

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 bajo 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 programa del Estudio de País, impulsado por el *U. S. Country Studies Program*.

En este estudio, se presentan los cambios climáticos regionales para México, obtenidos de 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 e 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 salidas de MCG con clima regional, que podría emplearse en futuros estudios de vulnerabilidad.

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

1. Introducción

El proyecto 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: áreas costeras, agricultura, hidrología, bosques, desertificación y sequía, asentamientos humanos, y energía e industria. Todos ellos, excepto áreas 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 al menos 30 años de datos, para que sean representativos de las condiciones climáticas promedio. Se considera que en ese lapso hubo, para la localidad o región de estudio, una amplia gama de años con condiciones climáticas muy variadas. En el Estudio de País: México, para construir los escenarios climáticos base 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 deforestación, por ejemplo; o bien, para el crecimiento de población o en la producción en la región de estudio. Los

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

** Instituto Nacional de Ecología, Semarnap.

estudios de vulnerabilidad no sólo incluyen la sensibilidad del sistema a 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 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 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 impactos del cambio climático, es necesario determinar las condiciones de clima actual y las regiones más vulnerables ante fluctuaciones de éste. Los cambios climáticos, obtenidos de los MCG, se pueden interpretar de una manera similar. Las características de los datos observados y las salidas de los MCG (tipo, disponibilidad de salidas de los MCG, homogeneidad, resolución espacial, etcétera.) deben ser consideradas al hacer interpretaciones de los experimentos de cambio climático.

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

Las simulaciones de cambio climático por 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 (p. ej. 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 doblamiento de CO₂ (Conde, *et al.*, 1994). Sin embargo, en última instancia, se determinó que son más adecuados nuevos conjuntos de datos 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 (hurricane.ncdc.noaa.gov). Con datos climáticos del periodo 1948-1988, Douglas, basado en criterios como la coherencia entre datos pertenecientes a las estaciones climatológicas, características geográficas de cada estación, ha definido dieciocho regiones climáticas para México. Cada región incluyó un mínimo distinto de estaciones en relación con la variable muestreada.

En este estudio se utiliza el periodo 1951-1980 de la base de datos de A. Douglas, para obtener así 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. El primero, consistió en incrementos arbitrarios de temperatura (+2 y +4° C) y precipitación ($\pm 10\%$ y $\pm 20\%$), así como combinaciones de ambos. Los incrementos funcionaron como pruebas de sensibilidad correspondientes a calentamiento global, bajo cambios uniformes en las condiciones climáticas sobre México. Estas pruebas de sensibilidad se realizaron en la mayoría de los análisis de vulnerabilidad en el Estudio de País: México.

Una aproximación más comprensible físicamente es el uso de las salidas de los MCG que corresponden a experimentos de doblamiento en la concentración de CO₂, con temperatura y precipitación en superficie, generados por los esquemas propios de los MCG. Varios MCG se han usado para estudiar el impacto del incremento en los gases de 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 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 de bióxido de carbono se obtienen suponiendo que esas condiciones prevalecen de 10 a 15 años. Así, por ejemplo, la temperatura en condiciones de 2xCO₂ 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 2xCO₂ menos el valor promedio correspondiente, bajo condiciones de 1xCO₂. Las anomalías para la precipitación (o radiación) resultan de efectuar el cociente de esa variable bajo los dos escenarios (2xCO₂ entre 1xCO₂).

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 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 invierno y verano de temperatura y precipitación 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. Incrementos arbitrarios en temperatura y precipitación se aplican 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.

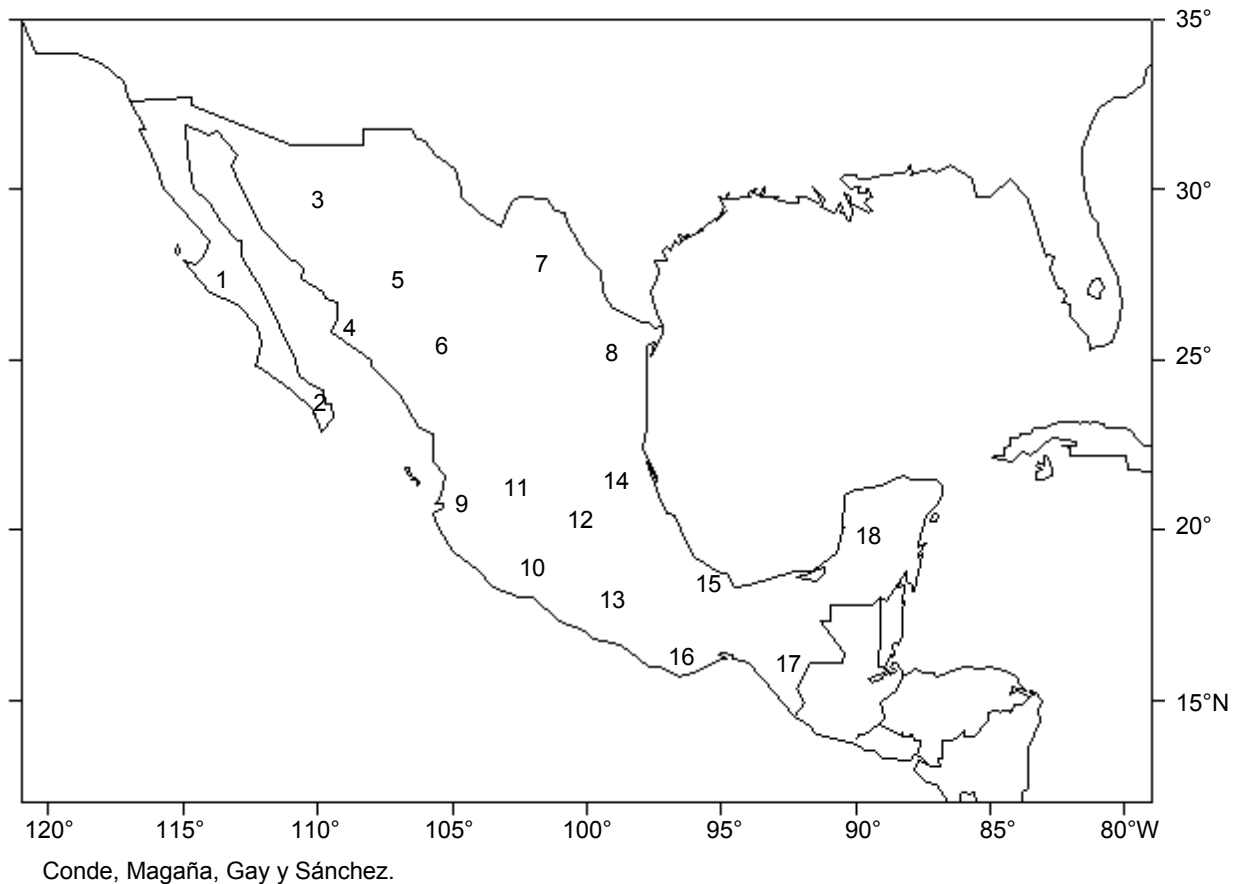
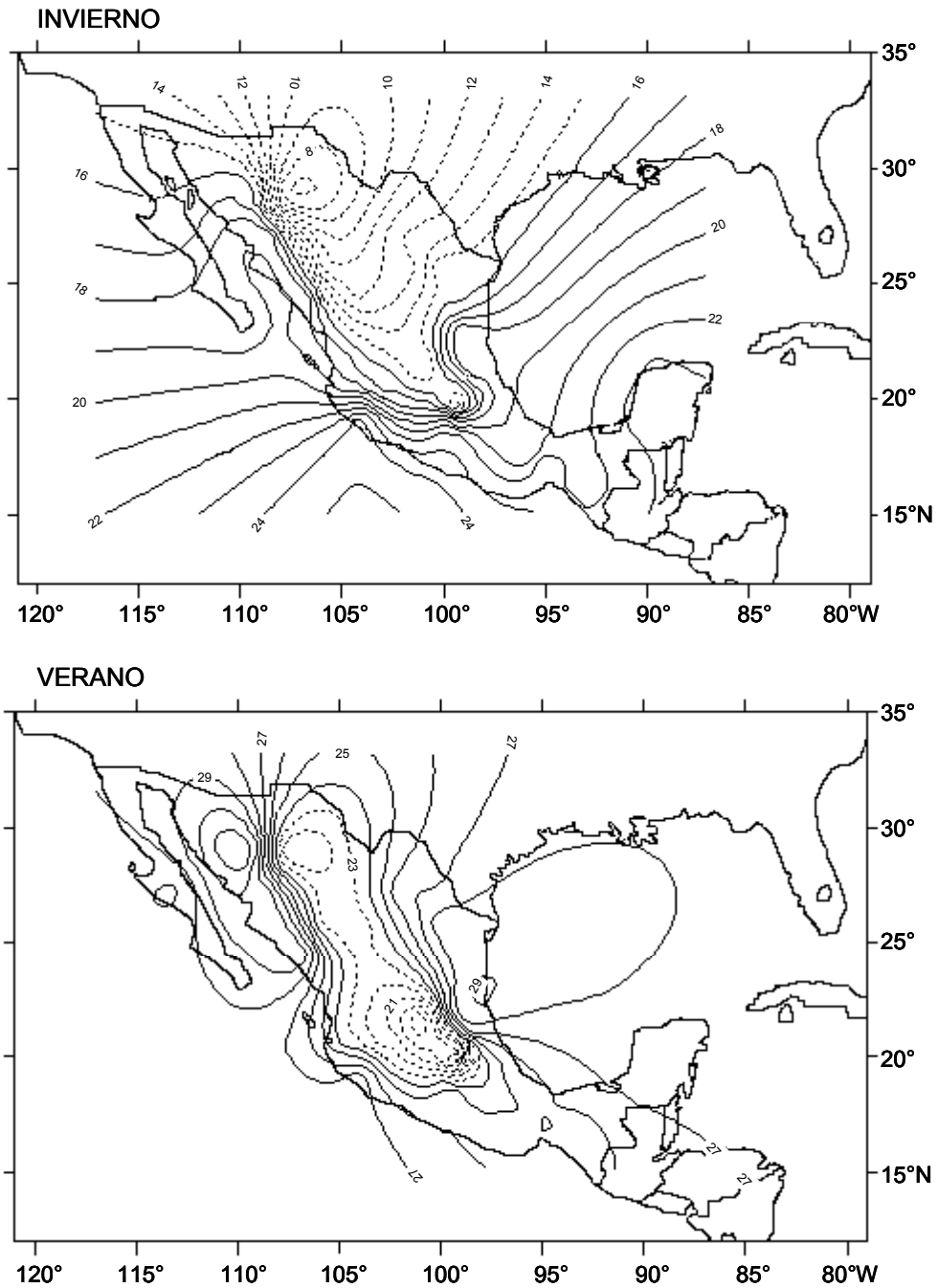


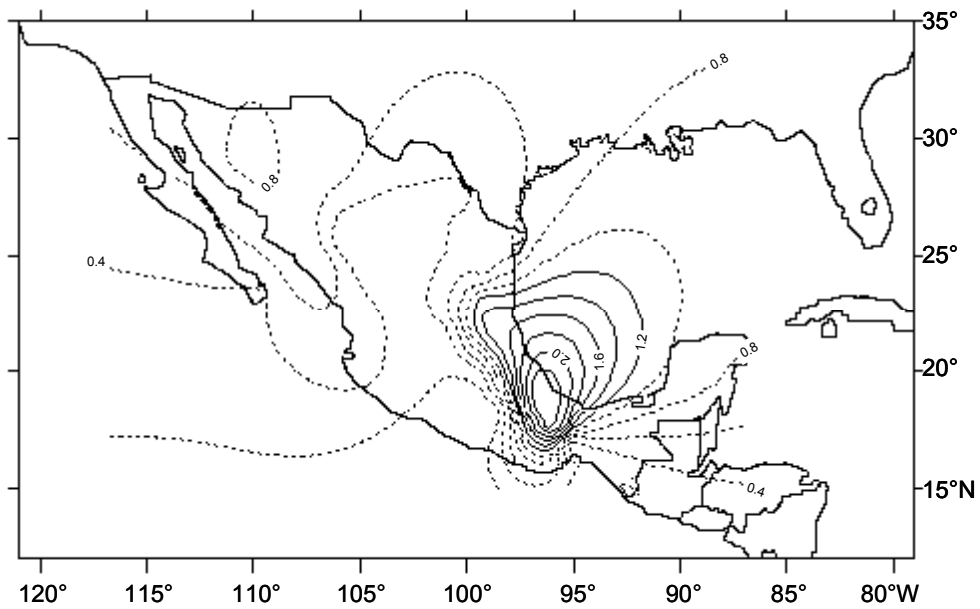
Figura 1. Mapa con las 18 regiones propuestas por A.



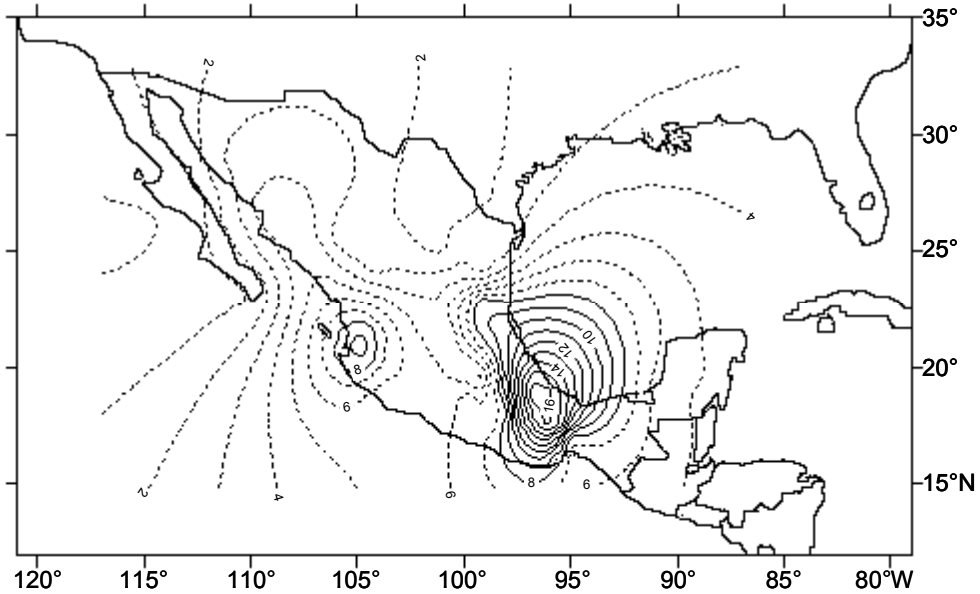
Conde, Magaña, Gay y Sánchez.

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

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

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

región	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	0.5	0.5	1.0	0.9	0.8	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6	0.4	0.3	0.3	1.3	2.2	0.2	0.3	0.9
feb	0.5	0.2	0.6	0.4	0.5	0.2	0.4	0.7	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	1.4	2.0	0.2	0.3	0.8
mar	0.3	0.1	0.4	0.3	0.3	0.1	0.3	0.7	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	1.6	2.0	0.2	0.3	0.8
abr	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.6	1.5	0.2	0.1	0.3	0.9	0.7	2.6	2.6	0.3	1.0	1.0
may	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.3	1.2	2.4	0.3	0.4	1.0	1.8	2.4	4.2	5.0	1.7	2.9	2.9
jun	0.0	0.1	1.1	1.4	1.6	1.6	1.5	3.2	5.6	5.0	5.0	3.5	6.5	9.9	16.5	7.8	7.4	5.3
jul	0.2	1.0	4.8	6.3	4.6	2.8	1.3	2.0	11.2	6.3	7.0	4.0	6.4	8.7	17.2	5.8	6.4	5.0
ag	0.3	2.4	4.3	7.0	4.6	3.4	1.7	3.3	11.4	6.0	6.0	3.9	6.3	7.7	15.0	6.0	6.1	5.4
sept	0.4	2.7	1.9	4.0	2.9	2.6	2.3	5.6	10.6	8.1	4.8	3.6	6.5	11.4	17.2	8.6	7.7	6.8
oct	0.3	1.0	0.9	1.7	1.0	0.9	1.1	2.8	3.3	3.3	1.7	2.6	2.5	5.7	9.7	2.8	3.8	3.9
nov	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.9	0.6	0.7	0.4	1.0	1.3	2.9	4.8	0.8	1.0	1.5
dic	0.6	0.5	0.9	1.0	0.8	0.3	0.4	0.5	0.7	0.3	0.3	0.3	0.1	1.5	2.7	0.3	0.4	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 para el CCC (figs. 4 y 5) y para 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.

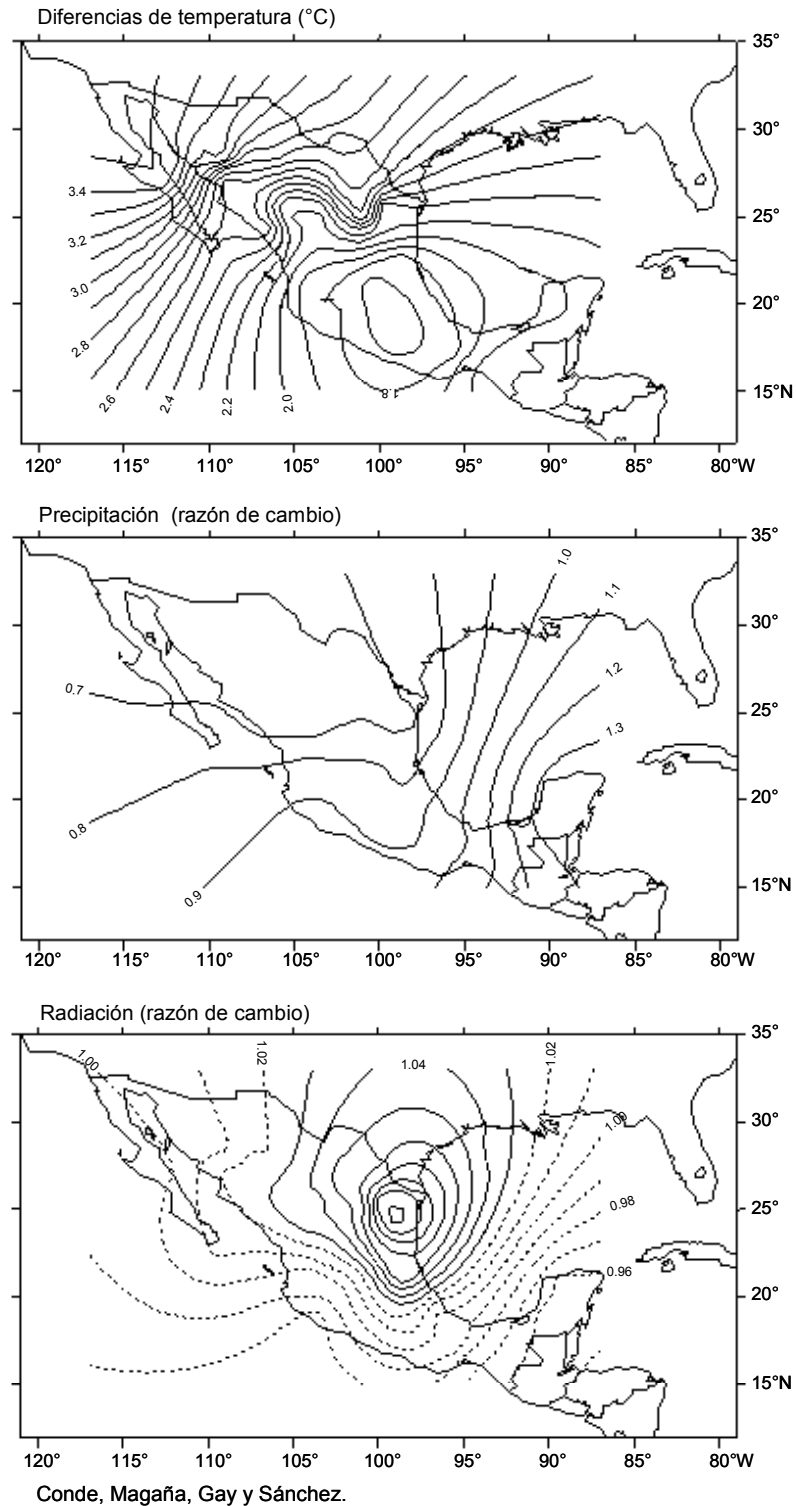


Figura 4. Anomalías de temperatura (°C), precipitación (razón de cambio) y radiación (razón de cambio) para invierno, obtenidas a partir del modelo CCC.

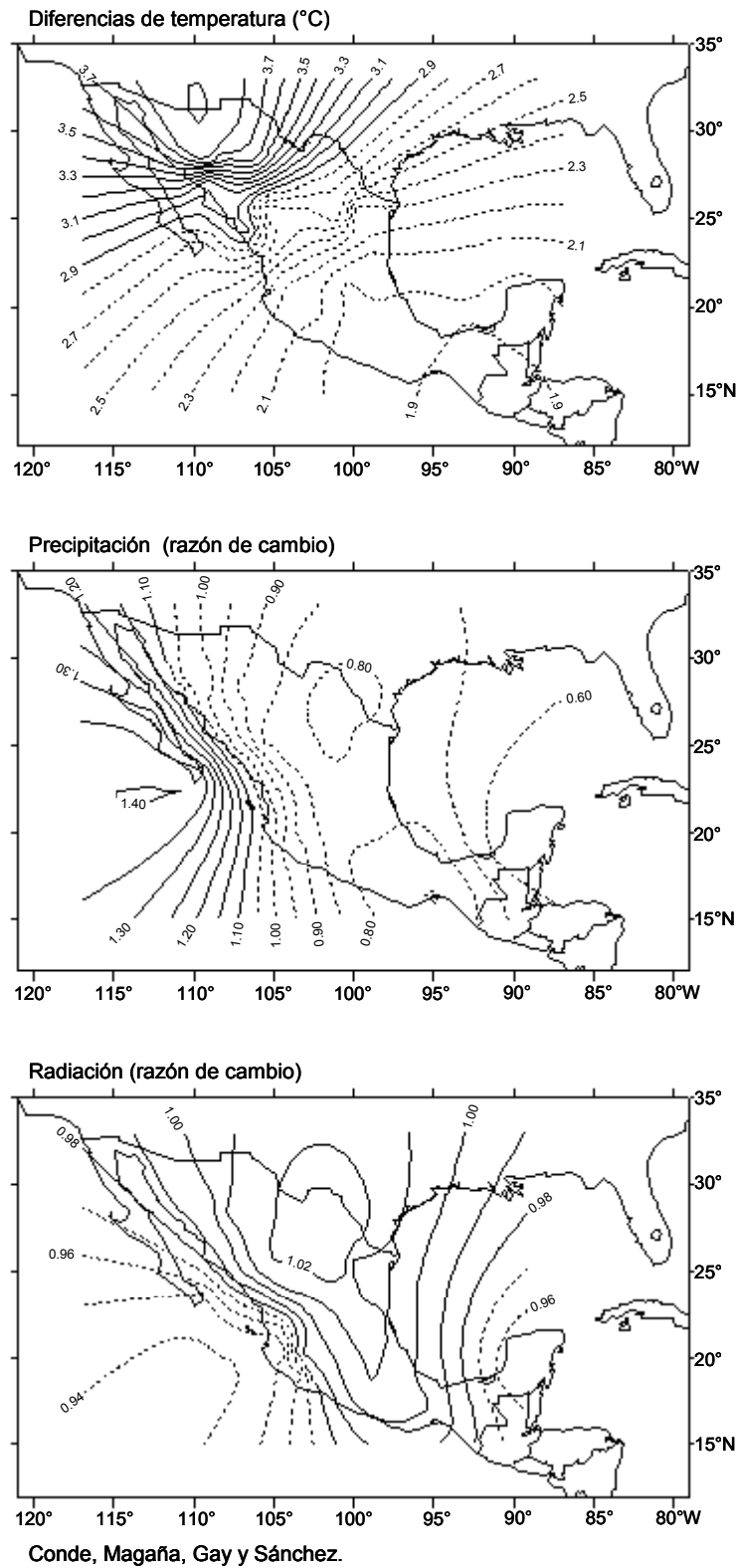


Figura 5. Anomalías de temperatura (°C), precipitación (razón de cambio) y radiación (razón de cambio) para verano, obtenidas a partir del modelo CCC.

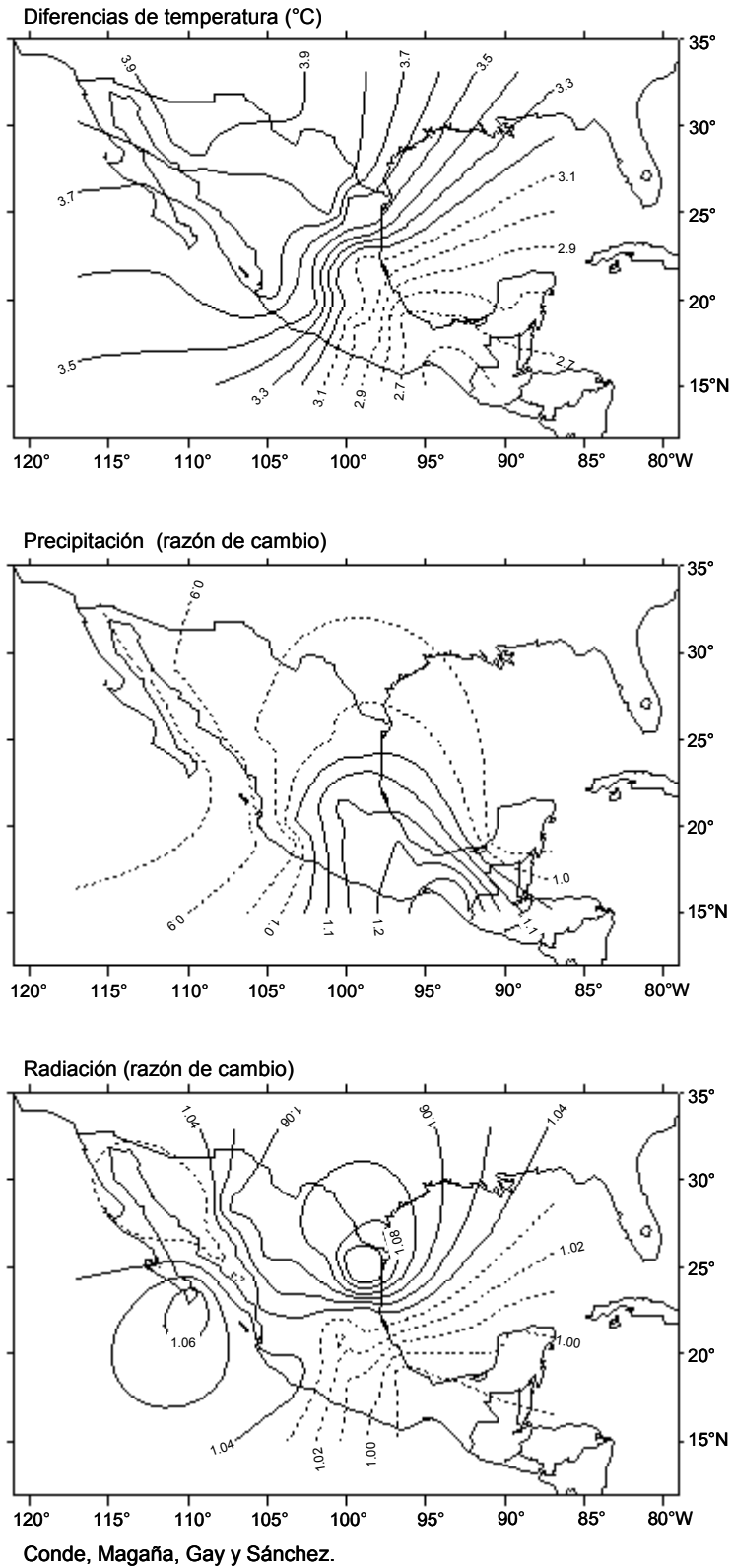


Figura 6. Anomalías de temperatura (°C), precipitación (razón de cambio) y radiación (razón de cambio) para invierno, obtenidas a partir del modelo GFDL-R30.

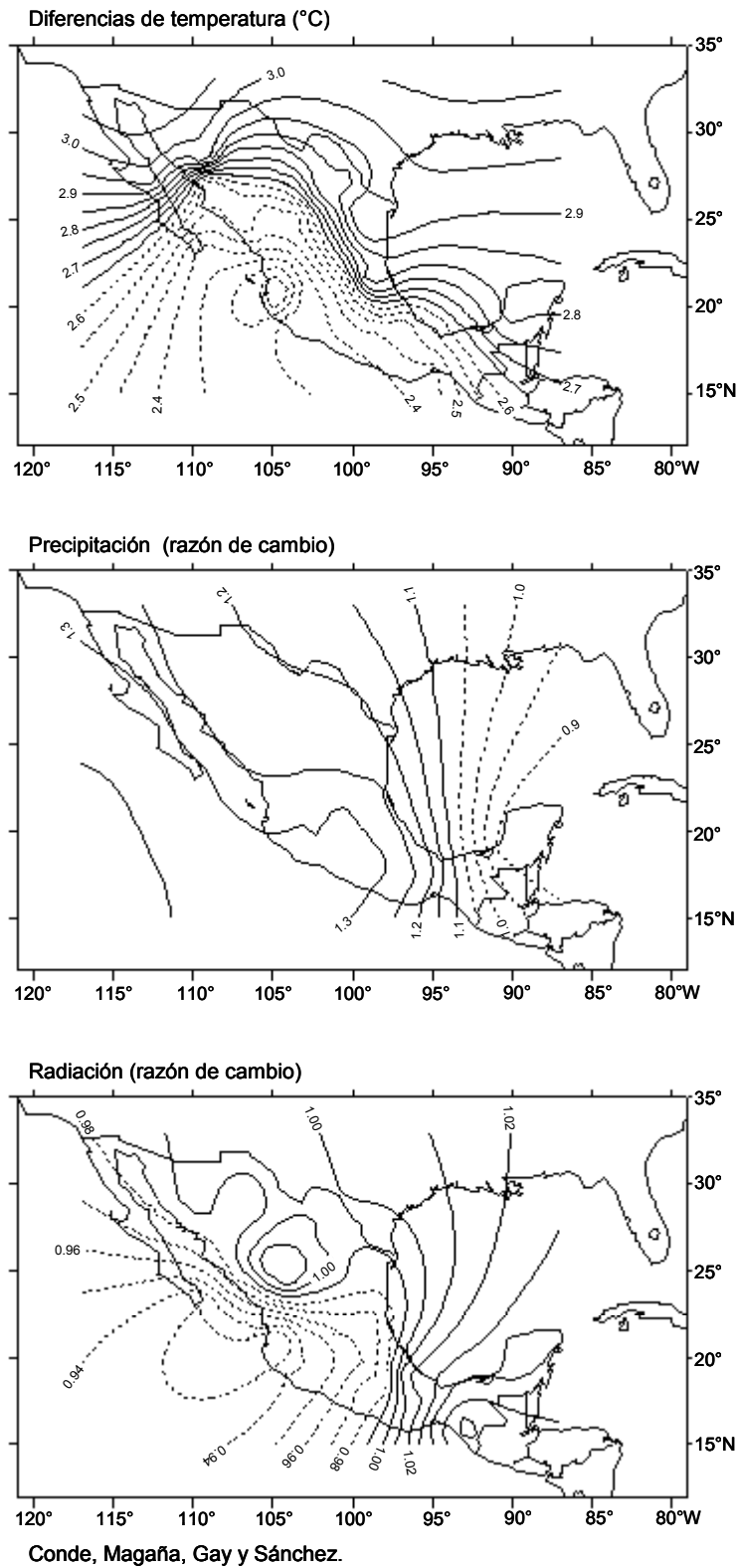


Figura 7. Anomalías de temperatura (°C), precipitación (razón de cambio) y radiación (razón de cambio) para verano, obtenidas a partir del modelo GFDL-R30.

Cuadro 2.

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

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	4.1	3.9	4.3	4.1	4.1	3.8	3.4	2.9	3.9	3.7	3.6	2.9	2.7	2.6	2.3	2.2	2.1	2.4
feb	3.8	3.5	3.9	3.7	4.0	3.8	4.1	3.7	3.6	3.3	3.3	3.1	2.9	3.2	2.9	2.8	2.9	3.3
mar	4.4	4.1	5.5	5.0	5.6	4.7	4.4	3.6	4.0	3.5	3.7	3.3	3.2	3.2	2.9	2.7	2.6	2.6
abr	3.0	2.6	4.0	3.6	4.8	4.0	4.7	3.7	2.9	2.7	3.1	3.1	3.0	3.2	2.4	2.0	1.5	1.2
may	3.3	2.6	4.0	3.3	4.2	3.2	3.5	3.0	2.5	2.4	2.5	2.3	2.1	2.5	2.1	2.1	2.3	2.9
jun	3.5	2.9	3.5	3.1	3.4	2.8	2.9	2.7	2.5	2.6	2.6	2.7	2.6	2.7	2.5	2.4	2.5	2.4
jul	2.8	2.2	3.3	2.4	3.0	2.6	3.2	3.2	2.0	2.2	2.2	2.4	2.4	2.8	2.6	2.6	2.8	3.3
ag	2.7	2.0	2.2	2.0	1.9	2.0	2.4	2.9	2.2	2.3	2.4	2.5	2.4	3.0	2.4	2.3	2.4	2.8
sept	3.3	2.5	2.8	2.5	2.6	2.6	3.0	3.2	2.4	2.5	2.6	2.7	2.6	3.1	2.6	2.5	2.5	3.0
oct	3.6	2.8	3.8	3.2	3.8	3.1	3.2	3.0	2.7	2.7	2.7	2.6	2.5	2.9	2.6	2.6	2.7	2.9
nov	2.7	2.7	3.4	3.2	3.6	3.5	3.7	3.6	2.7	2.5	2.7	2.7	2.5	3.2	2.5	2.5	2.8	2.9
dic	3.2	3.6	3.5	3.5	3.5	3.6	4.1	4.0	3.7	3.7	3.8	3.5	3.3	3.5	2.9	2.7	2.6	2.7

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

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	0.7	0.9	0.8	0.9	0.8	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.4	1.6	1.6	1.5	0.9
feb	0.7	0.5	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	1.0	0.8
mar	1.1	0.8	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3
abr	0.8	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.3
may	1.1	2.0	1.3	1.5	1.3	1.3	1.0	1.1	1.4	1.3	1.3	1.1	1.0	1.2	0.9	0.9	0.9	1.1
jun	1.1	1.0	0.8	0.8	0.6	0.9	0.8	1.0	1.2	1.4	1.3	1.4	1.5	1.2	1.5	1.5	1.3	1.0
jul	1.3	1.5	1.1	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.2	1.0	0.9	0.8	0.6
ag	1.6	1.4	1.8	1.6	1.8	1.5	1.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
sept	2.7	1.5	1.1	1.3	1.0	1.2	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.5	1.7	1.7	1.4
oct	0.5	0.9	0.9	1.0	1.3	1.1	1.3	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.0	1.3	1.6	1.5	1.1
nov	0.8	1.0	0.9	1.1	1.0	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.4	1.2
dic	1.0	1.0	1.2	1.2	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.1

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

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
feb	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
mar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
abr	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
may	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
jun	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0
jul	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1
ag	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0
sept	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
oct	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	1.0
nov	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	0.9	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
dic	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9

Cuadro 3.

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

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	3.51	2.5	2.2	2.2	2.1	1.4	2.2	1.9	1.8	1.8	1.7	1.5	1.6	1.5	1.6	1.8	1.9	1.9
feb	3.66	2.5	2.8	3.0	3.7	2.6	3.6	2.2	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.9	1.8	2.0	2.2	2.0
mar	3.72	2.7	3.1	3.4	4.3	2.8	3.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.8	1.7	2.0	1.7	1.8	1.9	1.8
abr	3.53	2.7	3.2	3.3	4.2	3.0	3.4	2.4	2.2	2.1	2.3	2.4	2.2	2.7	2.1	2.1	2.3	2.1
may	3.33	2.6	3.3	3.7	4.7	3.5	3.2	2.3	2.3	2.1	2.2	2.2	2.1	2.4	2.1	2.1	2.2	2.1
jun	3.17	2.6	2.5	2.5	2.9	2.3	2.4	2.1	2.0	2.0	1.9	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0
jul	3.35	2.7	3.3	3.4	4.2	2.6	2.6	2.0	2.2	2.1	2.1	1.9	1.9	2.0	1.9	2.0	2.1	2.0
ag	3.25	2.7	2.9	3.1	3.7	2.8	3.0	2.1	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.3	2.1	2.2	2.3	1.9
sept	3.00	2.6	2.6	2.6	3.0	2.6	3.0	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.4	2.1	2.2	2.3	2.0
oct	3.02	2.4	3.4	3.3	4.0	3.2	3.7	2.7	2.3	2.2	2.5	2.6	2.5	2.9	2.4	2.5	2.6	2.3
nov	3.15	2.4	2.9	3.0	3.5	2.9	2.8	2.4	2.2	2.1	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
dic	3.30	2.4	2.4	2.5	2.7	2.2	2.3	2.0	1.9	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.9	2.1	2.2	2.1

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

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	0.6	0.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.7	0.9	1.0	0.9	1.4
feb	1.0	0.8	1.1	0.9	1.0	0.8	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0	1.1	1.4
mar	1.0	0.7	0.9	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	1.0	1.1	1.0	1.0
abr	1.4	0.8	1.3	0.9	1.1	0.7	1.0	1.3	0.8	1.0	1.1	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.5
may	1.0	1.1	1.6	1.5	1.6	1.5	0.9	1.0	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.2	1.0	0.9	0.8	0.8
jun	1.6	1.7	1.3	1.2	1.1	0.9	0.8	0.8	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8
jul	1.2	1.4	0.9	0.9	0.7	0.7	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	1.0
agt	1.1	1.1	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	1.1
sep	1.8	1.6	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9
oct	0.6	1.0	0.9	1.4	1.4	1.9	1.6	1.5	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4
nov	0.6	1.1	0.7	0.9	0.9	1.0	1.2	1.0	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	1.1	1.2	1.4	1.3
dic	0.4	0.6	0.4	0.5	0.4	0.7	0.7	0.7	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	1.0	1.2	1.4	1.4

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

mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
feb	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
mar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
abr	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
may	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0
jun	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
jul	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
agt	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
sep	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
oct	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
nov	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
dic	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0

Cuando se comparan las anomalías climáticas en temperatura y precipitación proyectadas por cada modelo, se advierte que difieren tanto en magnitud como en estructura 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 de 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 con respecto a los valores medios climatológicos respectivos será mayor durante invierno pero menor durante verano.

Surge entonces la pregunta de porqué 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 de variables meteorológicas. Este método es similar al *Perfect-Prog* usado en la predicción numérica del clima (Wilks, 1995). Pueden correlacionarse 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 observacional 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.dkz.de>) se obtienen salidas de los MCG con las características mencionadas para diferentes modelos acoplados (NCAR, GFDL-R30, ECMWF, 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. Un total de dieciocho ecuaciones de regresión para cada variable regional, por modelo y para verano e invierno, se pueden desarrollar, correspondiendo 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 menor porque la misma metodología da mayor importancia al clima regional.

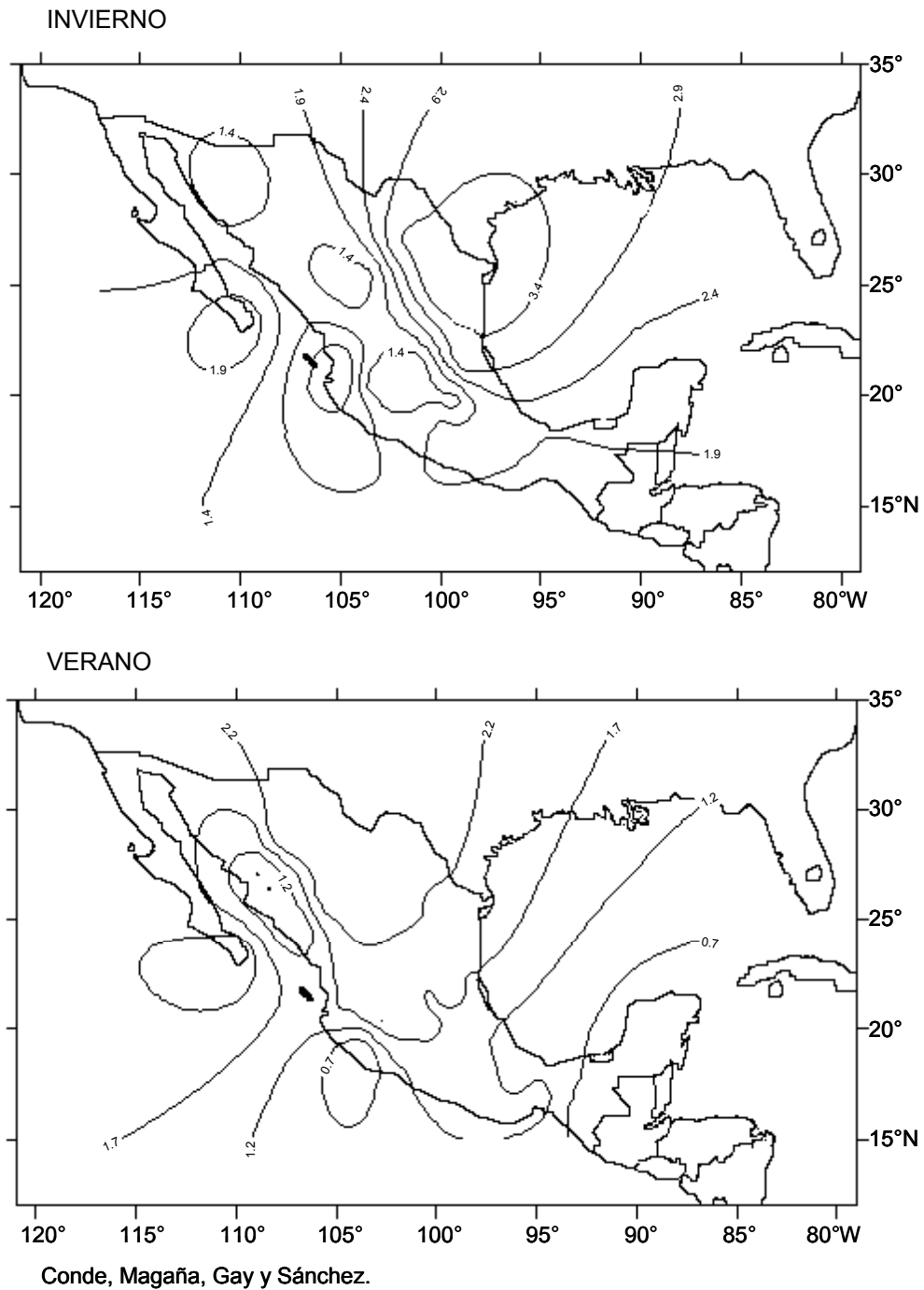


Figura 8. Anomalías de temperatura 2xCO₂-CONTROL (°C), para invierno y verano, obtenidas a partir del modelo GFDL-R30, empleando el método alternativo, basado en la regionalización de Douglas.

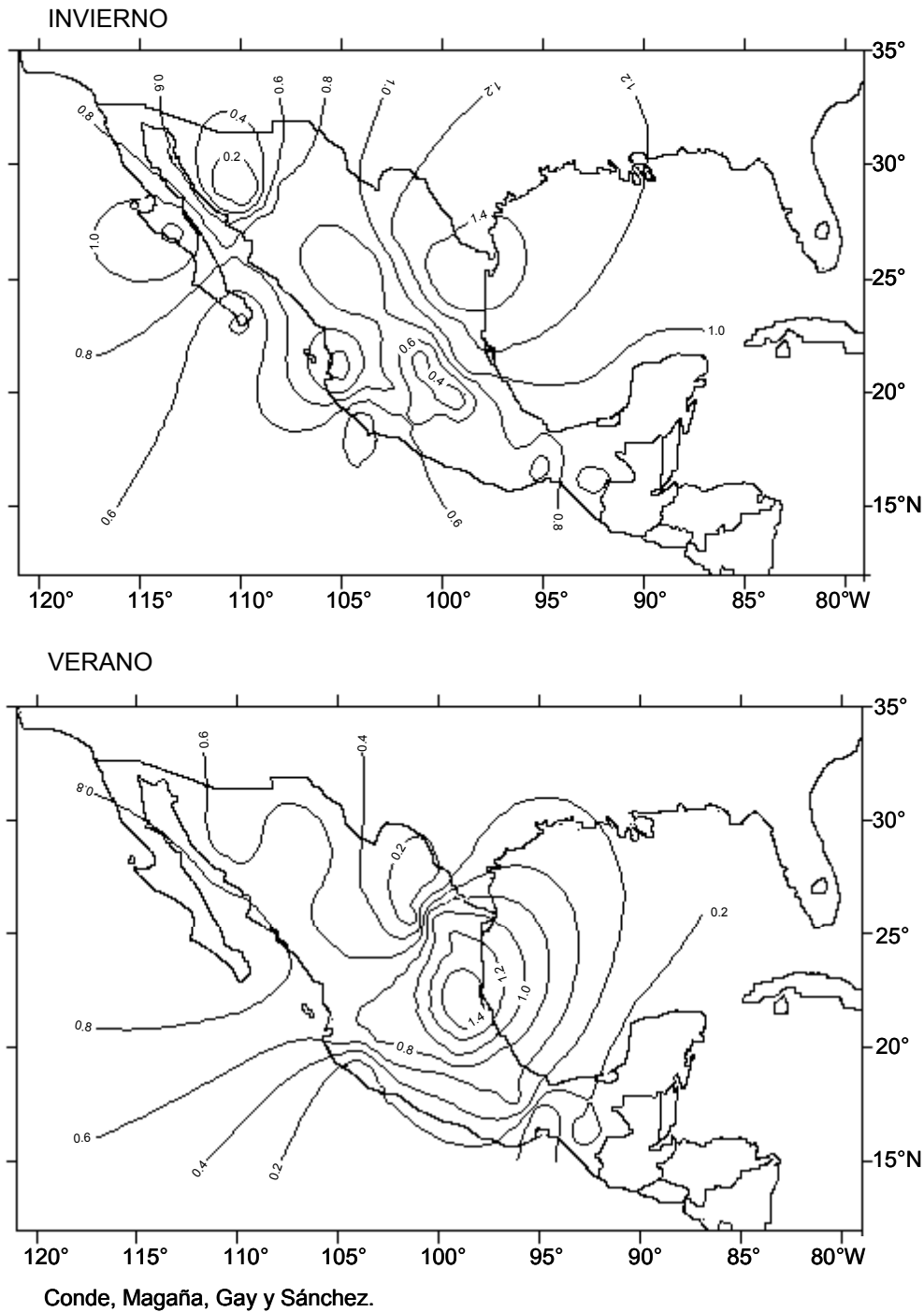


Figura 9. Anomalías de temperatura 2xCO₂-CONTROL (°C), para invierno y verano, obtenidas a partir del modelo NCAR, empleando el método alternativo, basado en la regionalización de Douglas.

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. Una aproximación similar se utiliza actualmente 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, 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 de 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 invernadero, por ejemplo, una duplicación de 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 atmosféricos 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 de 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 entender 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), 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 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. June 1995.
- 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, Tesis de licenciatura en física, México, Facultad de Ciencias, UNAM. 1997.
- Watson, R.T., M.C. Zinyowera, R.H. Moss (eds.), 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, 1995, 427-467.
- Wilks, D.S., Statistical methods in the atmospheric science, Academic Press, 1995, pp. 200-202, 357.