa o medianamente pobladas. Por su parte, este tipo de industrias también tiene fuertes consumos de energía (Sánchez-Salazar, 1991). Ambos factores hacen que estos cuatro sitios sean altamente sensibles al clima. Hay otros lugares ubicados en zonas templadas, pero con altas concentraciones demográficas, lo que les hace competir con las ciudades por el agua y la energía. Finalmente, Lázaro Cárdenas, Michoacán suma a estas características su ubicación costera.

La industria química y petroquímica, también concentrada en los tres grandes centros urbanos del país, muestra una distribución geográfica vinculada con la ubicación de los centros de consumo urbanos y rurales; en este último caso están las industrias productoras de fertilizantes. En este sentido sobresale la zona del Bajío y los distritos de riego del sur de Sonora, Camargo, Viesca, Linares, Zacapu e Ixhuatlán del Sureste. La industria química es importante consumidora de energéticos y agua, y los sitios más vulnerables son los de las zonas áridas y los costeros, por el riesgo que tienen ante el ascenso del nivel del mar, como el caso de Matamoros, Altamira y Veracruz. El D.F. y México son los que concentran 49% del PIB químico y petroquímico, seguidos por Veracruz, con sus importantes complejos del sureste del estado, Nuevo León, Jalisco, Guanajuato y Tamaulipas (INEGI, 1993).

La industria del vidrio también muestra una elevada concentración en los tres grandes centros industriales del país, además de Querétaro, Toluca, Orizaba, Mexicali y Acayucan. Esta industria demanda elevados volúmenes de energía, aunque inferiores a la petroquímica y a las metálicas, y su vulnerabilidad estriba en su ubicación en los sitios

áridos y secos del norte. La producción de otros materiales de construcción está más ampliamente distribuida en el país aunque los grandes centros urbanos y sus áreas de influencia tienden a ser nuevamente los lugares preferidos para el asentamiento de estas empresas, de las cuales destaca la industria cementera como demandadora importante de energía, concentrada principalmente en el estado de Hidalgo.

Por su parte, las industrias de transformación repiten el esquema de las anteriores, aunque en los casos de la industria alimentaria y papelería, su patrón de distribución suele ser más disperso, en contraste con las industrias textil y maderera, que se concentran en unas cuantas entidades.

Por razones del proceso industrial, la industria azucarera se ubica en zonas tropicales y subtropicales, junto a su zona cañera de influencia directa. Los ingenios azucareros consumen elevados volúmenes de combustibles y de agua, por los procesos químicos que se verifican para extraer las impurezas a la caña. Ésta es la razón de que los ingenios, en algunos casos, se ubiquen junto a ríos importantes, como el Papaloapan y sus afluentes, en terrenos con alto riesgo de inundaciones. La capacidad de molienda de los ingenios tiene una relación directa con el volumen de energía y de agua necesarios para su funcionamiento.

Las agroindustrias derivadas de la ganadería, tales como las plantas pasteurizadoras de leche, las empacadoras de carne y los rastros, se distribuyen ampliamente por el territorio nacional, alrededor de las áreas urbanas más importantes. Su sensibilidad, radica en su dependencia de las zonas de distribución de las materias primas.

Las agroindustrias procesadoras de alimentos balanceados están ampliamente distribuidas en las localidades que funcionan como centros de áreas ganaderas y sorgueras importantes: el sureste y centro de Veracruz, el Bajío, el Estado de México, el norte de Sinaloa y el sur de Sonora, la Comarca Lagunera, Matamoros, Delicias y Monterrey. En la gran mayoría de los casos se trata de zonas incluidas en el trópico húmedo y el trópico seco. En este último caso estarían las áreas más susceptibles a los cambios climáticos.

La industria pesquera, por su ubicación casi exclusiva a lo largo de la costa, es susceptible al riesgo que implica el ascenso del nivel del mar,

particularmente en la costa del Golfo de México. A esta característica se suma su dependencia de los sistemas de refrigeración y congelación para la conservación de sus productos, y la presencia de la materia prima, los peces, con sus fluctuaciones estacionales y espaciales.

Finalmente, las industrias textil y papelera también se concentran geográficamente en las principales ciudades y en los centros de acopio de la producción de algodón, en el primer caso, y de bosques, para la producción de papel, en el segundo. Se trata de industrias que necesitan de grandes cantidades de agua en sus procesos químicos, además de requerir, en el segundo caso, la presencia próxima de la materia prima.

5. Escenario base

5.1. Los sistemas energéticos

De la evaluación realizada *a priori*, se determinó que la industria petrolera se clasifica, por sus características, en el nivel de sensibilidad climática muy alta. Sin embargo, dadas las características actuales del clima en el cual se asientan las instalaciones petroleras y, de acuerdo con la importancia regional de las mismas, se pueden establecer algunas diferencias geográficas.

Zonas de sensibilidad muy alta. Se ubican en la Región Marina y la Región Sur, según la división de Pemex, y concentran 96.4% de la producción de petróleo y 95.8% de la de gas natural, a nivel nacional (Pemex, 1995). Se concentran en el sureste de Veracruz, Tabasco, norte de Chiapas, el Distrito de Ocosingo y la Sonda de Campeche. Asimismo, entrarían en este nivel las localidades de Tula, Minatitlán y Salina Cruz, por tratarse de las refinerías de mayor capacidad de producción.

Zonas de sensibilidad alta: Salamanca, Ciudad Madero y Cadereyta, que corresponden a climas secos y semicálidos, donde se ubican las refinerías de mediana capacidad.

Zonas de sensibilidad media: Poza Rica, que corresponde a clima semicálido, donde se ubica una refinería de baja capacidad de producción.

Zonas de sensibilidad media-baja: forma parte de esta zona el distrito productor de gas de Reynosa, el tercero más importante del país, con una producción de 12.9% del total.

Zonas de sensibilidad baja: a este nivel pertenecen los distritos petroleros de Altamira, Poza Rica, Veracruz y Agua Dulce, actualmente con un ritmo de producción muy bajo (6% de la producción total).

En cuanto a las centrales eléctricas, las hidroeléctricas tienen una sensibilidad alta al cambio climático por manejar un insumo sensible a dicho cambio, de por sí vulnerable en las zonas áridas, en los que los embalses tienen usos múltiples. En las zonas templadas, la vulnerabilidad no reside en la falta del recurso hídrico, sino en el alto costo del agua, debido a que ésta se utiliza para las grandes zonas urbanas. En el resto del país, la vulnerabilidad de las plantas hidroeléctricas sería baja o media, en virtud de que se trata de centrales de gran capacidad, con bajos costos del agua, y con grandes ventajas climatológicas, además de tener poca competencia en cuanto a otros usos del agua.

Por su parte, las centrales termoeléctricas, que trabajan con vapor, tienen una sensibilidad climática muy alta, en virtud de que se ubican preferentemente en las zonas del país con recursos hídricos más limitados (climas áridos cálidos y semicálidos, secos cálidos y semicálidos, secos templados y cálidos subhúmedos), además de que existe una mayor competencia por esos recursos hídricos, dado que se localizan en las áreas urbano-industriales o colindantes con zonas agrícolas de riego.

5.2. El sector industrial

La minería se clasifica como un sector de sensibilidad climática media-alta, tanto por sus consumos energéticos e hídricos, como por desarrollarse habitualmente en zonas de climas áridos y semiáridos. Sin embargo, ese nivel de sensibilidad se ve agudizado, cuando se trata de unidades con capacidades de producción muy altos o donde los consumos energéticos se hacen más intensivos, por existir fundiciones metálicas y refinerías de metales, como ocurre en Cananea y Nacozari, con las fundiciones de cobre; San Luis Potosí, con la fundición de cobre y la refinería de zinc; en Tamós, Veracruz y Teziutlán, Puebla, con las plantas de ferroaleaciones de manganeso; y Manzanillo, Colima, con la pelletizadora de hierro. En todos estos lugares, la sensibilidad climática es muy alta. En el resto de las zonas mineras del país, la sensibilidad climática de la minería será media-alta, y sólo en las salinas de Guerrero

Negro y la productora de yeso de Isla del Carmen, en Baja California Sur, la sensibilidad climática será media.

Por su parte, la industria pesada, según el subsector de que se trate, tiene una sensibilidad climática que varía desde muy alta para la petroquímica, alta para la metálica básica y la química, media-alta para la industria del cemento y el vidrio y media para la metalmecánica. Pero, la situación se complica aún más, si se considera que estas industrias no están aisladas en el espacio, sino que tienden a formar aglomeraciones geográficas en zonas urbano-industriales, de manera que los niveles de sensibilidad se suman.

Las zonas industriales de vulnerabilidad más alta son las de México, Monterrey y Guadalajara, en primer lugar, junto con Coatzacoalcos-Cosoleacaque-Minatitlán, Veracruz; Ciudad Madero, Tamaulipas; Salamanca, Guanajuato; Tuxtepec, Oaxaca; Poza Rica, Veracruz; Salina Cruz, Oaxaca; el norte de Chiapas; y Puebla, Puebla. En este caso se trata de las mayores concentraciones industriales del país, o donde se ubica la industria petroquímica de Pemex.

Las zonas industriales de vulnerabilidad alta corresponden a aquellas en las cuales está la industria metálica básica y química: Nacoziari, Cananea y Ciudad Obregón, Sonora; Chihuahua y Camargo, Chihuahua; Monclova y Saltillo, Coahuila; Nuevo Laredo, Tamaulipas; Torreón-Gómez Palacio y Durango; corredor Pánuco-Tampico; Mérida, Yucatán; Lázaro Cárdenas, Michoacán; el corredor del Bajío; Cuautla, Morelos; Toluca, México; el corredor Morelia-Zamora, Michoacán; y Veracruz, Veracruz.

Las áreas industriales de vulnerabilidad media-alta son aquellas donde se producen vidrio, cemento y otros materiales de construcción y están más ampliamente distribuidas: Mexicali, Tijuana, Ensenada y La Paz en la península de Baja California; Culiacán y Mazatlán, Sinaloa; Hermosillo, Sonora; Ciudad Juárez, Chihuahua; San Fernando, Tamaulipas; Ciudad Valles, San Luis Potosí; Manzanillo, Colima; Ciudad Guzmán, Jalisco; Cancún, Quintana Roo; Córdoba y Orizaba, Veracruz; Cuernavaca, Morelos; los municipios metropolitanos de Ecatepec, Tlalnepantla y Cuautitlán, México, entre otros; las localidades cementeras del suroeste de Hidalgo y norte del Estado de México.

Las áreas de vulnerabilidad media serían aquéllas que tienen instalaciones de la industria metalmecánica, como Cuauhtémoc, Chihuahua; Ciudad Mante, Tamaulipas; Aguascalientes; y Villahermosa, Tabasco.

En cuanto a los subsectores de la industria ligera o de transformación, la vulnerabilidad de la industria alimentaria en el escenario base tiende a ser, en lo general, media-alta, como es el caso de las industrias azucarera, lechera y pesquera; algunas otras tienen vulnerabilidad media, como la del tabaco, o baja, como las empacadoras de carne o industrias de alimentos balanceados.

Las áreas que tienen una vulnerabilidad alta son: Ensenada, Hermosillo, Chihuahua, Torreón, Monterrey, Los Mochis, Culiacán, Pachuca, la zona metropolitana de la Ciudad de México, Córdoba, Veracruz, Ciudad del Carmen, Campeche y Progreso. Las áreas con vulnerabilidad media-alta constituyen la mayor parte de las localidades del país. Las áreas de vulnerabilidad media son Tepic, Oaxaca, Zamora, Tapachula, San Andrés Tuxtla y Teziutlán. Las áreas de vulnerabilidad baja son Delicias, Camargo y Cuauhtémoc, Chihuahua; Mexicali, Baja California; Piedras Negras, Coahuila; Nuevo Laredo, Tamaulipas; Tulancingo, Hidalgo; Huixtla, Chiapas; Coatzacoalcos y Acayuca, Veracruz.

Las industrias textil y papelera, por sus elevados consumos de agua y de energía, se consideran con sensibilidad climática de media-alta a alta. Ninguna de las dos tienen una amplia dispersión geográfica, sino, por el contrario, tienden a concentrarse en pocos centros urbanos del país.

Las localidades con alta sensibilidad climática son: Mexicali, Cuauhtémoc, Chihuahua, Torreón, Monterrey, Saltillo, Durango, Culiacán, Guadalajara, San Luis Potosí, Atencuque, Los Reyes Uruapan, Querétaro, Tuxtepec, Atlacomulco, los municipios conurbados del Estado de México y Tehuacán, y las localidades con sensibilidad climática media-alta son: Parras, Coahuila; el corredor Guadalajara-Ocotlán; Zamora, León, Aguascalientes, Tulancingo, Celaya, San Juan del Río, Cuernavaca, Toluca, la zona metropolitana de la Ciudad de México, Tlaxcala y Puebla.

6. Aplicación del modelo CCC

6.1 Los sectores energéticos

De acuerdo con el modelo CCC (fig. 1), por lo que se refiere a hidrocarburos, en las zonas cuya actividad tendría la sensibilidad climática más alta no se producirían cambios climáticos, es decir, tanto en las zonas productoras de petróleo y gas de Tabasco, Chiapas y la Sonda de Campeche, y las localidades donde se ubica la refinera de Minatitlán y Salina Cruz. Sólo podría haber cierto cambio en el nivel del mar, que afectaría a las plataformas petroleras de la Sonda de Campeche, dando lugar a una vulnerabilidad media por este motivo exclusivamente. En el caso de la refinera de Tula, habría una vulnerabilidad climática muy alta por la proximidad de otras zonas industriales, zonas de agricultura de riego, y alta densidad demográfica, debido al incremento de 2.0 a 2.5 grados centígrados en la temperatura media anual.

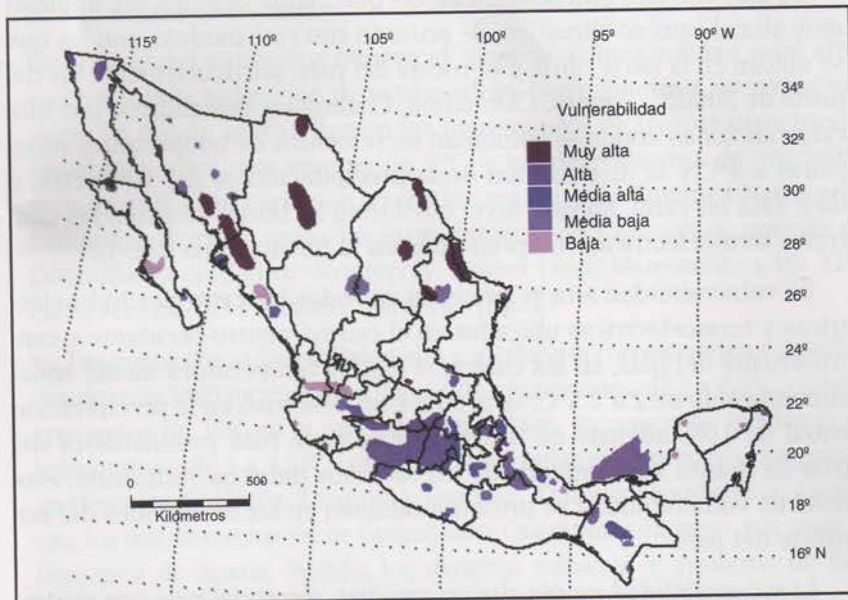


Figura 1. Vulnerabilidad en el sector de energía al cambio climático. Modelo CCC.

De las localidades con sensibilidad alta, sólo la refinera de Salamanca corresponde a una zona con cambio climático, por un incremento de temperatura media de 2.0 a 2.5 grados centígrados y un

decremento en la precipitación de 10%, lo que podría agudizar la problemática de obtención de agua para el proceso de refinación, al sumarse este problema a la competencia existente por el agua en la región, a causa de la agricultura de riego de El Bajío, el uso urbano y el uso por otras industrias de vulnerabilidad alta, como las químicas y petroquímicas secundarias. Por lo tanto, Salamanca quedaría como zona de vulnerabilidad muy alta.

Poza Rica, de sensibilidad media, incrementaría su sensibilidad a media-alta al subir su temperatura media de 1.5 a 2.0 grados centígrados y descender la precipitación 10 por ciento.

Las zonas de sensibilidad media-baja y baja, que corresponden a los campos productores de gas del distrito de Reynosa y los campos productores de petróleo de Altamira, Poza Rica y Veracruz, están casi totalmente fuera de la zona de cambio climático, según este modelo.

De las centrales hidroeléctricas, las que mantienen una sensibilidad muy alta al cambio climático, de acuerdo con este modelo, son las que se ubican en la parte norte y noroeste del país, particularmente las del norte de Sinaloa, Sonora, Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas, por ubicarse en zonas donde se combinan incrementos de temperatura superiores a 3°C y la disminución de la precipitación es del 10 al 20%, o bien ésta no varía. En este nivel quedarían incluidas también las centrales termoeléctricas comprendidas en la misma zona (fig. 1).

La vulnerabilidad alta se presenta en todas las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas ubicadas en el centro, centro-occidente y centro-oriente del país, en las cuales, si bien la temperatura media anual aumenta sólo de 2 a 2.5°C, se produce un descenso en la precipitación anual de 10%, además de tratarse de la zona más problemática del país en cuanto a la demanda de los recursos hídricos. Asimismo, este nivel de vulnerabilidad se presenta también en las localidades del noroeste del país.

La vulnerabilidad media-alta en aquellas zonas del país con centrales hidroeléctricas en las que los incrementos de temperatura media anual son de 1.5 a 2.5°C, y éstos se combinan con disminuciones en la precipitación de 10%, tal como sucede en Chiapas, Guerrero, Puebla, Hidalgo y el centro de Sinaloa. Asimismo se muestra en algunas áreas

del centro-norte y centro del país donde existen centrales termoeléctricas, con incrementos de temperatura medias de 2 a 3°C pero con reducciones del 10% en su precipitación, que coinciden con importantes centros urbano-industriales.

La vulnerabilidad media ocurre en las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas que se ubican en aquellos lugares con los incrementos más bajos en la temperatura media anual, y un aumento en las precipitaciones de 10 a 30%, como las costas de Guerrero, Quintana Roo, Ciudad del Carmen y las centrales termoeléctricas que no son de vapor, en la zona metropolitana de Monterrey.

Por último la vulnerabilidad baja corresponde a las zonas en las que coinciden incrementos muy ligeros en la temperatura y los mayores aumentos en la precipitación, como en el centro-occidente y península de Yucatán, principalmente.

6. 2 El sector industrial

En el caso del subsector minero el nivel de vulnerabilidad muy alto, con base en la aplicación de este modelo, corresponde a las zonas mineras en donde se distribuyen los incrementos de temperatura media anual más altos, por encima de 3°C, y los decrementos de precipitación de 10% o sin variación, como las regiones de Cananea-Nacozari y Sahuaripa, Sonora, todas las áreas mineras de Chihuahua, noreste de Coahuila, la ciudad de Monterrey, Nuevo León; Manzanillo y las Truchas, Michoacán y Pánuco, Veracruz (fig. 2).

Las zonas con vulnerabilidad alta y media-alta corresponden a aquellas donde coinciden incrementos ligeros de temperatura, de 2 a 2.5°C, con decrementos de 10% en la precipitación, o bien, incrementos medianos de temperatura, de 3 a 3.5°C, con variaciones nulas en la precipitación, como en Hércules, Coahuila; Tayoltita y Durango, Durango; Sombrerete, Zacatecas; los distritos mineros de Guanajuato, Querétaro e Hidalgo, y la zona siderúrgica de Xoxtla, Puebla; los distritos salineros y yesíferos de Baja California Sur; Real de Ángeles, Zacatecas y San Luis Potosí.

Las áreas con vulnerabilidad media coinciden con las que experimentan un incremento ligero en la temperatura y una nula variación de la precipitación, como los distritos de Zacatecas, Charcas, Pachuca, Teziutlán y las áreas productoras de azufre del sureste de Veracruz.

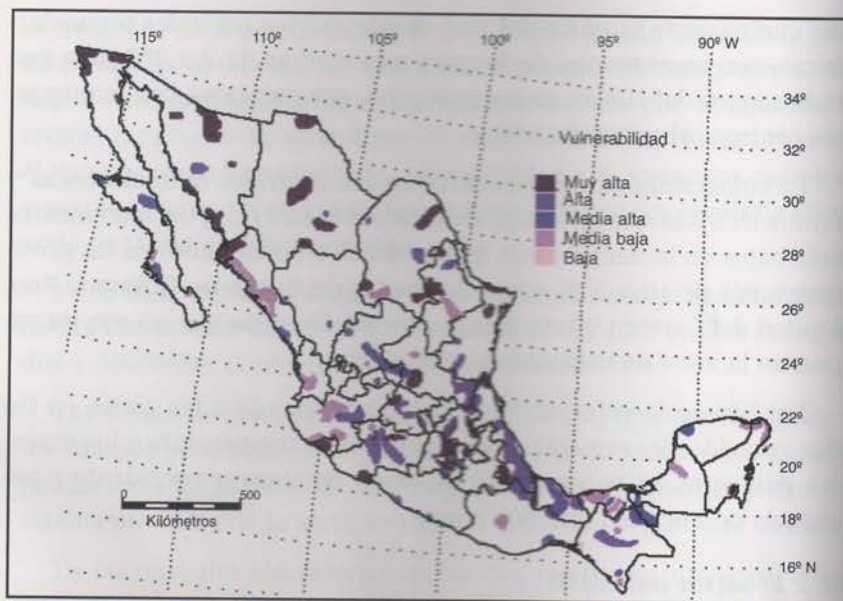


Figura 2. Vulnerabilidad en el sector industrial al cambio climático. Modelo CCC.

Finalmente, las áreas de baja vulnerabilidad corresponden a las que tienen bajos incrementos de temperatura y aumentos de 10% en su precipitación, como los distritos ferríferos del sur de Jalisco (fig. 2).

En el caso de la industria pesada, las áreas de vulnerabilidad más alta son las que presentan los incrementos de temperatura mayores, de 3.5 a 4.5°C y decrementos de 10% o mayores en la precipitación, o bien incrementos de 10% en la misma. Asimismo, incluye a las zonas con aumentos bajos en su temperatura media y decrementos de 10 a 20% en la precipitación, y que además coinciden con las zonas de mayor intensidad industrial del país. Así, quedarían incluidas en este nivel de vulnerabilidad las zonas industriales de Mexicali, Ensenada y Mexicali, Baja California; Nacozari, Cananea y Ciudad Obregón, en Sonora; Camargo y Cuauhtémoc, Chihuahua; Durango; Mazatlán, Sinaloa; San Fernando y Matamoros, Tamaulipas; Manzanillo, Colima; Lázaro Cárdenas, Michoacán; Salina Cruz y Tuxtepec, Oaxaca; Veracruz, Orizaba y el norte de Veracruz; el corredor de El Bajío, del norte de Michoacán, Puebla, Cuernavaca, Toluca, sur de Hidalgo y el Estado de México (fig. 2).

Las áreas de vulnerabilidad alta coinciden con zonas de mediano aumento de temperatura media y nulo incremento en la precipitación, o bien ligeros incrementos de temperatura y descenso de 10% en la precipitación. Este nivel de vulnerabilidad se ubica en Hermosillo, Sonora; Chihuahua, Chihuahua; Saltillo, Torreón y Monclova, Coahuila; Monterrey, Nuevo León; Nuevo Laredo y Ciudad Mante, Tamaulipas; Coatzacoalcos, Veracruz; Villahermosa, Tabasco; así como numerosas localidades que se intercalan con las de muy alta vulnerabilidad en El Bajío, y zonas industriales del sur de Hidalgo, valle de Puebla-Tlaxcala; Toluca y la zona metropolitana de México.

Las áreas de vulnerabilidad media-alta incluyen aquellas que tienen incrementos de temperatura ligeros o medianos y decrementos del 10% en la precipitación. Se ubican en el norte de Nuevo León; Acahucan, Veracruz; Mérida, Yucatán; y la zona metropolitana de Guadalajara.

Las zonas de vulnerabilidad media se concretan en los centros de población con incipiente industria básica: Cancún, Quintana Roo; La Paz, Baja California Sur; Ciudad Guzmán, Jalisco y Viesca, Coahuila (fig. 2).

Por su parte, del subsector de la industria ligera o de transformación, la alimentaria tiene todas las gamas de vulnerabilidad en el país, de acuerdo con las características del medio geográfico que arrojan los resultados obtenidos con la aplicación de este modelo.

En el caso de las industrias textil y papelera, la vulnerabilidad muy alta se manifiesta en localidades donde los incrementos de temperatura van de 3 a 4.5°C y la variación de la precipitación oscila entre más 10% y menos 10%. Estas condiciones se presentan en Mexicali, Cuauhtémoc, Chihuahua, Monterrey, Los Reyes-Uruapan, corredor Celaya-Querétaro-Atlacomulco, Córdoba-Orizaba, Tuxtepec y los municipios conurbados de la zona metropolitana de la Ciudad de México (fig. 2). La vulnerabilidad alta existe en zonas con incrementos medios de temperatura, de 2.5 a 3°C y variación nula en la precipitación, como en Durango, Aguascalientes, el corredor Guadalajara-Ocotlán, Zamora, y en el centro del país, desde León a Puebla. La vulnerabilidad media-alta se circunscribe a las zonas con aumentos medios de temperatura y ligeros incrementos en la precipitación, como San Luis Potosí y norte de Querétaro.

La vulnerabilidad media se presenta en Colima, Guadalajara, Toluca y San Juan del Río, bajo condiciones de ligeros incrementos de temperatura, y aumentos de precipitación superiores al 10% (fig. 2).

7. Aplicación del Modelo GFDL-R30

7.1 Los sistemas energéticos

En el caso de los hidrocarburos, las zonas de muy alta sensibilidad climática, salvo Tula, quedan sin cambio climático alguno con este modelo (fig. 3). Las plataformas marinas, por el incremento en el nivel del mar, tendrían una vulnerabilidad media.

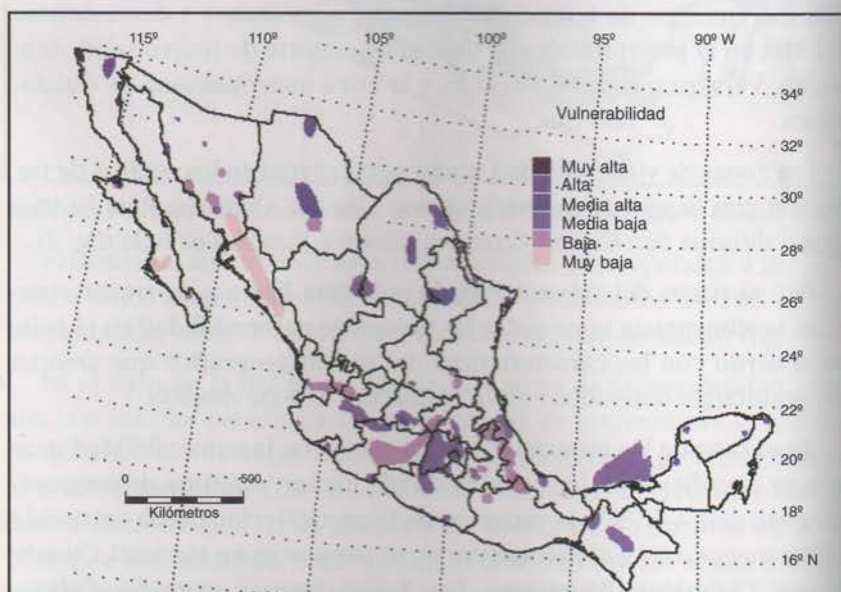


Figura 3. Vulnerabilidad en el sector de energía al cambio climático. Modelo GFDL-R30.

Tula tendría un incremento de 2.5 a 3.0 grados en su temperatura media, pero también tendría un incremento de 30% en la precipitación anual. Ello implicaría que la zona incrementaría su vulnerabilidad por el efecto invernadero, pero la disminuiría, en virtud de que se aumentaría el volumen de agua disponible y ello haría descender ligeramente el costo de la misma, ante tanta competencia con otras actividades

económicas y con la población. Por tanto, Tula bajaría al nivel de vulnerabilidad alta.

De las zonas de sensibilidad alta, sólo en Salamanca habría cambio climático, por un incremento de temperatura y precipitación similar a Tula. Nuevamente en este caso, la sensibilidad climática pasaría a media-alta, con el incremento en la precipitación y el ahorro energético resultante con el incremento en la temperatura.

Poza Rica disminuiría su sensibilidad climática a media-baja y las zonas productoras de gas de baja sensibilidad no experimentarían ningún cambio de clima, ni las zonas productoras de hidrocarburos de sensibilidad baja estarían afectadas.

En lo referente a producción de electricidad, en virtud de que casi todas las plantas hidroeléctricas se ubican en zonas en que, aun cuando hay incrementos de temperatura éstos coinciden con aumentos en la precipitación superiores al 30%; de acuerdo con este modelo la vulnerabilidad climática sería muy baja, para las centrales localizadas en Oaxaca y Sinaloa; baja, para la mayor parte de las centrales hidroeléctricas del país ubicadas en Sonora, el oriente y parte del occidente; y media, en aquellas zonas del centro y centro-occidente en las cuales la presión por el agua es mayor. Asimismo, habrá una sensibilidad media en las centrales hidroeléctricas de Chiapas, por el notable incremento en la precipitación anual (fig. 3).

En contraste, en el caso de las centrales termoeléctricas sólo las que abastecen a Tijuana y Ensenada tienen vulnerabilidad muy alta por estar ubicados en las zonas de mayor incremento de temperatura, más de 3.5°C y de no variación o decremento en la precipitación; la vulnerabilidad es alta y media-alta, en el resto del noroeste, norte y noreste del país, donde los incrementos altos de temperatura coinciden con ligeros o medianos aumentos en la precipitación anual; la vulnerabilidad es media, en las áreas con incrementos de temperatura entre 2.5 y 3°C y aumentos de 30 y 40% en la precipitación, como se observa en la zona metropolitana de Torreón, El Bajío, los estados de México e Hidalgo, Veracruz y Yucatán. Las vulnerabilidades baja y muy baja se localizan en las zonas de Baja California, Sonora y el centro-occidente por ser zonas donde es mínima la competencia por el agua con otras actividades (fig. 3).

En síntesis, el sector energético se verá más afectado si el cambio climático evoluciona como lo señala el modelo CCC, en comparación con el GFDL-R30, en virtud de que el primero arroja valores de precipitación más bajos que los actuales en la mayor parte del país.

7.2 El sector industrial

De acuerdo con este modelo, como en el caso del sector energético, las zonas mineras reducen su vulnerabilidad, en virtud de que en la mayor parte del país hay un incremento en las precipitaciones, pese a los aumentos de temperatura. Sólo experimentarían vulnerabilidad alta las zonas carboníferas del norte y noreste de Coahuila, y el distrito de Lampazos, Nuevo León, donde las temperaturas medias rebasarían los 3.5°C (fig. 4).

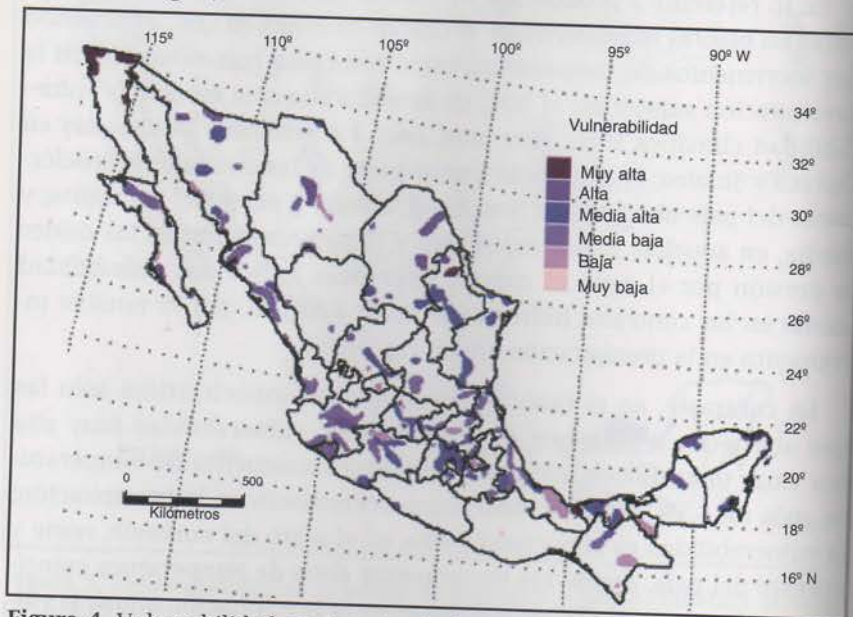


Figura 4. Vulnerabilidad en el sector industrial al cambio climático. Modelo GFDL-R30.

La vulnerabilidad media-alta corresponde a los distritos mineros de Cananea, Nacozari, Zacatecas, Real de Ángeles y Charcas, y la zona industrial de Monterrey, donde las temperaturas se incrementarán de 3 a 3.5°C. La vulnerabilidad media se presenta en los distritos con incrementos de 3 a 4°C de temperatura y aumento de 30 a 40% en la

precipitación, como en la mayor parte de los distritos del centro-norte y noroeste del país. Por último, la vulnerabilidad baja corresponde a las zonas de incrementos bajos y medios de temperatura, y medios en precipitación, como en la mayor parte de los distritos mineros del centro, oriente, y centro-occidente y los de Baja California Sur (fig. 4).

En el caso de la industria pesada la vulnerabilidad también se ve moderada por los resultados que arroja la aplicación de este modelo. Las zonas de muy alta vulnerabilidad se circunscriben a las áreas industriales de Camargo, Chihuahua; Monclova, Coahuila; norte de Nuevo León; Coatzacoalcos, Veracruz; y Salina Cruz, Oaxaca, es decir, las zonas de industria petroquímica y siderúrgica del país.

Las zonas de vulnerabilidad alta y media-alta son aquéllas en las cuales coinciden aumentos en las temperaturas medias anuales de 3.5 a 4°C e incrementos de precipitación anual de 10 a 40%, principalmente, aunque también se encuentran en zonas con incrementos de temperatura más bajos (2.5 a 3°C); estas áreas son: Ciudad Obregón, Guaymas, Nacozari y Cananea, Sonora; Chihuahua y Ciudad Juárez, Chihuahua; Torreón, Viesca y Saltillo, Coahuila; San Fernando, Tamaulipas; San Luis Potosí; Veracruz, Poza Rica y Pánuco, Veracruz; Mérida, Yucatán; Cancún, Quintana Roo; Tuxtepec, Oaxaca; Lázaro Cárdenas, Michoacán, y la amplia zona que abarca el corredor Bajío en Michoacán, Guanajuato y Querétaro, la zona metropolitana de Puebla y la de México; Toluca, el noroeste del Estado de México y el sureste de Hidalgo.

Las áreas de vulnerabilidad media son las que presentan incrementos medios de temperatura de 2.5 a 3.5°C e incrementos altos en la precipitación, de 30 a 40% y corresponden al sur de Baja California Sur; Culiacán y Mazatlán, Sinaloa; Cuauhtémoc, Chihuahua; Ciudad Mante, Tamaulipas; Manzanillo, Colima; Ciudad Guzmán, Jalisco; las zonas cementeras de Hidalgo y el Estado de México; Villahermosa, Tabasco, y las áreas vecinas a las zonas metropolitanas de Puebla y México.

Las áreas de vulnerabilidad baja son las que poseen los incrementos más ligeros en la temperatura y los aumentos más altos en la precipitación, además de tratarse de localidades con industria poco concentrada, como la cuenca del lago de Chapala, Aguascalientes, partes del Bajío y Córdoba, Veracruz (fig. 4).

Por lo que se refiere a las ramas del subsector de la industria ligera o de transformación, como en los casos analizados, la vulnerabilidad de la industria alimentaria tiende a decrecer en casi todo el país.

La vulnerabilidad más alta se circunscribe a las ciudades de Ensenada y Tijuana en el noroeste. La vulnerabilidad alta y media-alta se observa en Caborca, Ciudad Obregón y Hermosillo, Sonora; Monterrey, Nuevo León; Cancún y el resto de las localidades de Quintana Roo y Campeche; la costa de Yucatán; Los Mochis y Culiacán, Sinaloa; Torreón y Saltillo, Coahuila; las localidades urbanas de Zacatecas y Tamaulipas; la zona metropolitana de Guadalajara y Pachuca; Córdoba y Orizaba, Veracruz.

La vulnerabilidad media corresponde a la mayor parte de las localidades urbanas del país ubicadas en el centro, centro-occidente y oriente, desde Nayarit y Jalisco, hasta Veracruz, y coinciden con áreas con incrementos medios de temperatura y aumentos hasta de 40% en la precipitación.

Las vulnerabilidades bajas y más bajas se ubican en las zonas del país con menores aumentos de temperatura, de 2 a 2.5°C e incrementos hasta de 40% en la precipitación, como ocurre en algunas partes del Bajío, pero en particular en las ciudades del sureste de Veracruz, Oaxaca, Tabasco y Chiapas (fig. 4).

Por lo que se refiere a las industrias textil y papelera, de acuerdo con este modelo, las vulnerabilidades oscilan entre los niveles alto y bajo, según las combinaciones de incrementos de temperatura con aumentos de precipitación.

En suma, la determinación de la vulnerabilidad hacia el cambio climático es un asunto sumamente complejo para el caso de la industria, tanto por la enorme gama de modalidades que hay en este sector, como por la multiplicidad de factores que inciden en su vulnerabilidad. Cabe aclarar, que si bien como gran sector se considera menos vulnerable que otros sectores económicos, por su mayor capacidad de adaptación a esas variaciones, al interior del subsector existen enormes diferencias.

De acuerdo con el modelo CCC, como en el caso del sector energético, los niveles de vulnerabilidad de las distintas zonas industriales aparecerán más altos que con el modelo GFDL-R30.

Referencias bibliográficas

- Acosta Moreno, R. y J. Skea, 1994, Industry, energy and transportation: Impacts and adaptation, IPCC Working Group 2: Subgroup A.
- CFE, 1993, Estadísticas del sector eléctrico nacional, 1992, México.
- CFE, 1993, Informe de operación 1992, México.
- CFE, 1994, Unidades generadoras en operación. Sistema Eléctrico Nacional, 1993, México.
- Coll-Hurtado, A. y M. T. Sánchez-Salazar, 1991, Hoja. VI.8.1. "Yacimientos minerales", en *Atlas Nacional de México*, Sección Economía, Tomo III, Instituto de Geografía, UNAM.
- INEGI, 1993, Sistema de Cuentas Nacionales, México.
- Kashiwagi, T., 1994, Mitigation options: Industry, IPCC, Working Group 2, Subgroup A.
- Pemex, 1995, Memoria de labores, 1994, México.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, C. Gay, 1997, "Assesment of current and future regional climate scenarios for Mexico", en *Climate Research*, Vol. 9, Nos. 1 y 2, pp.107-114.
- Romero, José, 1995, "Energía, emisiones y precios relativos", en *México ante el cambio climático. Segundo Taller del Estudio de País: México*, Cuernavaca, Mor, México, Mayo.
- Quintanilla, J. y M. Bauer, 1995, "Emissions of the energy chains in the Mexican Energy System", en: *México ante el cambio climático. Primer Taller del Estudio de País: México*, Cuernavaca, Mor. Abril, 1994.
- Reséndiz-Núñez, D. (coord.), 1994, El sector eléctrico en México, CFE-FCE, México.
- Sánchez-Salazar, M. T., 1991, Hoja VI.6.2. "Energía eléctrica", en *Atlas Nacional de México*, Sección Economía, Tomo III, Instituto de Geografía, UNAM.
- Sánchez-Salazar, M. T., M. Martínez, y N. Martínez, 1995, Informe final. Proyecto Estudio de País: México. Área vulnerabilidad. Subárea sistemas energéticos e industria. México.
- Sánchez-Salazar, M. T., 1995, "Marco de referencia sobre la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y la industria ante el cambio global. El caso de México", en *México ante el cambio climático. Primer Taller del Estudio de País: México*, Cuernavaca, Mor. Abril, 1994.
- Sánchez, E., M. Martínez, M. T. Sánchez-Salazar, y M. Cervantes, 1991,

Hoja VI.1.2. "Uso del agua", en *Atlas Nacional de México*, Sección Economía, Tomo III, Instituto de Geografía, UNAM.

SEMP, S/F, Consumo de energía en la industria, SEMIP/Comisión de las Comunidades Europeas, México.

SEMP, 1994, Documento de prospectiva del sector eléctrico, México.

Sección
ción de
México.

Capítulo VIII Asentamientos humanos

LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO. UN ESCENARIO FUTURO DE VULNERABILIDAD REGIONAL

Adrián Guillermo Aguilar*

Resumen

Este estudio analiza las características más sobresalientes del crecimiento demográfico reciente, así como la distribución y las tendencias futuras de los asentamientos humanos en México. El análisis se centra en la relación existente entre la distribución de la población, la incidencia de enfermedades infecciosas y transmitidas por vectores y el consumo de agua.

Más adelante, se estudia esta relación con un posible escenario para el año 2025, con el cual se prevén algunas perspectivas de vulnerabilidad regional, en caso de un cambio climático. Los resultados muestran que los niveles de vulnerabilidad más altos podrían encontrarse específicamente en los estados con rápido crecimiento poblacional, gran consumo de agua y en los que se registran altos niveles de incidencia de enfermedades infecciosas. Esta situación se localizó en la región del norte (Tamaulipas y Chihuahua), en la zona del centro (Jalisco y México) y en el Golfo de México (Tabasco).

Palabras clave: cambio climático, vulnerabilidad urbana, escenarios regionales.

*Instituto de Geografía, UNAM. El autor agradece la colaboración de Josefina Gabriel Morales y José Luis Pérez Damián.

1. Introducción

La vulnerabilidad potencial, derivada del proceso de urbanización, surge de dos principales preocupaciones: (I) la magnitud total, la proporción y las tasas de incremento de la población urbana total, y (II) el gran tamaño y el rápido crecimiento de ciertas ciudades individuales.

En un contexto de rápida urbanización, existen efectos ambientales que se ven modificados en caso de cambios climáticos. Entre las consecuencias ambientales que se consideran más importantes está la incidencia de enfermedades infecciosas, como el cólera o la fiebre tifoidea; y las transmitidas por vectores, como el dengue o el paludismo. Entre las demandas ambientales más importantes está la del agua, que se ve incrementada con la expansión urbana (Magaña, *et al.*, 1997).

Una preocupación fundamental, asociada a la urbanización, es su alto potencial de vulnerabilidad ante un cambio climático, debido a menores abastecimientos de agua o mayor incidencia de enfermedades, de acuerdo con la localización geográfica de los asentamientos humanos más importantes. El abastecimiento de agua será mucho más caro si se mantienen los mismos niveles de consumo, ya que probablemente disminuya la precipitación (Conde, *et al.*, 1996) y aumente el nivel de evaporación. El cambio de clima también tendría repercusiones en la salud humana: existiría mayor "stress" debido a un clima más caluroso; una mayor humedad y temperatura estimularía la expansión de ciertas enfermedades infecciosas y aquellas transmitidas por vectores. Una primera condición es que la vulnerabilidad es baja cuando las densidades de población son bajas; una alta densidad incrementa la vulnerabilidad al aumentar el número de víctimas por unidad territorial; al aumentar el número de víctimas, se incrementa el costo social de un cambio climático. Por lo tanto, una alta vulnerabilidad estaría asociada a un mayor tamaño de asentamientos humanos, en los cuales se localiza un gran número de establecimientos industriales, viviendas y vehículos automotores (Scott, *et al.*, 1996).

Altas densidades urbanas significan grandes demandas de agua, y un elevado riesgo a la salud para una gran cantidad de habitantes. Debido a que un cambio climático tendrá efectos regionales diferenciales, o sea, de diferente magnitud, es fundamental examinar la vulnerabilidad para todos los espacios nacionales.

Cualquier política que pretenda modificar el patrón de crecimiento urbano, o la distribución de población, en general, para evitar el costo de un cambio climático, deberá estar cimentada en una evaluación cuantitativa del problema.

2. El escenario actual

2.1. Crecimiento demográfico y urbanización

El análisis de las tendencias en el crecimiento demográfico y en el proceso de urbanización dan un panorama bastante preciso de la localización de las principales concentraciones sociales y económicas en el país. Estos datos nos indican cuál es la ubicación de la mayor parte de las fuentes emisoras de gases a la atmósfera; en consecuencia, es posible determinar zonas o regiones con mayor vulnerabilidad a un cambio climático.

En este apartado se presentan las principales tendencias en el crecimiento y distribución de la población, por regiones, en el periodo 1970-1990. Se establecen las diferencias entre la población total, la rural y la urbana; y, en los casos más sobresalientes, se destaca el comportamiento de la población metropolitana, o sea, aquella que se localiza en las ciudades más grandes, denominadas zonas metropolitanas.

2.2. Población total

En el periodo analizado la población total del país pasó de 48 a 81 millones de habitantes (fig. 1). Este crecimiento se realizó a una tasa promedio anual de 2.6%, y significó un incremento porcentual de cerca de 70%.

A pesar de que en las últimas décadas se hizo notorio un descenso en el ritmo de crecimiento de la población en México, se espera que ésta seguirá aumentando, aunque con un ritmo más moderado.

La población total ha disminuido su tasa de crecimiento, ha pasado de 3.2% en el periodo 1950-1970, a 2.6% en 1970-1990. Sin embargo, la población urbana tiene tasas de crecimiento mayores durante todo el periodo, por lo que ha aumentado su porcentaje en el total nacional, al pasar de 50% en 1970 a 61% en 1990.

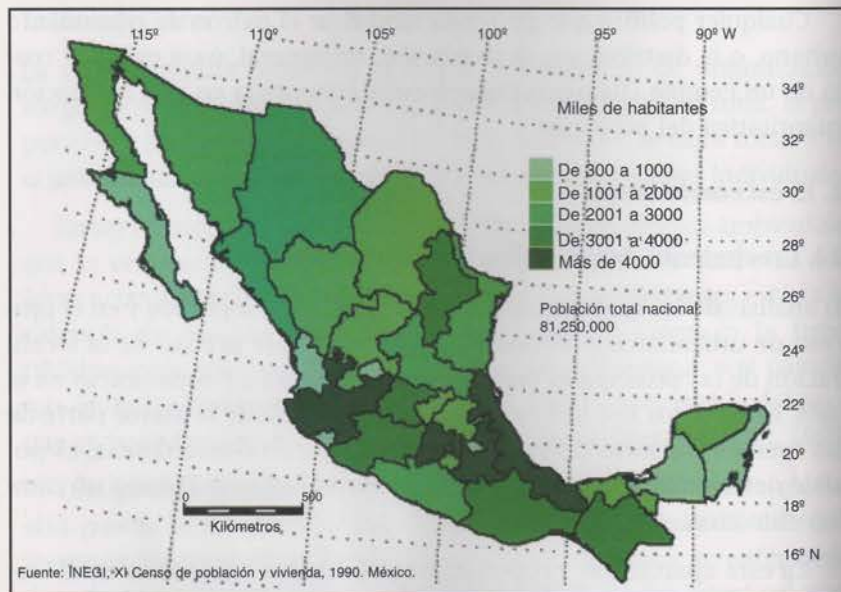


Figura 1. Distribución de la población total por estados, 1990.

En términos regionales este crecimiento se comportó de la siguiente manera: prácticamente todas las regiones crecieron al mismo ritmo que la población total del país, entre 2.6 y 2.9%; la excepción fue la región Península de Yucatán, que incrementó su población a un ritmo mucho mayor, con una tasa de 4.0%. En lo que toca al porcentaje de población que cada región contiene respecto del total nacional, tampoco hubo un cambio significativo; ninguna de ellas modificó en más de un punto porcentual la participación de dicha población. Por ejemplo, el más alto incremento se dio en la región de la Península de Yucatán, al pasar de 2.3% en 1970 a 2.9% en 1990.

Si examinamos únicamente los números absolutos de población, se destaca que las regiones más pobladas son: la región centro con 32% de la población nacional; la región occidente con 12%; y la región centro-norte con 11%. En el otro extremo, la zona menos poblada es la región de la Península de Yucatán, con sólo 3% de la población total.

En resumen, la población tiene una marcada tendencia al incremento, que es más notoria en toda la franja central del país, donde se ubica la mayor concentración social, a pesar de que regiones con ba-

Las concentraciones registran crecimientos muy altos, como la Península de Yucatán.

2.3. Población rural

Los datos muestran que, en las últimas dos décadas, la población rural ha mantenido una tendencia hacia su disminución. Mientras que en 1970 esta población representaba 50% del total, en 1990 su porcentaje bajó a 39%. En dicho periodo su crecimiento fue muy lento, a una tasa de 1%. Esto significa que el país adquiere cada vez más un perfil urbano.

De hecho, en todas las regiones del país la población rural perdió peso relativo, al disminuir su participación en varios puntos porcentuales. Por ejemplo, en las regiones norte, centro-norte y occidente, esta población disminuyó en más de 15%, y en la Península de Yucatán en 20%.

Las mayores concentraciones de población rural se localizan en las regiones centro-norte, occidente, centro, Golfo de México y pacífico sur. En éstas la población representa de 4.0 a 6.5 millones de habitantes en cada región y en las últimas dos tiene un predominio con porcentajes arriba de 60%.

Una vez más, los datos nos señalan mayores concentraciones y densidades de población en la franja central del país, a pesar de que muestra una clara tendencia a la disminución.

2.4. Población urbana

Esta categoría de población fue la que registró los más altos incrementos en el periodo 1970-1990. En las dos décadas, la población urbana se duplicó en números absolutos e incrementó su porcentaje de 50% en 1970 a 61% veinte años después, creciendo a una tasa de casi 4%.

En términos generales, la población urbana crece más rápido que la total. Aunque hay que resaltar que, en la última década, las ciudades de dimensiones medias crecieron más rápido que las grandes zonas metropolitanas, como la Ciudad de México. Así, los crecimientos más altos no se ubican en las ciudades más grandes, sino en aquellas

de 500 mil a menos de un millón de habitantes con una tasa mayor a 11%; y en las ciudades pequeñas (menos de 100 mil habitantes), con tasas de alrededor de 4%. Además, hay que enfatizar que el número de ciudades prácticamente se duplicó de 1970 a 1990, al pasar de 156 a 319 localidades (Aguilar y Rodríguez, 1995).

Como es de esperar, las ciudades más grandes se asocian a una mayor cantidad de emisiones de gases, ya que la concentración industrial y la presencia de fuentes móviles es mucho más amplia en estos centros urbanos. La reciente política neoliberal, de apertura comercial, ha favorecido un fuerte crecimiento social y económico en la porción norte del país.

En todas las regiones, la población urbana creció de manera acelerada, de acuerdo con el promedio nacional; destacan las regiones pacífico sur y Península de Yucatán, porque crecieron por arriba de la media nacional, con tasas de 6%; sin embargo, son las regiones que concentran la más baja proporción de población urbana, 2.3 y 1.3 millones de habitantes, respectivamente.

La mayor concentración de población se encuentra precisamente en la región centro en la cual se localizan la Ciudad de México, y otras ciudades grandes, como Puebla. En esta región los habitantes urbanos eran casi 20 millones de personas en 1990; representaban 74% de la población al interior de la región. Es importante enfatizar que de esa población urbana, 17.7 millones de personas vivían en zonas metropolitanas, de aquí la importancia de las grandes ciudades en esta porción de territorio.

En segundo término, sobresalen las concentraciones urbanas de las regiones occidente y centro-norte, con 5.7 y 5 millones de habitantes respectivamente. En ambas regiones la población urbana es mayoritaria con respecto al total, con aproximadamente 57% de toda la población.

En todas las regiones del norte del país, aunque en números absolutos la población urbana es menor a la de las regiones antes señaladas, la población urbana representa porcentajes mayores al interior de cada región; es decir, se trata de regiones "más urbanas" que las del resto del país (fig. 2).

En esencia, las regiones centro, occidente y centro-norte, concentran 61% de toda la población urbana del país; y 76% de la población de zonas metropolitanas existentes en México.

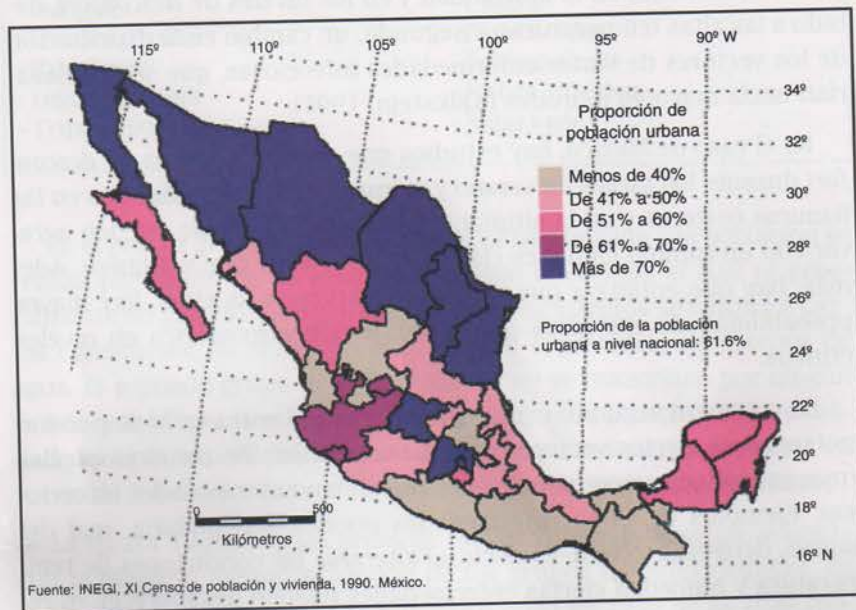


Figura 2. Proporción de la población urbana por estados, 1990.

2.5. Asentamientos humanos en zonas costeras

Uno de los efectos secundarios del cambio climático global sería la afectación de los asentamientos costeros en caso de que aumentara el nivel del mar.

En 1990, en México se tenía una población urbana de más de dos millones de personas en la línea de costa de la vertiente del Pacífico, y poco más de un millón y medio de habitantes urbanos en la vertiente del Golfo de México.

2.6. La salud y el clima

El interés en la relación clima-salud se ha incrementado notablemente en la última década, porque se prevén varios impactos negativos con el calentamiento global, a partir de las actividades humanas.

Aunque el clima puede tener diversos efectos en varias enfermedades, se considera que con un calentamiento generalizado de la atmósfera, los mayores impactos se manifestarían en dos aspectos: primero, aumento en la mortalidad y en los niveles de *desconfort*, debido a las altas temperaturas; y segundo, un cambio en la distribución de los vectores de varias enfermedades infecciosas, que se desplazarían hacia mayores latitudes (Kalkstein, 1991).

En el caso de México, hay estudios que reportan índices de *desconfort* durante los meses de verano y primavera, que se extienden en las llanuras costeras y en la altiplanicie del norte, y que se pueden agravar con un cambio climático (Jáuregui, 1967 y en este volumen). Además, hay que enfatizar que, con temperaturas más altas, hay mayor probabilidad de episodios de contaminación atmosférica en niveles críticos.

En cuanto al segundo aspecto, el interés se centra en la dispersión potencial de ciertos vectores muy característicos de zonas tropicales (mosquitos y otros parásitos), que transmiten enfermedades infecciosas. Ejemplos de estas enfermedades pueden ser: malaria, mal del sueño, dengue, etcétera. Es decir, al alterarse las condiciones de temperatura y humedad ciertas enfermedades pueden desaparecer en regiones tropicales del sur y desplazarse hacia regiones de latitud norte, aumentando así su incidencia (NAS/NAE/IOM, 1992).

Debido a que los diversos grupos sociales tienen diferentes dotaciones de recursos naturales, desarrollos técnicos o servicios públicos, su vulnerabilidad al cambio climático varía en el mismo grado. Cualquier alteración climática seguramente afectará, en primera instancia, las condiciones de salud en las zonas tropicales, subtropicales, y algunas de las poblaciones menos protegidas en las zonas templadas. Esto se debe a que los cambios climáticos afectarán la distribución del agua y la temperatura, las condiciones de humedad y la proliferación de microorganismos.

Para una primera evaluación de las zonas más vulnerables en México, se toman en cuenta dos grupos de enfermedades, de acuerdo con la forma de transmisión, como se aprecia en el siguiente cuadro:

1. Enfermedades infecciosas transmitidas por vector:

- Dengue
- Oncocercosis
- Paludismo
- Leishmaniasis
- Tripanosomiasis

2. Enfermedades infecciosas que no se transmiten por vector:

- Cólera
- Paratifoidea
- Salmonelosis
- Fiebre tifoidea
- Shigelosis

En el primer grupo de enfermedades, la transmisión a la población se realiza por medio de un agente intermedio infeccioso, el cual es generalmente un insecto. La proliferación de estos insectos se vincula a ciertas condiciones de temperatura, humedad o presencia de cuerpos de agua. El segundo grupo de enfermedades no se transmiten por ningún vector o agente, y se relacionan directamente con la distribución y calidad del agua superficial. Pueden encontrarse condiciones propicias en zonas de inundaciones o en áreas con servicios de drenaje deficiente.

La figura 3 muestra las áreas de mayor vulnerabilidad, de acuerdo con la mayor o menor incidencia de los grupos de enfermedades. En dicha figura se nota que la mayor morbilidad en 1993 se localiza fundamentalmente en algunos estados, en la porción sur de las vertientes del Golfo de México y del océano Pacífico, coincidiendo con zonas tropicales húmedas y semisecas. Asimismo, hay una alta concentración de esta morbilidad en la zona central del país, que coincide con áreas de alta urbanización.

Así, en la vertiente del Golfo de México destacan los estados de Veracruz, Tamaulipas y Tabasco; en la vertiente del Pacífico sobresalen los estados de Chiapas, Oaxaca, Michoacán, Jalisco y Sinaloa. Por lo que se refiere al centro del país, destacan los estados de Guanajuato, Estado de México y Distrito Federal. En todos estos estados el número de casos de las enfermedades señaladas fue mayor a 6 mil en 1993.

2.7. El consumo de agua

Un cambio climático afecta las variaciones naturales, estacionales y anuales del recurso agua. Las variaciones actuales en el abastecimiento de este recurso muestran ya la necesidad de prepararse para las posi-

bles consecuencias de un calentamiento global. La pregunta fundamental parece ser: ¿tendrán las ciudades en el futuro próximo abastecimiento de agua suficiente, barato y confiable?

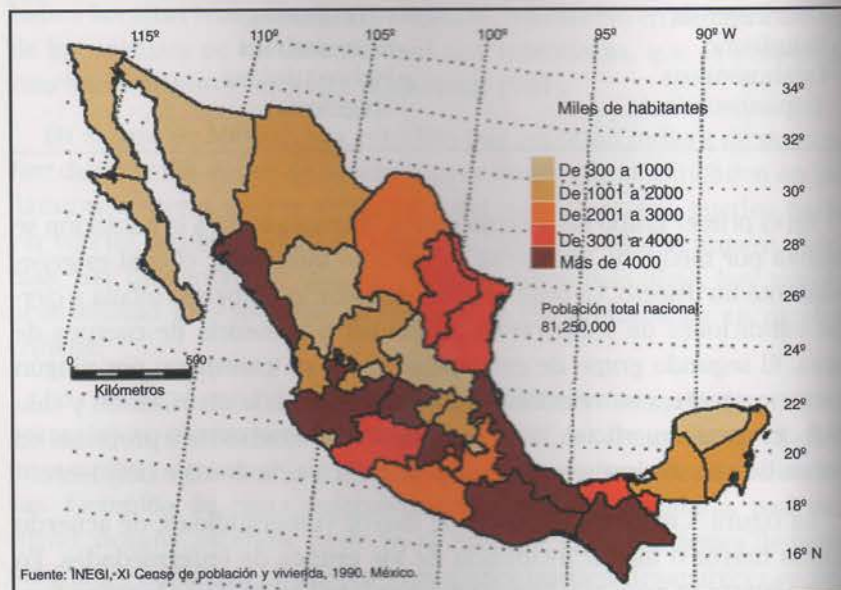


Figura 3. Morbilidad por estados, 1990.

El impacto de un cambio climático dependerá del balance, a nivel regional del consumo, almacenamiento, variabilidad del recurso, uso de agua subterránea y generación de energía hidroeléctrica, para conocer el grado de vulnerabilidad de cada región, y cómo un cambio climático puede traer daños o beneficios a cada zona.

La disponibilidad del recurso agua está en relación directa con las condiciones climáticas, específicamente en el mayor o menor volumen de precipitación. Con una población más numerosa y con ciudades más grandes, el consumo de agua por habitante se incrementará substancialmente en el futuro cercano. Si ocurre un cambio climático global, aquellos estados que actualmente tienen clima árido y semiárido, es probable que experimenten procesos de desertificación y/o aridez. Esta condición aumentaría enormemente la vulnerabilidad de las poblaciones en el consumo de agua.

La figura 4 muestra el volumen de agua suministrada por habitante, en cada estado de la República, en el año de 1991. Se observa que, en general, los mayores consumos por habitante (más de 350 litros diarios) se encuentran precisamente en todos los estados del norte del país que son, a su vez, los que tienen la menor disponibilidad de agua. Destacan Baja California Sur, Chihuahua y Coahuila, con un suministro de más de 350 litros/día por habitante. En la parte central del país sobresalen los estados de Aguascalientes, Colima, Distrito Federal y Jalisco; y en la porción sur el estado de Quintana Roo.

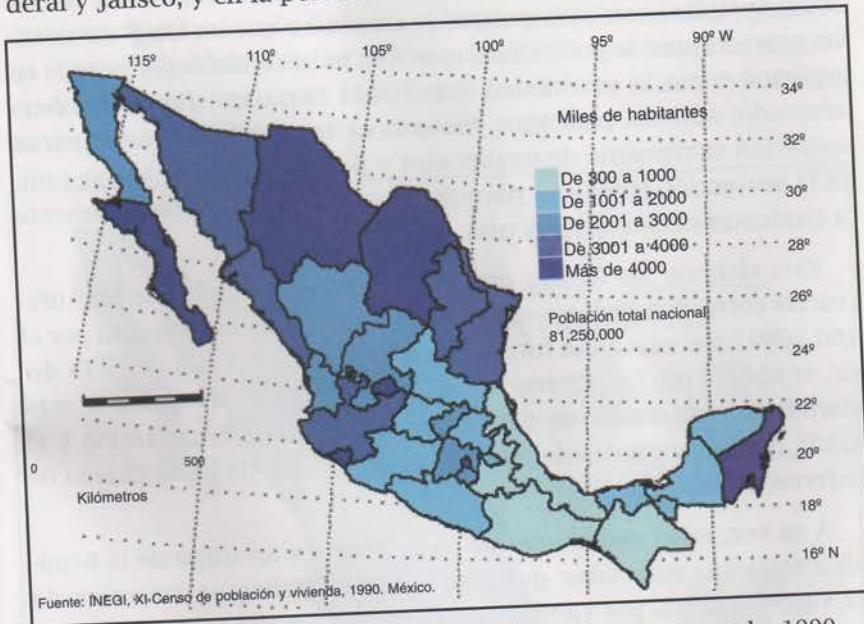


Figura 4. Agua suministrada por habitante (litros/día) y por estado, 1990.

3. El escenario futuro. La vulnerabilidad de los asentamientos humanos

A fin de elaborar algunas consideraciones acerca del posible efecto de un cambio climático en los principales asentamientos humanos del país, en esta sección se relacionan los datos de proyecciones de población, de incidencia de enfermedades y de demanda de agua, con las posibles alteraciones de temperatura y precipitación en el próximo siglo.

Para cumplir este objetivo se utilizan los cálculos que se derivan de la aplicación de dos modelos (Conde, *et al.*, 1996 y Magaña, *et al.*, 1997): el CCC (*Canadian Climate Center*) y el GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) y se toman como base los principales cambios en temperatura y precipitación.¹ Ambos modelos hacen simulaciones de cuáles serían los cambios en la temperatura (°C) y en la precipitación (%), si ocurriera una duplicación de la concentración atmosférica del bióxido de carbono atmosférico. Como escenario futuro se utilizan los datos de proyecciones elaboradas para el año 2025. Se utiliza este año, porque se considera que en los posteriores las proyecciones de población se vuelven poco confiables, y porque en aspectos como la morbilidad éste fue el horizonte futuro máximo adaptado; además, para años posteriores, los resultados estadísticos aparecían sumamente distorsionados y poco aceptables. Así, se utiliza la proyección logística,² porque representa más satisfactoriamente la tendencia demográfica actual.

Para elaborar las figuras que se muestran, se obtuvieron las diferencias correspondientes entre el escenario actual, simbolizado por el año 1990,³ y el escenario futuro, representado por el año 2025. Es decir, se obtuvieron las diferencias para esos 35 años, las cuales se convierten en magnitudes de demanda (en el caso de la población y el agua), o en magnitudes de problemas (en el caso de la incidencia de enfermedades).

A su vez, estas magnitudes se transfirieron a un mapa de la República Mexicana para saber qué regiones presentaban un mayor grado de vulnerabilidad; por ejemplo, aquéllos con un alto número de incidencia de enfermedades transmitidas por vector en el año 2025, que a su vez, registran cambios positivos en la precipitación, son áreas vulnerables ya que la mayor humedad y cantidad de agua estimula y crea un ambiente propicio a la transmisión de tales enfermedades.

¹ Véase, Villers L. y Trejo I. (1995), Segundo Informe de País: México. Área: Vulnerabilidad. Subárea: Sistemas Forestales; Sánchez M. T., Martínez M. y Martínez N. (1995), Informe Final del Estudio de País: México. Área Vulnerabilidad Subárea: Industria y Sistemas Energéticos.

² En el estudio original se elaboraron proyecciones logísticas y polinómicas al año 2025. La primera de ellas presenta un comportamiento más consciente con la tendencia histórica (A. G. Aguilar, 1995, Estudio de País: México, Área: Vulnerabilidad, Subárea: Asentamientos Humanos, Instituto de Geografía, UNAM, México).

³ En el caso de la morbilidad el escenario actual se refiere al año de 1993, y para la demanda de agua se trata de 1991.

Incrementos en la concentración de población

Incrementos de población previstos implican una demanda potente de una serie de satisfactores básicos, varios de los cuales dependen indirectamente de las posibles variaciones climáticas; en este caso, estarían los abastecimientos de agua o de energía.

En las figuras 5 y 6, donde se explican los incrementos absolutos de población total y urbana para el año 2025, se observa que los estados en los que se esperarían los mayores incrementos son: Chiapas, Oaxaca, Puebla, Estado de México, Michoacán, Guanajuato y Jalisco, así como Chihuahua y Baja California. Es decir, una franja en el centro del país (a excepción de Chiapas), y dos estados fronterizos con la alta concentración de población total y urbana.

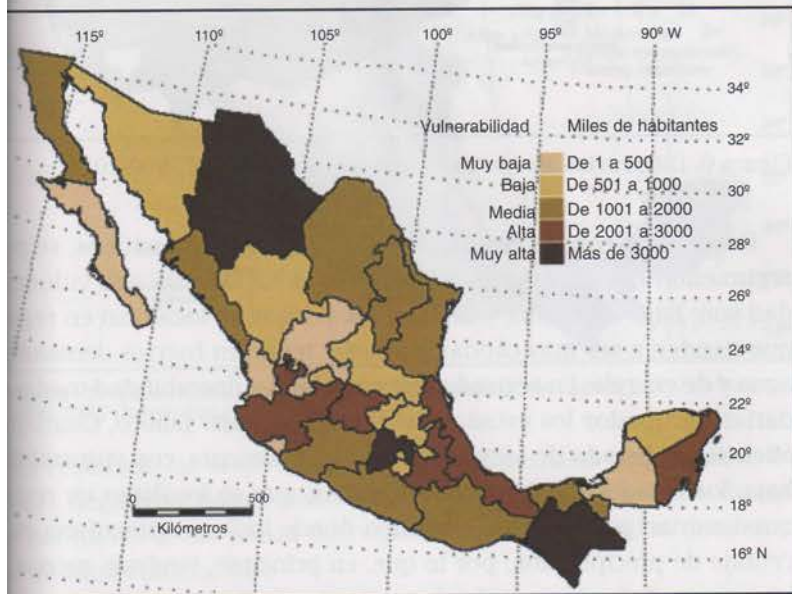


Figura 5. Diferencias absolutas de la población total, 1990-2025.

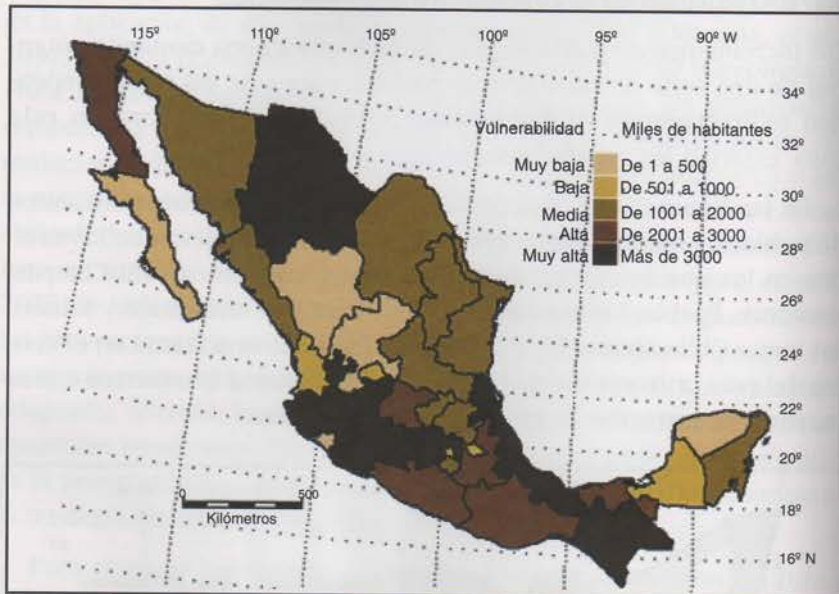


Figura 6. Diferencias absolutas de la población urbana, 1990-2025.

De acuerdo con los resultados de los modelos climáticos, se puede argumentar que de este grupo de estados los de más alta vulnerabilidad son: Baja California y Chihuahua, porque se localizan en regiones que tienden a ser más cálidas y secas y tendrían fuertes demandas de agua y de energía. En segundo lugar, con una vulnerabilidad media quedarían agrupados los estados del centro del país: Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Estado de México y Puebla. Finalmente, con vulnerabilidad baja, los estados de Veracruz y Chiapas, que se localizan en regiones que tendrían poco cambio climático donde incluso aumentaría el porcentaje de precipitación, por lo que, en principio, tendrían menos problemas en el abastecimiento de agua, energía o alimentos.

Para confirmar estos resultados se pueden examinar las proyecciones del consumo de agua en el año 2025 (fig. 7). De acuerdo con estos datos, hay dos grandes grupos de valores, los negativos y los positivos. Los valores negativos de las diferencias absolutas en el consumo de agua 1991-2025 significan que, debido al rápido crecimiento de la población, en el futuro habría una escasa disponibilidad de

lo que obligaría a reducir el consumo diario por habitante; en palabras, el consumo diario por habitante en 1990 era mayor al se espera para el año 2025. Los valores positivos manifiestan tamente lo contrario, de acuerdo con las tendencias actuales, en estados será posible aumentar la cantidad de agua para consu- por cada habitante, por lo tanto, el consumo de 1990 era menor e se espera para el año 2025.

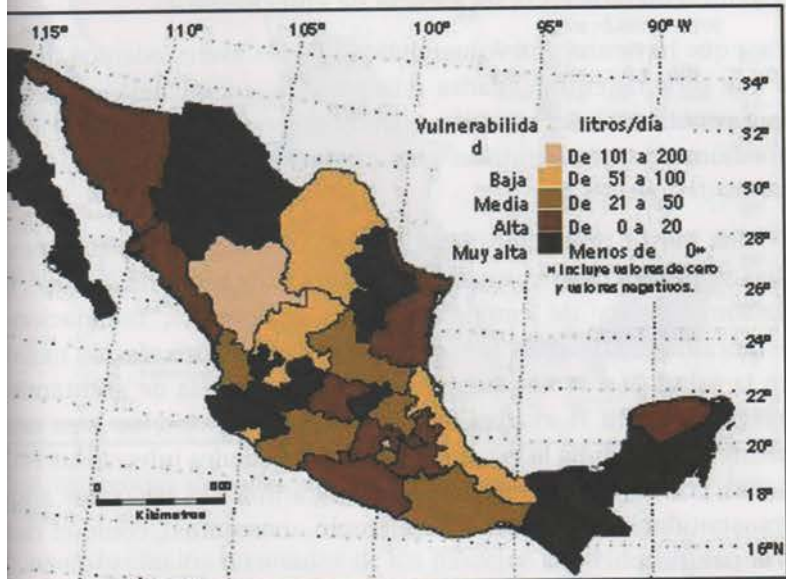


Figura 7. Diferencias absolutas en el consumo de agua por habitante, 1990-2025 (litros/día).

En resumen, las áreas o estados más vulnerables son aquellos con valores negativos, donde habrá una reducción en el consumo de agua por habitante. Estas zonas corresponden a trece estados que, en orden de importancia, son:

- | | |
|---------------------|---------------|
| Quintana Roo | 9. Nuevo León |
| Chihuahua | 10. Querétaro |
| Baja California Sur | 11. Campeche |
| Aguascalientes | 12. Jalisco |
| Baja California | 13. Tlaxcala |
| Chiapas | |
| México | |
| Tabasco | |

Estos estados pueden considerarse de alta vulnerabilidad, desde la perspectiva del incremento en el consumo de agua. Cabe señalar que cinco de ellos (Chihuahua, Baja California, Chiapas, México y Jalisco), se clasificaron como de alta vulnerabilidad, de acuerdo con los incrementos absolutos de población total y urbana, señalados con anterioridad.

3.2. Incrementos en la incidencia de enfermedades

Para que haya una alta vulnerabilidad de los asentamientos humanos a una serie de enfermedades relacionadas con el clima, es necesario que se combinen las siguientes condiciones: mayor precipitación, mayor humedad, temperaturas más cálidas, así como condiciones sanitarias deficientes.

Una mayor precipitación en centros urbanos de dimensiones medias y grandes puede causar la obstrucción de redes de drenaje, inundación de vías de comunicación y, en general, inundaciones y estancamiento de agua, lo cual seguramente tendrá efectos negativos en la salud. Si a lo anterior se agrega la existencia de asentamientos irregulares, con marcadas deficiencias en servicios, se crea un ambiente que estimula la expansión de enfermedades infecciosas relacionadas con el agua, como cólera o paratifoidea, así como aquellas transmitidas por vectores (por ejemplo, mosquitos), como el dengue o el paludismo.

Para examinar la posible incidencia de morbilidad, se estableció una distinción entre aquellas enfermedades transmitidas por vectores, y las infecciosas.⁴ De acuerdo con los resultados de los datos proyectados para el año 2025, y según los mapas elaborados, se observa lo siguiente:

Primero, en el caso de las enfermedades transmitidas por vectores, las diferencias absolutas totales 1993-2025 son bastante irregulares. Esto se explica porque la evolución del número de casos hasta el año 1995 presenta una tendencia cíclica, en ciertos años se registran altas incidencias y en otros se observan marcados decrementos. De esta manera, en la mayor parte de los estados se registran datos negativos en el escenario futuro; sin embargo, se destacan tres estados, con una alta incidencia; Campeche, Quintana Roo y Tabasco, es decir la zona

⁴ Las enfermedades transmitidas por vectores son: dengue, oncocercosis, paludismo leishaniasis y tripanosomiasis. Aquellas transmitidas por infección son: cólera, paratifoidea, salmonelosis, fiebre tifoidea y shigelosis.

de la Costa del Golfo de México, y la mayor parte de la Península de Yucatán (fig. 8).

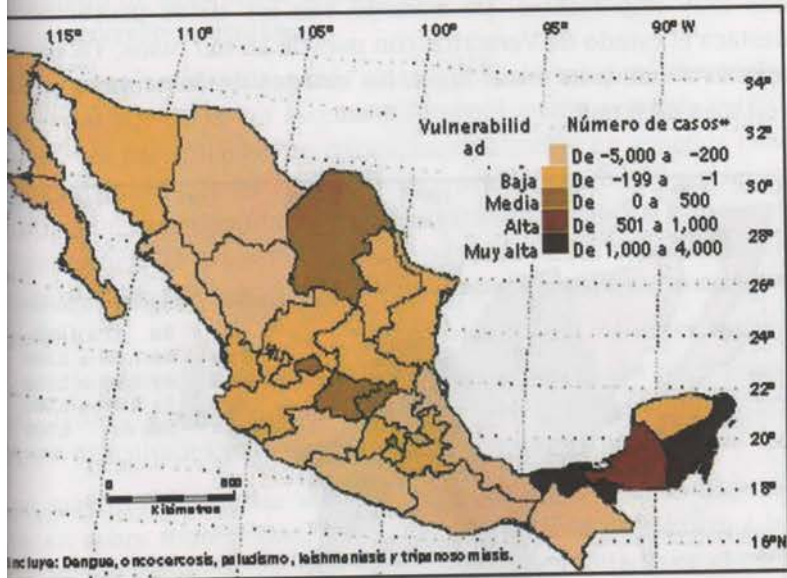


Figura 8. Diferencias absolutas en enfermedades transmitidas por vectores, 1983-2025.

De acuerdo con los resultados de los modelos presentados, es muy probable que se combine un incremento de temperatura con mayores porcentajes de precipitación en las zonas costeras y en el sureste del país. Es decir, aquellas regiones cálidas y semicálidas son áreas potencialmente endémicas. No obstante, algunas de estas enfermedades se han vuelto ya problemas de salud pública en otras regiones del país. Por ejemplo, se han reportado brotes importantes de dengue y paludismo en lugares como Guadalajara, Tampico, Ciudad Madero, Los Cabos, Baja California y el estado de Sinaloa.⁵

En segundo lugar, la futura incidencia de enfermedades infecciosas tendrá una distribución más regular en todos los estados del país (Fig. 9). En esta distribución resultan como regiones más vulnerables los estados de la República; en la zona occidente, Jalisco y Michoacán; y en la región del norte y el Golfo de México, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz y Tabasco. Como se aprecia, se trata tam-

* Fuente: Aparicio Nazar-Buetelspacher, Prevots, Nieburg, Sánchez y Medrano, 1990; Ávila, Luna y Sánchez, 1987; González Mora, 1992; Vázquez Castellanos, Canales Muñoz, Nápoles Camacho y Rodríguez Aquino, 1989.

bién de zonas costeras cálidas y semicálidas, combinadas con algunas zonas secas y cálidas, así como áreas más reducidas de clima templado, donde se localizan altas densidades de población y centros urbanos muy importantes. De acuerdo con los datos proyectados, se destaca el estado de Veracruz, con más de 10 mil casos; Tabasco, con más de 7 mil; y en tercer lugar, los estados de Tamaulipas y Jalisco, con más de 6 mil.

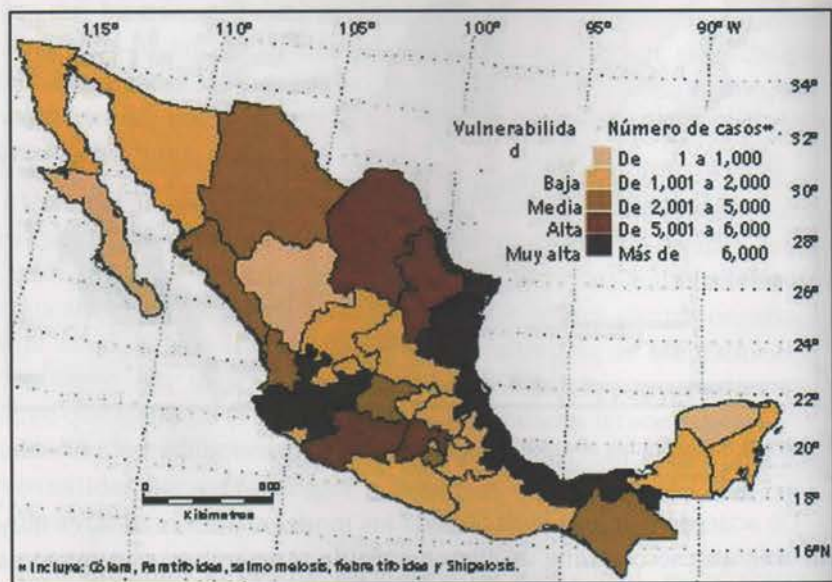


Figura 9. Diferencias absolutas en enfermedades infecciosas, 1990-2025.

Este tipo de enfermedades tienen características endémico-epidémicas (alta incidencia y dispersión geográfica) en México, que se relacionan con deficiencias en el saneamiento ambiental y el abastecimiento de agua potable. Entre los principales vehículos de transmisión se encuentran las fuentes de agua contaminada por algún portador o a través del drenaje; éste sería el caso de enfermedades como el cólera o la fiebre tifoidea. Evidentemente, altas densidades de población, viviendas precarias y deficiencias en servicios públicos son factores que ayudan a definir zonas de riesgo o alta vulnerabilidad.

Incrementos en el suministro de agua

En el último punto, se pueden analizar las diferencias absolutas en el suministro de agua (litros diarios) para cada estado, según las proyecciones correspondientes.

Las diferencias absolutas más altas significan mayores demandas de este vital líquido en un escenario futuro. Una situación de este tipo puede ser particularmente crítica, especialmente en aquellos estados que además de tener climas secos o áridos, con bajos niveles de precipitación, experimentarán temperaturas más cálidas y menores precipitaciones, de acuerdo con los resultados de los modelos climáticos, especialmente con el CCC; esto sucede en estados del centro y del sur del país.

Si a lo anterior agregamos altos niveles de concentración poblacional, tenemos por resultado regiones altamente vulnerables, con grandes dificultades para obtener futuros suministros de agua.

Las mayores demandas se presentarán en siete estados (fig. 10). Destacan sobre todo el Distrito Federal y el Estado de México, a los que se puede clasificar como de muy alta vulnerabilidad, por el enorme costo que significará la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento de agua; en segundo término, pero también con alta vulnerabilidad, los estados de Veracruz, Jalisco, Chihuahua, Coahuila y Guanajuato; de éstos, en los tres últimos predomina el clima seco o árido, y en los dos primeros hay importantes extensiones de clima cálido sub-húmedo, con el agravante de que ambos contienen altas concentraciones de población dentro del territorio nacional.

Grados de vulnerabilidad al cambio climático, según diferencias absolutas, 1990-2025

Como último punto se calculó un grado de vulnerabilidad general para todos los estados de la República Mexicana. Esta vulnerabilidad pondera todas las diferencias absolutas que se refirieron en la sección anterior y obtiene un único valor, el cual fue cartografiado (fig. 11).

De acuerdo con la figura 11, se obtienen cuatro grados de vulnerabilidad: alta (de 4 a 4.9), media (de 3 a 3.9), baja (de 2 a 2.9), y muy ba-

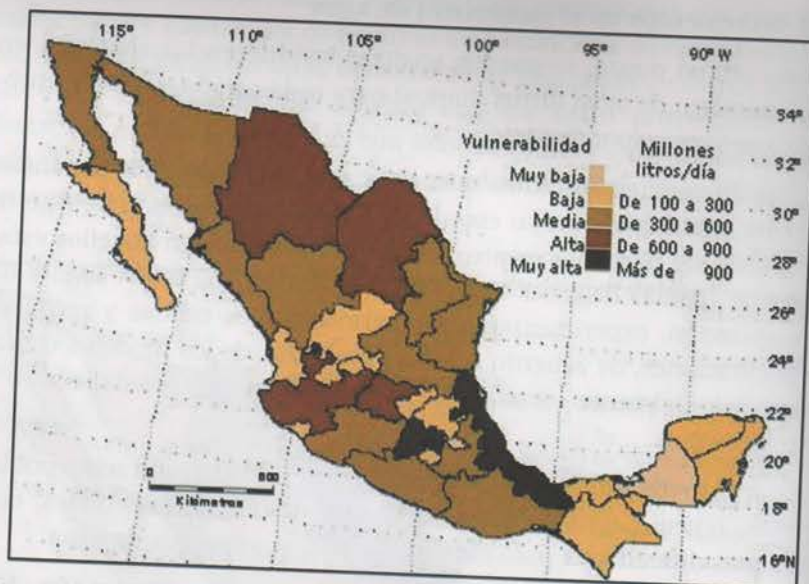


Figura 10. Diferencias absolutas en el consumo de agua (litros/día) por estado, 1990-2025.

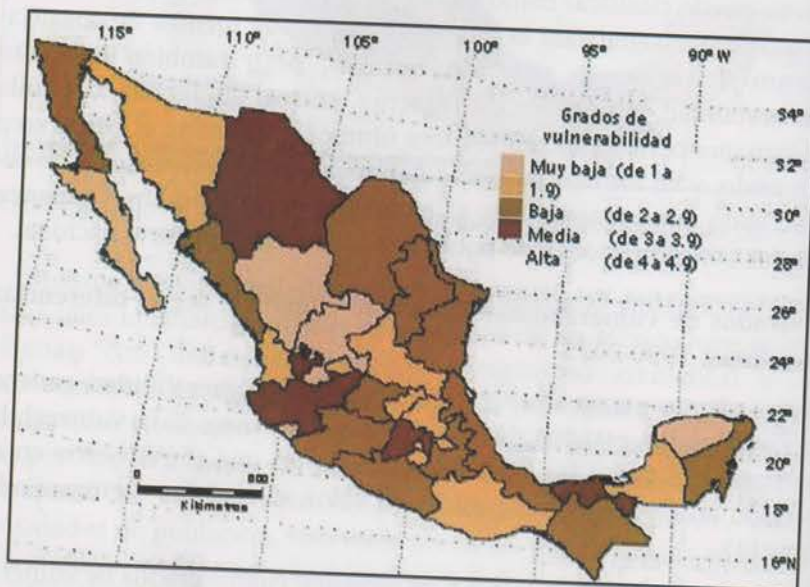


Figura 11. Grados de vulnerabilidad al cambio climático, de acuerdo con las diferencias absolutas, 1990-2025.

de 1 a 1.9). De acuerdo con la ponderación no se obtuvieron valores de 5, lo cual equivaldría a una vulnerabilidad muy alta.

De esta manera, se registran cinco estados con alta vulnerabilidad: Chihuahua, Tamaulipas, Jalisco, México y Tabasco. Chihuahua se destaca con altos valores en incrementos de población total y urbana, y altos crecimientos en el consumo de agua por habitante; el Estado de México presenta una situación similar, con altos incrementos poblacionales y fuertes aumentos en el consumo y suministro total de agua; en el caso de Jalisco, se registra un alto crecimiento de población y un incremento en la incidencia de enfermedades infecciosas y consumo de agua por habitante; y en el caso de Tabasco, se registra un aumento notable en la incidencia de enfermedades infecciosas y vectores, y se incrementa el consumo de agua por habitante.

Si atendemos a aquellos estados que registran vulnerabilidad media, se agrupan 11 de ellos: Baja California, Sinaloa, Coahuila, Nuevo León, Michoacán, Guanajuato, Guerrero, Puebla, Veracruz, Chiapas y Quintana Roo. En términos generales, a los estados de alta vulnerabilidad, referidos en el párrafo anterior, se agregan tres de la frontera norte, cinco en la franja central del país, y en el sur y sureste se añaden dos más (fig. 11).

Opciones de políticas de mitigación

Se puede concluir que, en un escenario futuro de cambio climático global, pueden existir efectos negativos en muchos asentamientos humanos. A grandes rasgos se pueden delinear al menos cuatro grupos de posibles políticas para mitigar dichos efectos⁶ (Scott, *et al.*, 1996).

Infraestructura. Será necesario prever la construcción de infraestructura en aquellos asentamientos que actualmente se consideran más vulnerables. Esta infraestructura se refiere principalmente a: algún tipo de diques o barreras contra aumentos del nivel del mar; sistemas de bombeo; abastecimientos de energía para sistemas de aire acondicionado y obras para nuevos abastecimientos de agua.

Migración. Buscar acciones para disminuir y/o reorientar flujos migratorios a las regiones o ciudades más vulnerables. La migración contribuye ampliamente a incrementar la concentración y densidad de población en ciertos espacios, así como a la transmisión de enfer-

⁶ Véase algunas recomendaciones en Stren, White y Whitney (1992).



medades, por lo que se deberán buscar estrategias económicas para avanzar hacia una distribución más adecuada de población en el territorio nacional.

Reducción de emisiones. Es prioritario definir medidas que contribuyan, tan pronto como sea posible, a reducir el actual nivel de consumo de combustibles fósiles. Hay que tomar en cuenta que muchas emisiones de contaminantes se generan por la quema de estos combustibles en ciudades de dimensión media y grande, a través de vehículos automotores e industrias. Tales emisiones podrán reducirse con el uso de tecnologías más limpias, filtros, menores consumos o uso de energías renovables como la solar.

Monitoreos de morbilidad. Será importante establecer la vigilancia del comportamiento epidemiológico de las diversas enfermedades relacionadas con el clima. Un monitoreo de este tipo permitirá precisar la importancia relativa que adquiere la incidencia de morbilidad en diferentes regiones del país.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar A. G., y M. L. Sánchez, 1993, "Vulnerabilidad y riesgo en la Ciudad de México", en *Ciudades*, No. 17, Red Nacional de Investigación Urbana, Puebla, Pue., México, pp. 31-39.
- Aguilar, A. G., 1995, "El cambio climático global y la vulnerabilidad de asentamientos humanos", en *México ante el cambio climático. Primer Taller de Estudio de País: México ante el cambio climático*, pp. 203-211.
- Aguilar, A. G. y F. Rodríguez, 1995, "The dispersal of urban growth in Mexico, 1970-1990", en *Regional Development Studies*, Journal of the United Nations Center for Regional Development, vol. 1, pp. 1-26.
- Ávila J., J. L. Luna y M. López 1987, "El paludismo en México. Tendencia y situación actual", en *Boletín mensual de epidemiología*, Vol. 2, No. 1, Sector Salud, México.
- Conde, C., O. Sánchez, C. Gay, 1994, "Escenarios básicos y regionales. Estudio de país: México", en *México ante el cambio climático. Primer Taller de Estudio de país: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 39-44.
- Consejo Nacional de Población y Comisión Nacional del Agua, 1993, Indicadores socioeconómicos e índices de marginación municipal

- 1990, CONAPO y Comisión Nacional del Agua, México.
- Zález Mora M., 1992, "Brote de paludismo en el municipio de Los Cabos, Agosto de 1992", en *Boletín mensual de epidemiología*, vol. 7, núm. 10, México, Sistema Nacional de Salud, pp. 181-186.
- Núñez Laos, E., 1992, Crecimiento económico y pobreza en México, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades, México, UNAM.
- Regui, E. y C. Soto, 1967, "Wet-Bulb temperature and discomfort Index Areal distribution in Mexico", en *International Journal of Biometeorology* J. Biometeor., vol. 11, núm. 1, pp. 21-28.
- Regui, E., 1995, "El cambio global del clima y posibles efectos en las necesidades de enfriamiento de locales en México", en *Memorias. Primer Taller del Estudio de País: México ante el cambio climático*, pp. 61-67.
- Rokstein Laurence, S. and E. Davis Robert, 1989, "Weather and human mortality: An evaluation of demographic and interregional responses in the United States", en *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 79, núm. 1, pp. 44-64.
- Rokstein Laurence, S., 1991, "Global warming and human health: What are the possibilities?", en Majumdar, Miller and Cahir (eds), *Air pollution: environmental issues and health effects*, Pennsylvania Academy of Science, pp. 350-360.
- Sherman, D., 1992, "Global change and Mexico", en *Earth and Mineral Sciences*, Vol. 60, Newsletter College of Earth and Mineral Sciences, Penn State University, EUA, pp. 71-76.
- Sagaña, V., C. Conde, O. Sánchez, C. Gay, 1997, "Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico". En *Climate Research*, Vol. 9, Núms. 1 y 2, pp. 107- 114.
- NAS/NAE/IOM, 1992, Policy implications of greenhouse warming. Mitigation, adaptation and the science base. National Academy of Sciences, National Academy of Engineering and Institute of Medicine, Washington, D.C., 917 pp.
- Sázar- Beutelspacher A., M. Aparicio, R. Prevots, P. Nieburg, J. L. Sánchez y H. Medrano, 1990, "Brote de dengue clásico en Tampico-Madero, Tamaulipas", en *Boletín Mensual Epidemiología*, vol. 5, núm. 12, pp. 173-179.
- Tren R., R. White y J. Whitney (Eds.), 1992, Sustainable cities. Urbanization and the environment in international perspective, Westview Press.

- Scott M., A. G. Aguilar, *et al.*, 1996, "Human settlements in a Changing climate: Impacts and adaptation", en Watson R. T. et al, (eds.), *Climate change 1995: Impacts, adaptation and mitigation of climate change: Scientific-technical analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, EUA, pp. 399-426.
- Vázquez Castellanos J. L., J. L. Canales Muñoz, M. A. Nápoles Camacho y M. L. Zárata Aquino, 1989, "Dengue en Guadalajara: Estudio epidemiológico de un brote ocurrido durante los meses de septiembre y octubre de 1988", en *Boletín Mensual de Epidemiología*, Vol. 4, No. 1, Sector Salud, México.
- Woodwell George, M., 1990, "The effects of global warming", en Leggett J. (ed.) *Global Warming. The Greenpeace Report*. Oxford University. pp. 116-32.

UN ESCENARIO DE LAS CONDICIONES BIOCLIMÁTICAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO PARA UNA DUPLICACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE CO₂.

Ernesto Jáuregui* y Adalberto Tejeda**

Resumen

Aplicando el concepto de temperatura efectiva (*TE*), se presenta un escenario de las condiciones bioclimáticas de la Ciudad de México, obtenido al utilizar resultados tanto de predicciones regionales de modelos de circulación general (GCM), para el caso de una duplicación en la concentración de CO₂, como de la proyección de la tendencia de la temperatura de una estación urbana. Se incluyen los mapas de las condiciones climáticas actuales y futuras para la Ciudad de México. Se descubrió que las condiciones actuales del ambiente cambiarán a una atmósfera más cálida debido al proceso de urbanización y al efecto invernadero. El impacto en la población será más importante durante la estación cálida (marzo-mayo), cuando el bioclima de la ciudad probablemente pase de la neutralidad actual a la siguiente categoría de la escala de condiciones cálidas (*TE* 24-27°C) abarcando la mayor parte de la ciudad.

Palabras clave: bioclima humano urbano, Ciudad de México, escenario bioclimático.

Introducción

En diversos autores, se espera que los incrementos medios que se esperan para las condiciones de temperatura globales, bajo una concentración de duplicación en la concentración de CO₂, aumenten conforme aumenta la latitud. En consecuencia, se espera que el impacto del efecto térmico sobre las poblaciones urbanas, debido al efecto invernadero, sea relativamente pequeño en los trópicos. Sin embargo, ya que la isla de calor urbana aumenta con el tamaño de las ciudades, la magnitud del calentamiento del aire urbano, si bien varía con los diversos modos de incremento de la población, será considerablemente más

* Instituto de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.
** Universidad Autónoma Veracruzana, Xalapa, México.



grande en las ciudades de rápido crecimiento de los países en desarrollo. El calentamiento del aire, inducido por la urbe se encuentra entre los más grandes cambios climáticos atribuidos directamente a las actividades humanas.

Las implicaciones del calentamiento global sobre el clima urbano en Europa han sido estudiadas por Auliciems (1992) en relación con la futura administración del clima en interiores. Este autor sugiere que, como resultado del aumento del efecto invernadero, debido a la duplicación en la concentración de CO₂, la generación de gases radiativos en los sistemas de calefacción puede contribuir más al calentamiento global en los países industrializados. Como es de esperarse, en los países en desarrollo el uso de energía para el aire acondicionado probablemente se mantenga bajo, ya que la población, generalmente con ingresos bajos, en vez de invertir dinero se adaptará a las nuevas condiciones térmicas, aclimatándose y cambiando sus vestidos. Auliciems (1992) elaboró mapas de temperaturas de Europa (en términos del "termopreferendum" de bulbo seco) para condiciones de duplicación en la concentración de CO₂ con los incrementos de temperatura que predice el Instituto Goddard para Estudios del Espacio (GISS).

Con los conceptos de temperatura efectiva (TE) y tendencia relativa, McGregor (1995) ha evaluado el posible clima del Pacífico oeste ecuatorial y sur tropical, como consecuencia del calentamiento global y los probables cambios en el confort humano. Para climas futuros, McGregor supone un cambio de temperatura de +2°C con cambios de presión de vapor de 7 a 14% y concluye que el calentamiento global resultará en cambios de frecuencia, duración e intensidad de las condiciones fisioclimáticamente acentuadas en la región oceánica.

El objetivo de este trabajo es mostrar un escenario de las condiciones climáticas a escala local para la Ciudad de México, usando el concepto de TE para evaluar los posibles cambios en el confort humano, como consecuencia tanto del calentamiento global como de la urbanización.

Debe aclararse que los resultados que aquí se presentan son la continuación de un trabajo previo (Jáuregui, *et al.*, 1996) que explora el posible impacto de la duplicación de la concentración de CO₂ en el clima humano del país. Aquel trabajo, apoyado además en las proyecciones demográficas de Aguilar (1996), concluye que en el verano de

mediados del próximo siglo, 49 millones de mexicanos que ahora no utilizan sistemas de aire acondicionado, los requerirán para estar en condiciones de confort entre media mañana y media tarde, a pesar de los procesos de aclimatación que experimentará la población afectada (cuadro 1). Esta información indica que, para el verano, el consumo energético por climatización de edificios habrá de duplicarse en comparación con la actualidad.

Región / Mes	Enero	Abril	Julio	Octubre
Costas del Pacífico	2	11	13	5
Norte	0	12	23	8
Centro (D.F. y Edo. de Méx.)	0	0	0	0
Interior	0	0	1	0
Costas del Golfo y Caribe	2	10	12	12
Total	4	33	49	25

Cuadro 1. Incremento en millones de habitantes urbanos que están bajo situación cálida - media mañana a media tarde - si se verifica el cambio climático hacia el año 2050.

2. El clima de la Ciudad de México

Localizada en un valle elevado (2 250 msnm) en los trópicos (~19° Latitud N), la Ciudad de México es una de las zonas conurbadas más grandes del mundo (14.8 millones de habitantes en 1990).

El clima en los suburbios del norte y del este es semiárido (precipitación de 450 mm/año) y favorece el desarrollo de tormentas de polvo al final de la estación seca (Jáuregui, 1989). En los sectores oeste y sur el clima es más húmedo (800 a 1 000 mm/año). La escasa precipitación durante la estación fría (noviembre-febrero) se origina a partir del paso de frentes que dan lugar al tiempo anticiclónico, con cielos despejados y abundante soleamiento. La lluvia durante el verano está asociada con las tormentas generadas por sistemas de circulación atmosférica tropicales (cálido-húmedos) llamados ondas del este, o bien con efectos orográficos.

La variación anual de la temperatura es pequeña pero el rango diario es grande (~20°C) en la segunda mitad de la estación seca, cuando las inversiones térmicas superficiales de origen radiativo impiden la dispersión de contaminantes atmosféricos.



Las temperaturas medias mensuales en la Ciudad de México varían desde 17 hasta 20°C durante la estación cálida, caracterizadas por noches frías y tardes de templadas a calurosas. Durante este periodo, los habitantes de la ciudad se enfrentan al dilema de llevar ropas apropiadas para una mañana fresca y sufrir las consecuencias de exceso de ropa durante la tarde. Claramente, las temperaturas medias mensuales en este caso no revelan la estructura actual de régimen térmico.

3. Los datos

Los registros medios mensuales de temperatura (°C) y precipitación (mm) estuvieron disponibles a partir de 36 estaciones para el periodo 1951-1980 (fig. 1). Las temperaturas y la precipitación medias mensuales para el futuro fueron obtenidas de los escenarios regionales para México, derivados de las salidas de los modelos CCC (*Canadian Climate Center*) y GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamic Laboratory*), aplicados a México por Conde, *et al.*, (1996).

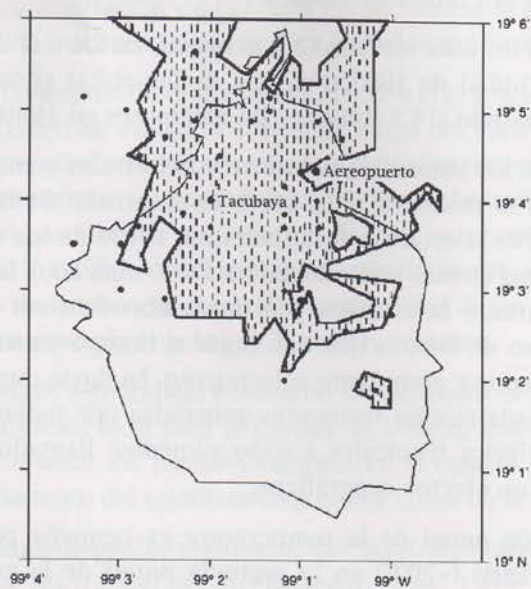


Figura 1. Localización de las estaciones climáticas.

Generalmente se entiende que las variables regionalizadas (por ejemplo, temperatura y precipitación) pueden llegar a ser altamente especulativas ya que la fuente potencial de error es grande (por ejemplo, los efectos de los cambios de nubosidad y otros). Sin embargo, esto que los modelos seleccionados dieron resultados similares de incremento de temperatura media para el centro del país (entre 2.1 y 2.9°C según el cuadro 2), se adoptó el valor más bajo para la estimación de la temperatura esperada, cuando haya una duplicación en la concentración de CO₂, lo cual se supone que ocurrirá aproximadamente en el año 2050. Desde luego que esta suposición introduce otra fuente de incertidumbre.

Cuadro 2. Incremento de temperatura ambiente en Tacubaya (anual y mes de mayo) observado en distintos periodos (columnas 2 y 3). Las columnas 4 y 5 muestran los incrementos estimados para el periodo 1980-2050, siguiendo las tendencias observadas en cada periodo. En los dos últimos renglones se presentan las estimaciones con los modelos CCC y GFDL-R30.

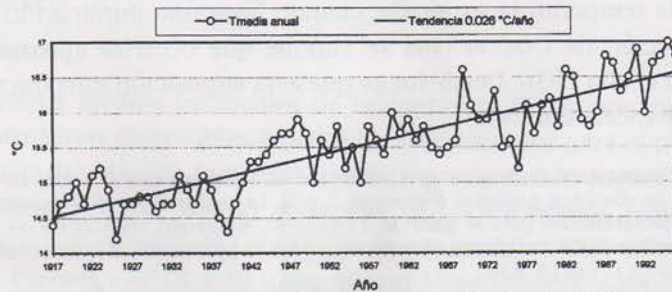
Periodo	Incremento (°C/año) con un nivel de significancia de 0.05.		Incrementos de temperatura estimados para 1980-2050 (°C)	
	Promedio anual	Promedio de mayo (mes más cálido)	Promedio Anual	Promedio de mayo (mes más cálido)
1917-1996	0.026	0.027	1.80	1.89
1950-1996	0.029	0.035	2.0	2.5
1980-1996	0.048	0.079	3.4	5.5
Modelo CCC			2.1	2.2
Modelo GFDL-R30			2.9	2.4

La figura 2 muestra la curva de temperatura media mensual en la estación urbana Tacubaya, localizada al oeste del centro de la ciudad. Las tendencias de temperatura se muestran para tres periodos: 1917-1996 (fig. 2a), 1950-1996 (fig. 2b) y para los años recientes (1980-1996, fig. 2c) en los cuales se ha señalado la razón de incremento más probable de temperatura. Para la proyección del periodo 1980-2050 se seleccionó la razón de incremento de temperatura, obtenida a partir del periodo 1980-1996, ya que ésta da el incremento mayor (3.4°C en promedio anual). Como este incremento de temperatura es supuesto, el resultado de la urbanización como del calentamiento global, tendría que ser superior al incremento de temperatura, debido únicamente al calentamiento por el efecto invernadero (2.1°C).

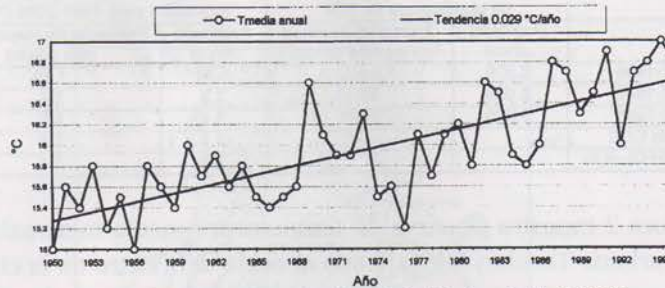
El censo de 1990 ha revelado una ligera disminución en la población del Distrito Federal después de los sismos de 1985, debido en



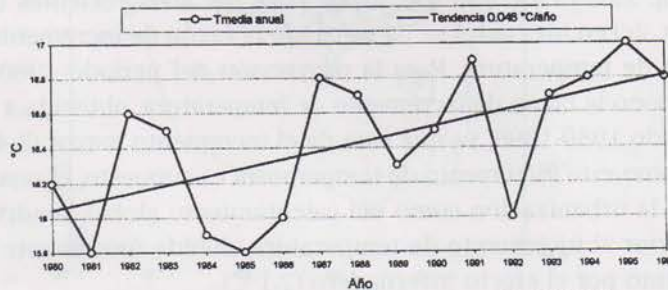
gran parte, a la migración que se ha asentado en áreas metropolitanas (8.7 millones de habitantes) y en ciudades satélites. Esta redistribución de la población contribuye al incremento en la densidad del área edificada en los suburbios y, por lo tanto, es lógico esperar que tienda a mantenerse alta la tasa de crecimiento de la isla de calor durante el siglo XXI.



Temperatura media anual en el observatorio de Tacubaya. Periodo 1917-1996.



Temperatura media anual en el observatorio de Tacubaya. Periodo 1950-1996.



Temperatura media anual en el observatorio de Tacubaya. Periodo 1980-1996

Figura 2. Temperatura media anual y tendencia de la temperatura para los periodos 1917- 1996, 1950-1996 y 1980-1996, en Tacubaya, D. F.

4. Método

En la literatura se puede encontrar un amplio rango de índices para evaluar el bioclima humano (para una revisión ver Landsberg, 1972; Taeler, 1987; Jáuregui, 1996). El índice que se aplica con mayor frecuencia es probablemente la temperatura efectiva (TE), definida como la temperatura del aire en calma que da la misma sensación térmica que las condiciones ambientales, si la humedad relativa fuera de 100%. Mientras el concepto TE es atractivo por su simplicidad de aplicación (Hentschel, 1987), éste ha sido criticado por su aparente insensibilidad a la alta humedad en los climas cálidos (Tromp, 1980); por lo demás la TE no toma en cuenta la radiación ni la ventilación.

Propuesta originalmente por Houghten y Yaglou (1923), debe advertirse que la TE es un índice de respuesta térmica para individuos sedentarios. Las limitaciones del índice han sido puntualizadas por Landsberg (1972), Givoni (1976), Tromp (1980) y otros. No obstante esas desventajas, la TE ha sido ampliamente utilizada para evaluaciones de regímenes y clima local.

Puesto que los escenarios para duplicación de la concentración de CO_2 se proporcionan en términos de cambios de temperatura y precipitación, se ideó que, para dar una imagen más completa para la descripción del bioclima futuro de la Ciudad de México, sería deseable un índice que incluyera a ambas, temperatura y humedad, como en el caso del concepto de temperatura efectiva (TE).

En este artículo se utiliza una ecuación empírica, dada en términos de la humedad relativa para evaluar el impacto del bioclima futuro en la población de la Ciudad de México. Se exploran igualmente los posibles cambios hacia un clima más cálido en categorías ASHRAE.

La ecuación de TE propuesta por Missenard (1937) es:

$$TE = Ta - 0.4(Ta-10)(1-f)$$

donde Ta es temperatura del aire y f es la humedad relativa en décimas.

a) Estimación de la humedad relativa presente (1951-1980).

Para estimar la TE es necesario contar con valores medios mensuales de temperatura y precipitación (T y P respectivamente).

Primero, para el periodo 1951-1980 se calculó la presión de vapor e (hPa) media mensual mediante una ecuación de regresión bilineal:

$$e = -6.19 + 1.08 T + 0.0156 P \quad (1)$$

donde T es la temperatura media mensual en °C y P es la precipitación media mensual en mm.

La Ecuación 1 tiene un error estándar de estimación de 3.0 hPa y un coeficiente de correlación lineal de 0.8961 (para 67 estaciones meteorológicas y 12 meses, es decir, 804 casos).

La humedad relativa (f en decimales) es:

$$f = \frac{e}{e_s}$$

donde la presión de vapor de saturación e_s se calculó, de acuerdo con la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$e_s = \left(\frac{21.4T + 494.41}{T + 273.15} \right) \quad (2)$$

b) Estimación de TE utilizando los resultados GCM de Conde

Como ya se mencionó, la temperatura efectiva media mensual (Missanard, 1937) se puede calcular como:

$$TE = \bar{T} - 0.4 (\bar{T} - 10) (1 - f) \quad (3)$$

Para un escenario de duplicación en la concentración de CO_2 , Conde, *et al.* (1996), muestran que los incrementos de temperatura media mensual en °C esperados para el centro del país, con dos modelos de circulación general (GCM), el CCC (modelo canadiense) y el GDFL (modelo estadounidense) ocurren como se indica en el cuadro 3; y la precipitación total media mensual para condiciones de duplicación en la concentración de CO_2 puede evaluarse o estimarse para el centro de México a partir de los valores normales del periodo 1951-1980 (P_{51-80}):

$$P_{2CO_2} = K(P_{51-80})$$

donde K tiene los valores mensuales del cuadro 4 (según Conde, *et al.*, 1996):

Cuadro 3. Incrementos de la temperatura media mensual (°C) en el centro del país, de acuerdo con los modelos CCC y GFDL-R30, en las versiones usadas por Conde *et al.* (1996).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
CCC	1.6	1.9	1.9	2.3	2.2	1.9	2.0	2.3	2.3	2.5	2.2	1.8
GFDL-R30	1.6	3.3	3.3	3.5	2.4	2.6	2.3	2.4	2.6	2.7	2.7	3.6

Cuadro 4. Incrementos relativos de precipitación para el centro del país, según el modelo GFDL-R30, en la versión de Conde, *et al.* (1996).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
K	1.37	0.88	1.27	1.08	1.23	1.34	1.26	1.31	1.30	1.03	1.22	1.00

A partir de las ecuaciones 1 y 2, la humedad relativa media mensual para el año 2050 (aproximadamente para condiciones de 2CO₂) es:

$$(2) \quad f_{2CO_2} = \frac{-6.19 + 1.08 T_{2CO_2} + 0.0156 P_{2CO_2}}{\exp\left(\frac{21.4 T_{2CO_2} + 494.41}{T_{2CO_2} + 273.15}\right)}$$

Para $T_{2CO_2} = \bar{T} + \Delta T$ y $P_{2CO_2} = KP_{51-80}$, se ha usado el escenario Canadiense, porque sus resultados son menos catastróficos.

(3) Por lo tanto, la temperatura efectiva media mensual para condiciones de 2CO₂ es:

$$TE_{2CO_2} = T_{2CO_2} - 0.4 (T_{2CO_2} - 10) (1 - f)$$

En ausencia de advección significativa, Geiger (1957) sugiere que la presión de vapor no varía entre las 10 y las 14 horas, y la humedad relativa mínima promedio (representativa para las 14:00-15:00 horas) es:

$$f_{\min 2CO_2} = \frac{\bar{e}}{\left(\frac{21.4 T_{\max} + 494.41}{T_{\max} + 273.15}\right)}$$

donde $\bar{T}_{\text{máx}}$ es la temperatura máxima promedio mensual. Por lo tanto, la temperatura efectiva (media máxima mensual) es:

$$TE_{\text{máx}2\text{CO}_2} = \bar{T}_{\text{máx}} - 0.4 (\bar{T}_{\text{máx}} - 10) (1-f)$$

c) La aproximación de la tendencia de temperatura

Otra posibilidad es usar la tendencia de la temperatura (3.4 °C/70 años), según la figura 2c, como explícitamente se señala en el cuadro 2 para el periodo 1980-1996. De ese modo, la temperatura media máxima según la tendencia será:

$$\bar{T}_{\text{máxtrend}} = (T_{\text{máx } 51-80}) + 3.4^{\circ}\text{C}$$

y se puede estimar la TE para cada estación climatológica de la fig. 1:

$$TE_{\text{máxtrend}} = F(T_{\text{máxtrend}}, f_{\text{min CCC}})$$

donde F representa el conjunto de funciones descritas en el subapartado anterior.

4. Resultados

a) Estación cálida

La figura 3 muestra la distribución de la temperatura efectiva (TE) máxima promedio para abril (un mes cálido), para el periodo de referencia 1951-1980. En la mayor parte de la ciudad prevalecen condiciones de neutralidad (TE 19-24°C) mientras que se localizan pequeñas islas de calor en el área del centro de la ciudad. Por supuesto, un incremento de 2.1°C en la temperatura anual, obtenido por el modelo CCC, aproxima los resultados en una expansión del área urbana donde las condiciones más cálidas están lejos del confort neutral que prevalecerá en la Ciudad de México durante abril, como se ilustra en la figura 4.

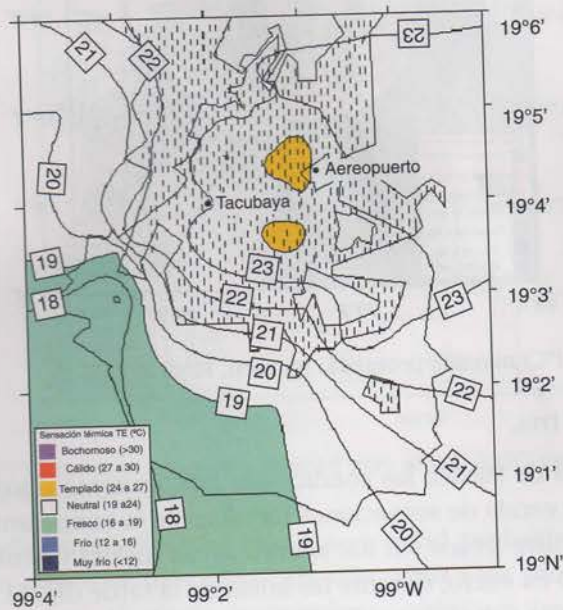


Figura 3. TE (°C) máxima promedio en abril 1951-1980.

Puesto que se espera que la aproximación de tendencia de temperatura genere incrementos de temperatura aún más grandes, se anticipa que las condiciones bioclimáticas futuras, durante el mes cálido de abril son más cálidas. TE 25-27°C, lo cual significa un excedente

para la escala de confort de la ASHRAE (1966), y abarca una porción grande del este y el centro de la Ciudad de México. Únicamente los actuales suburbios del este y del sur mantendrían condiciones neutras de confort.

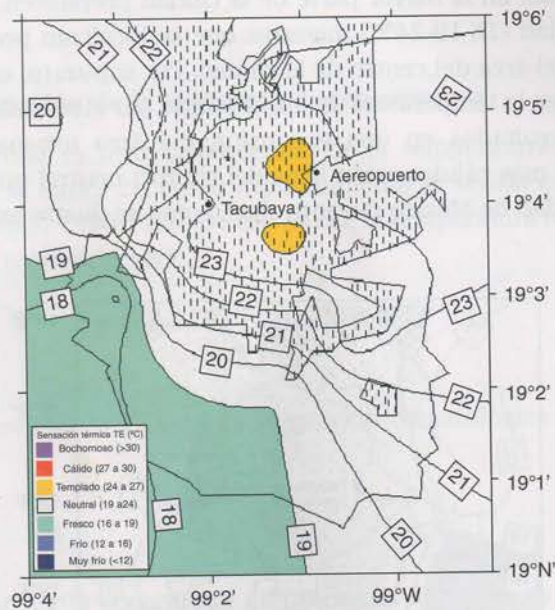


Figura 4. TE (°C) máxima promedio en abril. Modelo CCC.

b) Estación fría.

En la Ciudad de México las condiciones bioclimáticas actuales, expresadas por la escala de sensaciones térmicas de la temperatura efectiva (TE), están entre fresco (en los suburbios sur/oeste) y neutral (centro de la ciudad) en enero, durante las horas de la tarde (fig. 5). Las condiciones térmicas futuras pasarán de las condiciones neutras a la hora de la temperatura máxima, según lo estimado en los escenarios tanto del 2CO₂ como de la tendencia de la temperatura. (figs. 6, 7 y 8).

5. Conclusiones

Una característica de los climas tropicales es el amplio rango de temperaturas diurnas comparado con el anual. Localizado en los trópicos (19°N), el clima de la Ciudad de México es predominantemente frío (a

neutral durante la estación cálida) debido a su alta elevación (2 250 msnm); mientras que las noches varían de muy frío a frío a lo largo del año, condiciones neutrales de confort prevalecen durante la mayor parte de las horas del día. Por supuesto, la abundante radiación solar observada durante la estación seca (noviembre-abril) proporciona una carga adicional de calor. La intercepción de la radiación por las nubes y la evaporación, a partir de las superficies húmedas, durante la estación húmeda, hace al ambiente urbano favorablemente neutral.

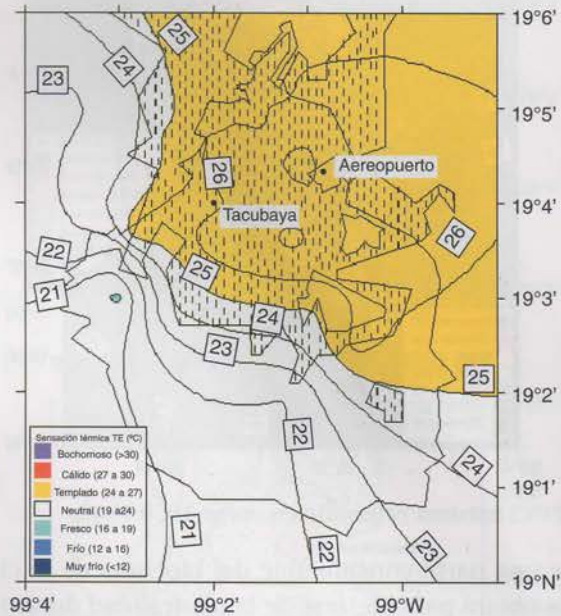


Figura 5. TE (°C) máxima promedio en abril para el año 2050, estimada con la tendencia de la temperatura.

Las condiciones señaladas con anterioridad probablemente cambiarán a un ambiente más cálido, debido tanto a los procesos de urbanización como al efecto invernadero, como se ilustró en este análisis. Las posibles fuentes de error son grandes en la caracterización de las condiciones de temperatura y humedad futuras en la escala local. Las suposiciones que se han hecho (p. ej., el año en el cual tendrá lugar la duplicación del CO₂, la razón de incremento de temperatura futura debida a la urbanización, entre otras) son con claridad altamente especulativas. Además, mientras la razón de incremento de

la intensidad de la isla de calor se ha supuesto constante en las décadas futuras, es probable que dada la estabilización 1980-1990 de la tendencia de incremento poblacional en la ciudad, la razón de incremento de la temperatura del aire urbano declinará y, por lo tanto, la temperatura estimada para el futuro tenderá a ser menor.

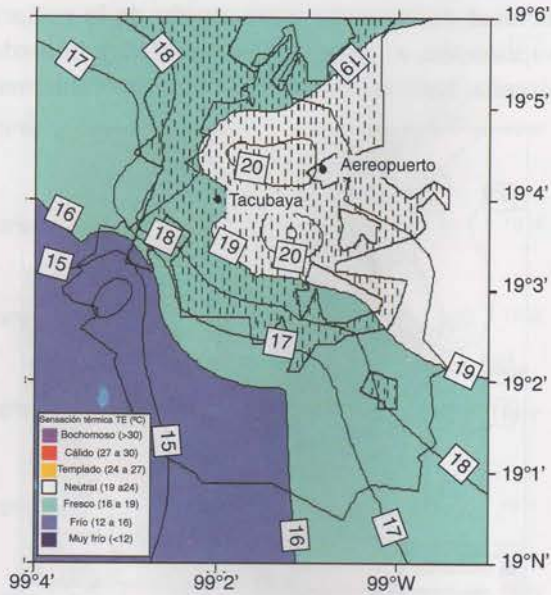


Figura 6. TE (°C) máxima promedio en enero 1950-1980.

Mientras una parte considerable del bioclima de la ciudad probablemente cambiará para alejarse de la neutralidad durante la estación cálida (toda una escala de categorías de la ASHRAE), las condiciones térmicas durante la estación fresca/fría tenderán a ser menos rigurosas. Debe hacerse una consideración: es probable que la población nativa logre gradualmente aclimatarse a las nuevas condiciones térmicas que se espera prevalezcan en el siglo XXI.

Agradecimientos

Los autores agradecen a J. L. Vázquez y a E. Luyando por la realización de mapas y gráficas en computadora. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT Ref. T9507-2130P).

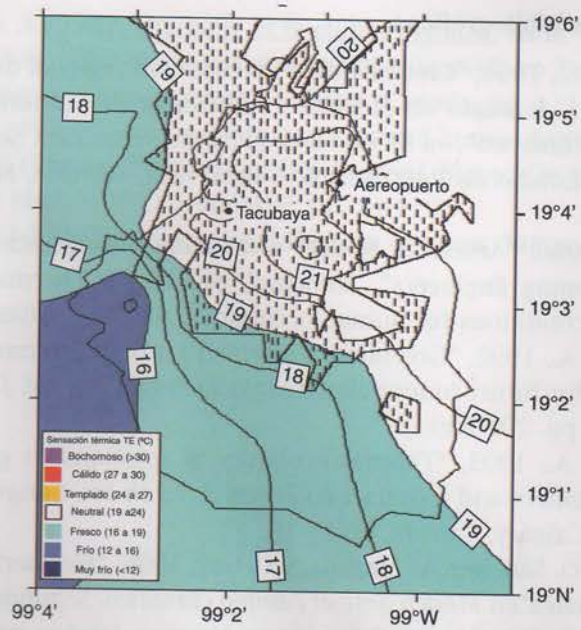


Figura 7. TE (°C) máxima promedio en enero. Modelo CCC.

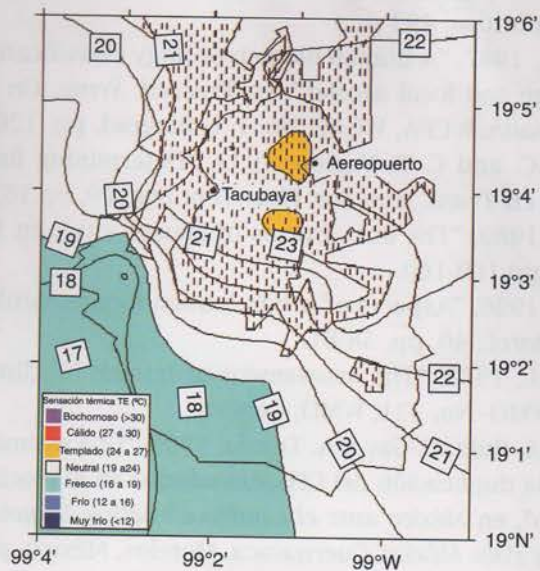


Figura 8. TE (°C) máxima promedio en enero para el año 2050, estimada con la tendencia de la temperatura.

Referencias bibliográficas

- Aguilar, A. G., 1996, "Crecimiento y distribución regional de los asentamientos humano en México. Condiciones de vulnerabilidad al cambio climático", en *México ante el cambio climático. Segundo Taller del Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 243-250.
- ASHRAE; 1966: "American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers", *Standard*, pp. 55-56, Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, Atlanta, Ga.
- Auliciems, A., 1992, "Greenhouse warmed Europe: thermoregulatory criteria for future indoor climate management", en *Int. J. Biometeorol.*, 36, pp. 201-209.
- Auliciems, A., 1993, "Thermoregulatory adaptations to global warming-winners and losers", en *Proceed. 13 th Int. Congress Biometeorol.*, Calgary, Canada, pp.12-18.
- Conde, C., O. Sánchez, V. Magaña, y C. Gay, 1996, "Escenarios básicos y regionales" en *México ante el cambio climático. Segundo Taller del Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 101-112.
- Geiger, R., 1957, *The climate near the ground*, Harvard University Press, Cambridge, 493 p.
- Hentschel, G., 1987, "A human biometeorology classification of climate for large and local scales", en *Proceed. Symp. On climate and human health*, WCPA, WCAP. No. 1. Leningrad, pp. 120-138.
- Houghten, F.C. and C. P. Yaglou, 1923, "Determining lines of equal comfort", en *Trans. Am. Soc. Heat Vent Eng*, 29, pp.163-176.
- Jáuregui, E., 1989, "The dust storms of Mexico city", en *Int. J. Climatology*, 9, pp.169-180.
- Jáuregui, E., 1996, "Aspects of urban human biometeorology", en *Int. J. Biometeorol.*, 40, pp. 58-61.
- Landsberg, H., 1972, "The assessment of human bioclimate", en *TN No. 123 WMO- No. 331*, WMO, Geneva.
- Jáuregui, E., A. Ruiz, C. Gay y A. Tejada, 1996, "Una estimación del impacto de la duplicación del CO₂ atmosférico en el bioclima humano de México", en *México ante el cambio climático. Segundo Taller del Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, México, pp. 219-246.
- McGregor, G.R., 1995, "The human bioclimates of Western South Pacific islands and Climate Change", en *Int. J. of Biometeorol.*, 39, 1, pp. 5-12.

- Missenard, A., 1937, *L'homme et le climat* Eyrolles, Paris.
- Oke, T., 1993, "Global change and urban climates", en *Proceed. 13th Int. Congress Biometeorology*, Calgary, Canada, pp. 123-134.
- Taessler, R., 1986, "Climate characteristics and human health -the problem of climate clasification", en *Proceed. Symp. On Climate and Human Health WMO*, Leningrad, pp. 81-119.
- Tromp, S., 1980, *Biometeorology*, Heyden, London, 346 pp.