

**Guía para la Generación de Escenarios de
Cambio Climático a Escala Regional**
Primera versión
Noviembre. 2008

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM



GUÍA PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO A ESCALA REGIONAL.

Coordinadores:

Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez

conde@servidor.unam.mx

y

Dr. Carlos Gay García

cgay@servidor.unam.mx

Colaboradores (por orden alfabético):

Francisco Estrada feporrua@atmosfera.unam.mx

Agustín Fernández agustin@unam.mx

Fanny López magiknra@yahoo.com.mx

Mónica Lozano monica@atmosfera.unam.mx

Víctor Magaña victormr@servidor.unam.mx

Benjamín Martínez benmar@atmosfera.unam.mx

Oscar Sánchez oscmir_sm@hotmail.com

Jorge Ramírez elizadmf@yahoo.com.mx

Jorge Zavala jzavala@atmosfera.unam.mx

David Zermeño Díaz davidm03@hotmail.com

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Noviembre, 2008

CONTENIDO

1. Introducción: ¿por qué y para qué escenarios de cambio climático?	4 - 9
2. Generación de escenarios regionales de cambio climático para México	10 - 29
3. Escenarios de Cambio Climático en la República Mexicana	30 - 56
4. Fuentes de información para generar escenarios de cambio climático I. Pacific Climate Impacts Consortium. Ejemplo: construcción de escenarios para las 18 regiones de Douglas	57- 71
5. Fuentes de información para generar escenarios de cambio climático II. Creación de escenarios de cambio climático utilizando el <i>Climate Explorer</i> del RNMI.	72-82
6. Guía para el uso de MAGICC/SCENGEN 5.3 V.2	83-91
7. Atlas Climatológico y escenarios de cambio climático	92- 104

Agradecimientos:

Los autores agradecen al *Instituto Nacional de Ecología (INE)* por el apoyo brindado para la realización del proyecto: *Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional, al 2030 y 2050; Evaluación de la Vulnerabilidad Y Opciones de Adaptación de los Asentamientos Humanos, la Biodiversidad y los Sectores Ganadero, Forestal Y Pesquero, ante los Impactos de la Variabilidad y el Cambio Climáticos; y Fomento de Capacidades y Asistencia Técnica a Especialistas Estatales que Elaborarán Programas Estatales de Cambio Climático*, como parte de los trabajos realizados para la Cuarta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático.

1. Introducción: ¿Por qué y para qué escenarios de cambio climático?

Esta Guía tiene el propósito de mostrar una serie de procedimientos para la elaboración de Escenarios de Cambio Climático Regionales para México.

En las Comunicaciones Nacionales que los países entregan a la Convención Marco de Naciones Unidas, pueden observarse diferentes aproximaciones a la elaboración de escenarios de cambio climático. Resalta en ellas el hecho de que no hay un método único para la generación de esos escenarios. Mucho depende de la capacidad técnica y científica de cada país. En particular, ningún país en vías de desarrollo posee algún modelo avanzado que se equipare a los modelos climáticos más complejos que existen en la actualidad. Por tanto, somos usuarios de las salidas de modelos complejos desarrollados en los países del llamado primer mundo. Sin embargo, la generación de esos escenarios se basa en gran medida en la interpretación del problema del posible clima futuro y de cómo se maneje la incertidumbre propia de proyecciones de largo plazo en sistemas complejos, como lo es el sistema climático.

Esta guía pretende apoyar a los estudios estatales proporcionando un abanico de herramientas para la generación de escenarios de cambio climático. Si bien la discusión de cómo generarlos no está, ni con mucho, finalizada, los

escenarios de cambio climático son un ingrediente indispensable para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático. Las herramientas que descritas aquí están en constante actualización y su uso empieza a generalizarse.

Básicamente, en esta guía se describe cómo aplicar los criterios sugeridos por el “Grupo de Trabajo sobre Datos y Apoyo para las Evaluaciones de Impactos y Adaptación, del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático” (TGICA-IPCC¹, por sus siglas en inglés, 2007), para que los escenarios de cambio climático que se generen puedan emplearse en las evaluaciones de impactos y adaptación. También se incluyen algunas propuestas que surgen de los resultados obtenidos por Grupo I del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC-WGI, 2007²).

1.1. Cambios Observados.

De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés; IPCC, 2007³) el calentamiento del sistema climático es **inequívoco**, lo que se observa tanto en los incrementos de los promedios globales de las temperaturas del aire y de los océanos, como en el derretimiento de nieve y hielo y en la elevación del nivel medio del mar. Por lo anterior, resulta necesario analizar las consecuencias que ese calentamiento podría causar en el clima a escalas regionales y locales, así como las repercusiones que implicaría en todos los aspectos del desarrollo de un país como el nuestro.

¹ IPCC-TGICA, 2007: *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2*. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 p

² IPCC-WGI, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

³ IPCC- WGI, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 23 pp.

El AR4 representa el documento que concentra las evidencias más claras hasta ahora de que las actividades humanas están cambiando al planeta, produciendo el calentamiento global. Hay ahora mayor confianza (90%) de que el calentamiento observado es debido al aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a acciones humanas.

El calentamiento observado en los últimos 50 años es muy probablemente mayor que en cualquier otro periodo similar en los últimos 1,300 años. La temperatura global ha aumentado 0.74 grados centígrados en los últimos 100 años y la tendencia de calentamiento de los últimos 50 años es de 0.13 grados por década. Estudios recientes (Gay et al., 2008⁴) han mostrado que a partir de 1977 la tasa de incremento en las temperaturas globales ha aumentado 5 veces, mientras que en el caso de las temperaturas del hemisferio norte, dicha tasa ha aumentado en más de 8 veces a partir de 1985.

Los efectos de ese calentamiento se están viendo en todos los continentes, todos los océanos y en todas las cubiertas de hielo y nieve (figura 1.1).

Asociado a lo anterior, se han registrado numerosos cambios de largo plazo en el clima. Estos cambios incluyen los posibles aumentos en la intensidad de los ciclones tropicales, en las ondas de calor y en la intensidad y frecuencia de eventos extremos como sequías y lluvias torrenciales.

Se ha observado un aumento significativo en la precipitación en el este de Norteamérica y Sudamérica. Asimismo, se han registrado sequías más largas e intensas desde 1970 particularmente en los trópicos y subtrópicos.

Ante esos cambios observados, el IPCC señala que hay una alta confianza en que muchos sistemas hidrológicos están siendo afectados⁵, tal como ha ocurrido con el calentamiento de lagos y ríos de muchas regiones, lo que afecta su estructura térmica y la calidad del agua que contienen. Además, se ha observado un incremento en caudales y máximo de descargas en primavera de muchos ríos que se nutren de glaciares y nieve en esta estación.

⁴ Gay, C., Estrada, F., Sánchez, A. 2008. Global and hemispheric temperatures revisited. *Climatic Change* (published online)

⁵ IPCC, 2007: Resumen para Responsables de Políticas. En, *Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 12 pp.

Otros cambios físicos evidentes son el incremento en el número de lagos glaciales, avalanchas de hielo y rocas en las regiones montañosas.

Existe una mayor evidencia de que el calentamiento reciente está afectando de manera importante los sistemas biológicos, a través de efectos en un rango de especies y comunidades en ecosistemas terrestres y una nueva evidencia sustancial en sistemas marinos y de agua dulce.

Se ha documentado que desde 1980 se presenta un “reverdecimiento” prematuro de la vegetación en la primavera en muchas regiones. Asimismo, se han observado desplazamientos de especies en dirección a los polos o a mayores alturas.

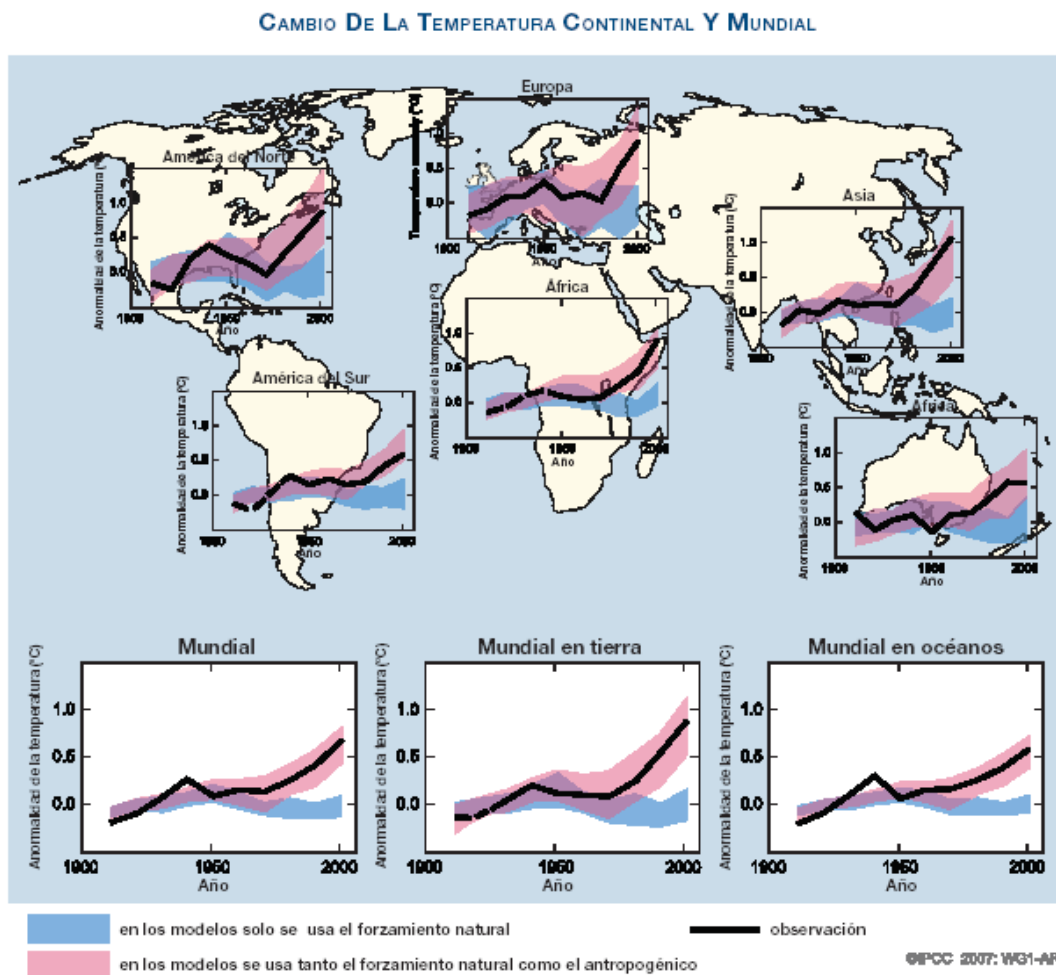


Figura 1.1. Curva negra: observaciones desde 1906 hasta 2005; Celeste: simulaciones sólo con emisiones naturales; Rosa: simulaciones con emisiones naturales y antropogénicas.

Hay una coincidencia espacial entre las regiones que han sufrido un calentamiento significativo y las regiones en donde se han observado mayores cambios en los sistemas físicos y biológicos. Para que los modelos empleados en la evaluación de impactos simulen correctamente los cambios observados, es necesario que además de la variabilidad natural del clima se incluya la contribución humana al calentamiento global.

En los sistemas humanos, los efectos del calentamiento global no se detectan tan directamente debido a otros factores no climáticos y a que se ejercen acciones de adaptación. Uno de los efectos observados en las latitudes altas del hemisferio norte es la ampliación del periodo de crecimiento de algunos cultivos. En contraste, en el sur de África hay estaciones secas más largas y una mayor incertidumbre en el periodo lluvioso. Por otra parte, se han observado alteraciones importantes en los bosques debido a incendios y plagas.

Los eventos recientes de temperaturas extremas y ondas de calor han puesto de manifiesto algunos de los impactos de cambio climático en la salud humana y el alto grado de vulnerabilidad de importantes segmentos de la población, tanto en Europa como en América del Norte y en Asia. Existen además cambios en la distribución de algunas enfermedades humanas y animales transmitidas por vectores en partes de Europa y Asia. En latitudes medias y altas del Hemisferio Norte, se ha presentado una mayor producción estacional de sustancias alergénicas.

El aumento del nivel del mar y el desarrollo de asentamientos humanos en las costas están contribuyendo a la pérdida de humedales y manglares costeros y se ha incrementado el daño por inundaciones costeras en muchas áreas.

Las evidencias en el AR4 muestran, con un elevado grado de certidumbre, que los costos del cambio climático ya están siendo percibidos por la sociedad, si bien en forma desigual entre países, regiones y grupo socioeconómicos. En América Latina y el Caribe⁶ el costo por desastres o eventos extremos asociados a fenómenos climáticos supera los 5 mil millones de dólares al año. El año 2005

⁶ Magrin, G., C. Gay García, D. Cruz Choque, J.C. Giménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre and A. Villamizar, 2007: Latin America. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.

evidenció la estación ciclónica más fuerte en décadas y tuvo, sólo en México, un impacto superior a los 5 mil millones de dólares.

1.2 Escenarios Futuros

Las estimaciones más recientes indican que, dependiendo del tipo de desarrollo que adopte el mundo, los incrementos en la temperatura global promedio del planeta se pueden dar en el rango de 1.8 y 4.0°C con respecto al promedio de 1980-1999, aunque no se descartan aumentos de hasta 6.4 grados (figura 1.2).

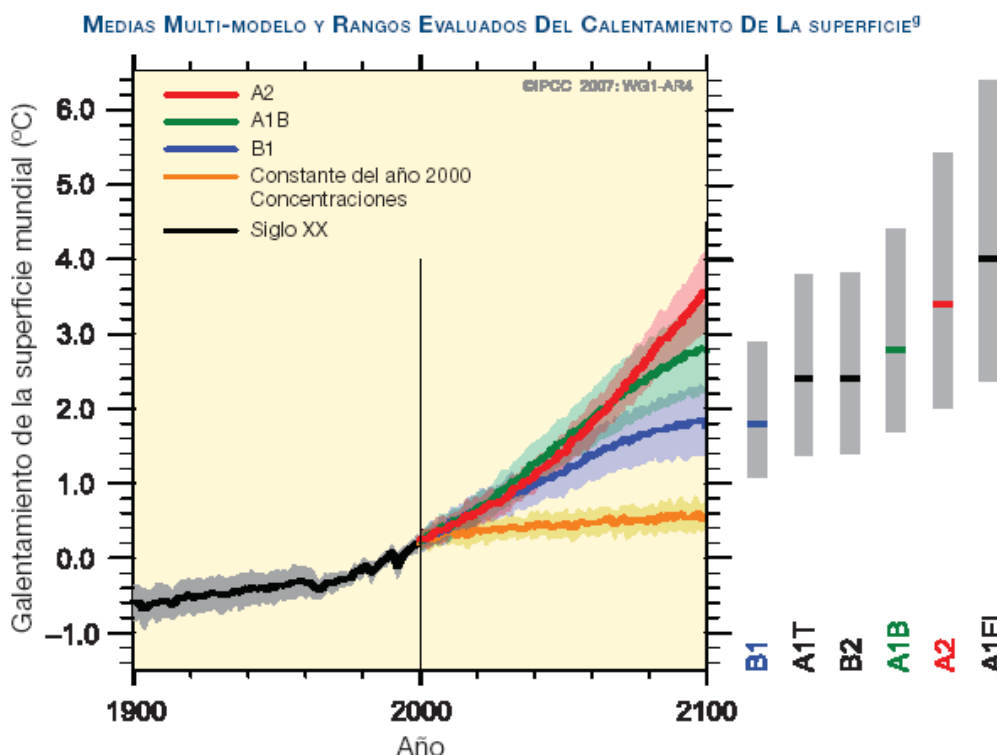


Figura 1.2. Las líneas continuas muestran los promedios de cambio en la temperatura global obtenidos mediante varios modelos de simulación climática. La línea naranja muestra el incremento en la temperatura global que se produciría si se mantuvieran constantes las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero a niveles del año 2000. Todas las demás proyecciones, iniciando en el año 2000 y hasta el 2100, corresponden a mayores concentraciones atmosféricas de dichos gases que serían producidos por distintos escenarios de desarrollo socioeconómicos globales (IPCC, 2007).

En los próximos 20 años se proyecta un aumento promedio global de 0.4 °C en superficie, independientemente del escenario de emisiones que se seleccione.

Aún si las concentraciones de gases de efecto invernadero se mantuvieran constantes a los niveles del año 2000, para el 2100 el planeta se calentaría entre 0.3 y 0.9 °C debido a la lenta respuesta de los océanos.

Los escenarios para el 2100 indican que el nivel global del mar podría aumentar entre 0.18 y 0.59 metros. Es muy probable que los extremos en temperatura y precipitación sigan volviéndose cada vez más frecuentes y es probable que los ciclones tropicales se vuelvan cada vez más intensos.

Es altamente probable que la precipitación aumente en las altas latitudes del planeta y que decrezca en la mayoría de las zonas subtropicales.

En América Latina, como a nivel global, algunos sectores y sistemas son especialmente vulnerables:

- ❖ Es muy probable que los recursos hídricos se vean disminuidos (entre el 10% y 30%) en regiones de latitudes medias y en el trópico húmedo y que en el transcurso del siglo se reduzca el agua almacenada en los glaciares y nieve.
- ❖ Los ecosistemas experimentarán pérdida de especies (entre un 20% al 30% de las especies estudiadas en riesgo de extinción), así como reducciones en la biodiversidad y cambios en el rango.
- ❖ Si se presenta un aumento global menor a 3°C, es probable que la productividad agrícola se incremente en latitudes altas. En latitudes bajas, los decrementos en esta productividad se pueden dar aún con cambios menores en las temperaturas locales. Si se presenta un aumento superior a los 3°C, es probable que la productividad disminuya en la mayoría de las regiones del planeta.
- ❖ Las costas están amenazadas por un aumento en el nivel del mar que conduciría a una pérdida del suelo costero y un incremento en el riesgo de inundación para millones de personas para finales de siglo.

Algunos países en la región han hecho esfuerzos por adaptarse, particularmente a través de la conservación de ecosistemas, así como mediante el impulso de la adopción de sistemas de alerta temprana, el desarrollo de estrategias para enfrentar las sequías y las inundaciones, mejorando el manejo de sus zonas costeras y el apoyo a sus sistemas de salud. Sin embargo, la efectividad de esos

esfuerzos se ha visto sobrepasada por la falta de información básica y de sistemas de observación y monitoreo; por las condiciones de pobreza y por los asentamientos humanos en zonas muy vulnerables, así como la falta de estrategias políticas, institucionales y tecnológicas apropiadas.

Los cambios observados y los escenarios futuros son la motivación fundamental para que los países de América Latina – en particular México -, estén impulsando nuevos estudios de cambio climático, sus posibles impactos, y el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

Regresar a [CONTENIDO](#)

2. Generación de escenarios de cambio climático regionales para México

2.1. Escenarios de Cambio Climático.

El recurso más avanzado del que se dispone para el estudio del clima es, sin lugar a dudas, el conjunto de Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés) de Atmósfera y Océano Acoplados (AOGCMs), que suman un par de decenas (23 reportados en el 4AR, por ejemplo). Estos modelos, basados en las leyes fundamentales de física, simulan una gran variedad de los procesos que ocurren, en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales, entre los diversos subsistemas climáticos. Dichos modelos poseen resoluciones espaciales variadas que se han venido refinando en el transcurso del tiempo (ahora se dispone de resoluciones del orden de hasta $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) y que permiten su aplicación a escalas regionales.

Los resultados obtenidos por estos GCMs cuando se aplican en condiciones de cambio climático, particularmente para el caso en que la concentración de gases de efecto invernadero se viera duplicada, dan lugar a la construcción de escenarios de cambio climático para diversas variables y proyectados hacia diferentes horizontes. Las variables sobre las que se presta más atención, por su indiscutible importancia, son la temperatura de superficie y la precipitación y, comúnmente, los horizontes proyectados se extienden hasta el 2100.

Para algunos estudios, la información que proveen los AOGCMs puede ser suficiente. En otras ocasiones, es necesario aplicar técnicas de regionalización para poder utilizar la información que proveen los modelos AOGCMs, de tal manera que el clima regional esté caracterizado no sólo por los factores de gran escala que aportarían los AOGCMs, sino también por factores regionales y locales que no son resueltos por estos modelos. Los métodos empleados para este propósito pueden ser 1) los modelos de circulación general de alta resolución; 2) los modelos regionales, o modelos anidados de área limitada (RCMs, por sus siglas en inglés) y 3) los métodos empírico - estadísticos o estadísticos - dinámicos. Es importante tomar en cuenta que cuanto mayor nivel de reducción de escala (temporal y espacial) se desee, mayor nivel de incertidumbre deberá asumirse debido a que cualquier método que se escoja para reducir la escala necesariamente introducirá incertidumbre adicional al escenario.

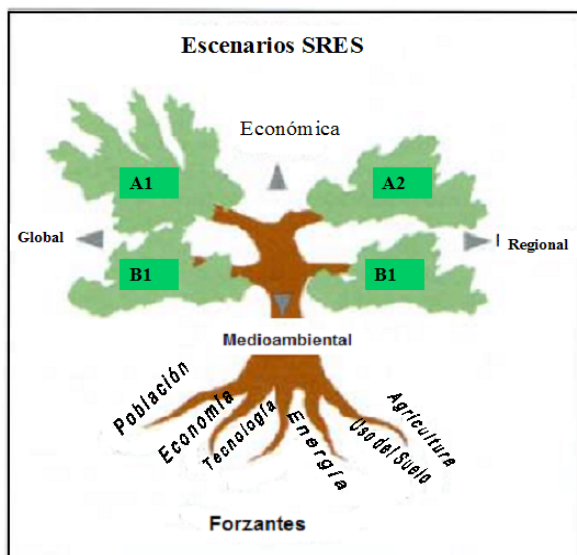
Para elaborar los escenarios de cambio climático es necesario el uso de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, etc.). El IPCC utiliza el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés, Nakicenovic, et al, 2000⁷). A partir de los escenarios de emisiones es posible calcular las concentraciones globales y el forzamiento radiativo correspondiente, lo que lleva a una proyección del incremento de temperatura global. Estos escenarios consideran una gama de posibles condiciones del desarrollo global para los próximos 100 años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado y crecimiento de la población y la economía.

Normalmente, los estudios de cambio climático utilizan distintos modelos de clima y un conjunto de escenarios de emisiones para reflejar el rango de incertidumbre causado por las diferentes suposiciones que se adoptan en cuanto al cambio en las emisiones de gases de efecto invernadero, el cambio tecnológico, población, tipo y grado de desarrollo económico, entre otros. Así, cada escenario representa una alternativa de cómo se podría comportar el clima futuro.

⁷ Nakicenovic, N., J. Alcamo, et al, 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. 599 pp.

Hay dos grandes familias de escenarios. Los escenarios “A” describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los “B” ese crecimiento es más moderado. Los escenarios A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2, se considera que el desarrollo se dará más a nivel regional. Estos escenarios parten de un conjunto de suposiciones acerca de la evolución de los forzantes (población, tecnología, economía, uso del suelo, agricultura y energía; figuras 2.1a y 2.1b) a nivel global y regional. Las reservas petroleras y de carbono, permiten suponer en estos escenarios que éstas serán fuente de energía por lo menos para los próximos 100 años.

2.1a)



2.1b)

Escenario	Población	Economía	Ambiente	Equidad	Tecnología	Globalización	Clima
A1FI	↗	↗	↘	↗	↗	↗	↗
A1B	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
A1T	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘	↗
B2	↗	↗	↗	↗	↗	↘	↗

Figuras 3. 3a. Esquema de Escenarios de Emisiones según el Reporte Especial (SRES) para el IPCC. Se indican los forzantes que determinaran los posibles futuros económicos y medioambientales. **3.3b.** Esquema del desarrollo de los diferentes forzantes según el escenario considerado (familias A y B).

El concepto de escenario no debe confundirse con el de pronóstico, ya que el objeto de cada uno de ellos es diferente, así como las causas, el manejo y comunicación de la incertidumbre apropiados en cada caso. De acuerdo con el IPCC, los escenarios climáticos se definen como “una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida expresamente para investigar las posibles consecuencias

del cambio climático antropogénico, y que en muchas ocasiones sirve como materia prima para modelos de impacto” (IPCC, 2007).

El carácter de las incertidumbres en los escenarios de cambio climático es distinto al de los pronósticos, siendo que en los primeros domina la incertidumbre epistémica y en los segundos, la incertidumbre tiene un carácter predominantemente aleatorio. Consecuentemente, la naturaleza de las probabilidades en uno y otro caso es distinta, así como el manejo de incertidumbre (ver, por ejemplo, Gay y Estrada 2008⁸ y Estrada et al., 2008⁹). Este hecho ha generado un importante y largo debate que continúa vigente en la literatura sobre el tipo de probabilidades (frecuentistas, subjetivas) que sería adecuado utilizar (Schneider, 2001, 2003; Kinzig and Starrett et al. 2003; Allen, 2003; Gay y Estrada 2008; IPCC-WGI, 2007) e incluso sobre la imposibilidad de proveer estimaciones probabilísticas (Grübler y Nakicenovic, 2001). De hecho, en el capítulo 10 del AR4 (IPCC-WGI, 2007), se advierten algunos de los problemas del enfoque probabilístico frecuentista y del uso de medidas de tendencia central en escenarios de cambio climático. Por ejemplo, el ensamble utilizado en el AR4 (como ocurre en la gran mayoría de los estudios de cambio climático) es un “ensamble de oportunidad”, es decir, se tomaron los modelos y simulaciones disponibles, por lo que no se realizó ningún método de muestreo. Esto genera que el rango obtenido no necesariamente refleje el posible rango completo de incertidumbre y que la interpretación estadística sea problemática (IPCC-WGI, 2007).

Este problema, aunado a la falta de independencia entre modelos (debida a la existencia de “familias de modelos”, al uso de estrategias de modelación y bases de datos similares), complica más la interpretación frecuentista de probabilidades. Por los argumentos anteriores, a pesar de que los promedios de ensambles multi-modelo pudieran ser capaces de reproducir mejor el clima actual que los miembros individuales del ensamble (cosa que no ocurre para todas las regiones), no existe ninguna garantía de que ese desempeño se mantenga en el clima futuro. Como resultado de la falta de independencia en los modelos, no existe ninguna razón para pensar que los sesgos individuales de los modelos se cancelen, por lo que el

⁸ Gay, C., Estrada, F. 2008. Objective probabilities about future climate are a matter of opinion. Sometido a Climatic Change.

⁹ Estrada, F., Gay, C., Conde, C. 2008. Un nuevo enfoque para la construcción de escenarios probabilísticos de cambio climático. VI Congreso de la Asociación Española de Climatología. Tarragona 8-11 de octubre 2008.

uso de medias o medianas no proveería mejores estimaciones. Esta Guía presenta dos enfoques utilizados para tratar incertidumbre. El primero se basa en la interpretación frecuentista de las salidas de los modelos y es similar al mostrado en algunos ejemplos del Grupo de Trabajo I del AR4. El segundo está basado en las recomendaciones del IPCC-TGCI (2007¹) para la generación de escenarios de cambio climático enfocados a la evaluación de los impactos potenciales de cambio climático.

2.2 Escenarios generados en estudios previos.

En el Estudio de País: México y en la Primera Comunicación Nacional se generaron escenarios de cambio climático ante una duplicación de bióxido de carbono, utilizando las salidas de dos modelos de circulación general: GFDLR30 y CCC (Gay, 2000¹⁰). Los modelos empleados tenían una resolución muy baja (2.22° x 3.75° y 3.75° x 3.75°, respectivamente). Mediante estos dos modelos se obtuvieron escenarios de precipitación y temperatura correspondientes a las 18 regiones en México (Magaña et al, 1997¹¹) definidas por A. Douglas. Para este propósito, Douglas utilizó series de datos para el periodo 1948-1988 provenientes de 92 estaciones para el caso de la temperatura y de 279 estaciones para la precipitación. El escenario base se generó utilizando los promedios de las series 1951-1980.

En la Tercera Comunicación Nacional, para los sectores de agricultura y ecosistemas forestales, se generaron escenarios de cambio climático empleando el software MAGICC/SCENGEN 4.1 que consta de dos módulos. Uno es un modelo simple del clima (MAGICC, (Model for Assessment of Greenhouse –Gas Induced Climate Change; Wigley, 2003¹²; Hulme et al, 2000¹³) que permite estimar los incrementos de temperatura global para diferentes proyecciones (de 2000 a

¹⁰ Gay, C. (Compilador). 2000. México: Una Visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Resultados de los Estudios de Vulnerabilidad del País Coordinados por el INE con el Apoyo del U.S. Country Studies Program. SEMARNAP, UNAM, USCSP. 220 pp

¹¹ Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez, Gay, C. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research*. 9(2):107-114.

¹² Wigley, T. 2003. MAGICC/SCENGEN 4.1: Technical Manual 14 pp., and MAGICC/SCENGEN 4.1: User Manual. Boulder, CO, USA. 24 pp.

¹³ Hulme, M., T.M.L. Wigley, E.M. Brown, S.C.B. Raper, A. Centella, S. Smith, and A.C. Chipanshi. 2000. Using climate scenario generator for vulnerability and adaptation assessment: MAGICC and SCENGEN. Version 2.4 Workbook, Climate Research Unit, Norwich, UK, 52 pp.

2100) en función de las diferentes emisiones de GEI representadas por los diferentes escenarios de emisiones (incluidos dentro del modelo). El otro módulo (SCENGEN) combina lo anterior con los resultados de los GCMs para desplegar la información (fundamentalmente temperatura o precipitación) en un mapa reticular. La resolución de dichos mapas fue 5° x 5°, para todos los casos¹⁴ y se contemplaron dos horizontes de tiempo se denotados como 2020s y 2050s, que corresponden a promedios de 30 años (por ejemplo: 2010-2039 para 2020s, 2040-2069 para 2050s, y 2070-2099 para 2080s).

MAGICC es un modelo simple de clima capaz de emular a una gran variedad de modelos, razón por la que ha sido usado recurrentemente por el IPCC, incluso en el AR4, para producir proyecciones de temperatura global y elevación del nivel de mar.

Los modelos elegidos para la Tercera Comunicación¹⁵ fueron HADLEY3TR00, ECHAM4TR98 y GFDLTR90, debido a que representaban mejor el clima regional observado, además de que fueron utilizados por otros países de la misma región geográfica de México. Los escenarios de emisiones seleccionados fueron A2, B2 (Conde, 2003¹⁶).

Metodología para la generación de escenarios de cambio climático utilizada en la Cuarta Comunicación de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Un primer paso para la elaboración de estudios de cambio climático es la construcción de un escenario base de la climatología observada para la región de estudio. En este caso, con el apoyo del grupo UNIATMOS del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA-UNAM; <http://www.atmosfera.unam.mx/uniatmos/atlas/uniatmos.html>), se hizo disponible una climatología base de muy alta resolución (1x1 km) y de alta resolución (10x10 km) para el periodo 1950-2000. Las variables consideradas fueron temperaturas media, máxima y mínima, así como precipitación, con una frecuencia mensual. La metodología utilizada para la

¹⁴ Gay, C., Conde, C., Sánchez, O., 2006. Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. Disponible desde internet en <http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/escenarios_3A_mapas_y_datos.htm>

¹⁵ *México Tercera Comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. SEMARNAT/INE*, México, D.F., 2006, 210 p.

¹⁶ Conde, C. 2003. Cambio y Variabilidad Climáticos. Dos Estudios de Caso en México. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Física de la Atmósfera). Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México. 227 pp.

creación de estas bases de datos se puede consultar en Hijmans, *et al*, (2005¹⁷). Las Figuras 2.2 y 2.3 muestran, como ejemplo, la precipitación en julio y la temperatura mínima en enero observadas durante el periodo 1950-2000 para la República Mexicana y Centroamérica.

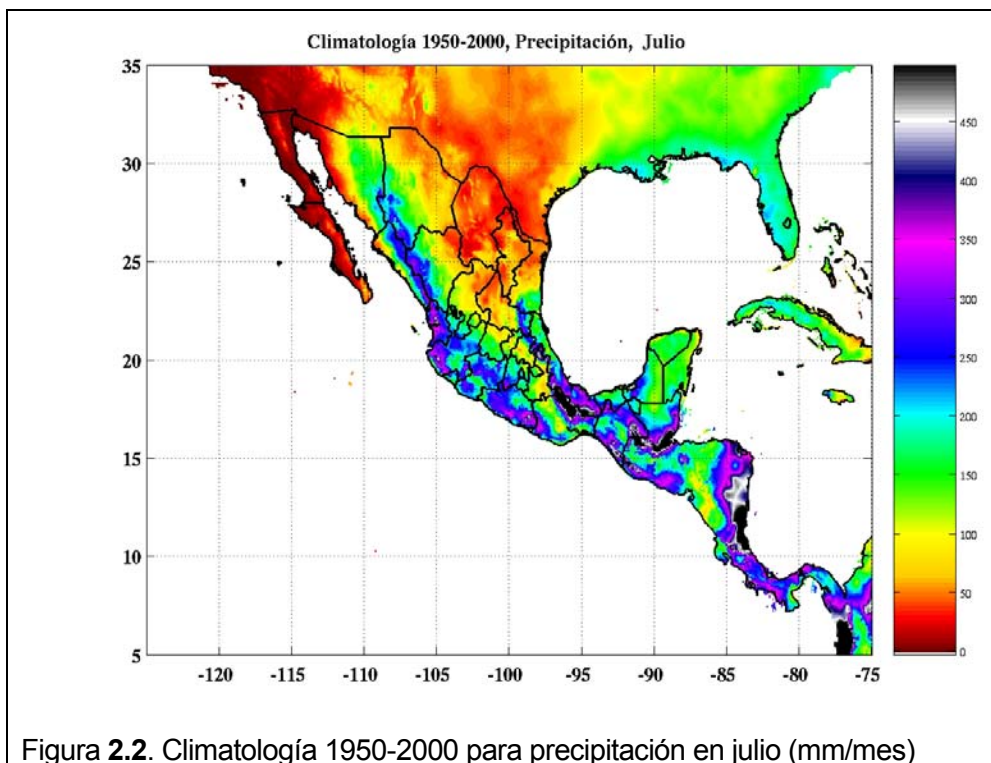
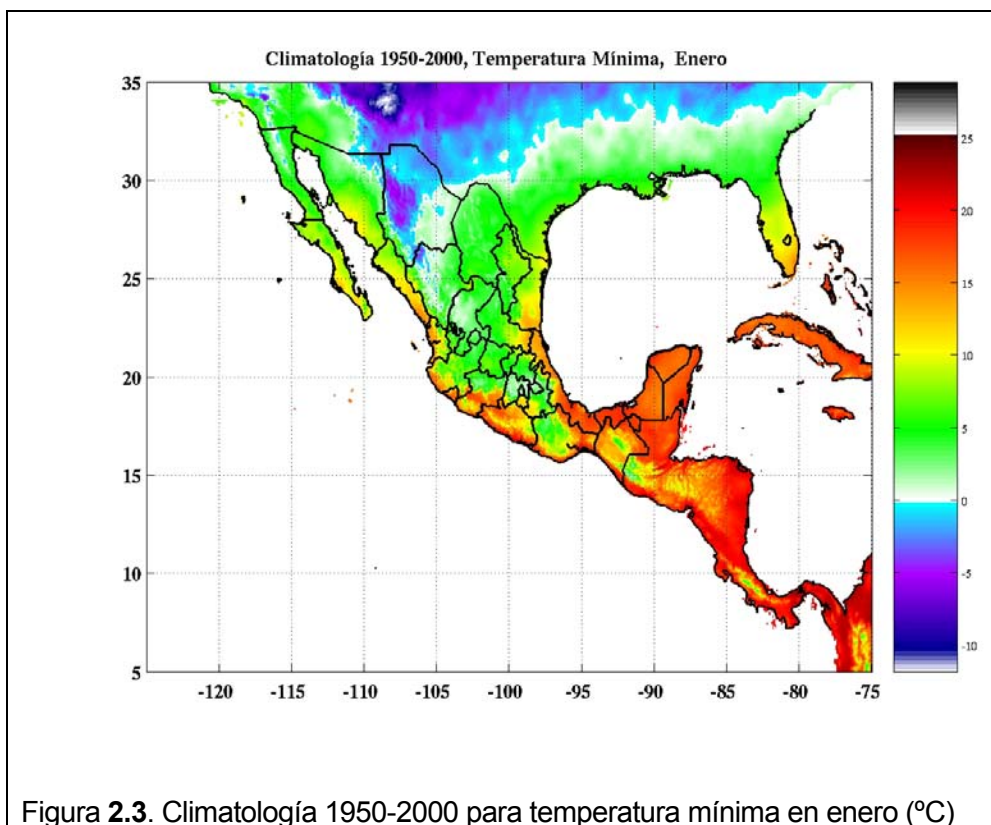


Figura 2.2. Climatología 1950-2000 para precipitación en julio (mm/mes)

¹⁷ Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978. [http://www.worldclim.org/worldclim_IJC.pdf]



Construcción de escenarios de cambio climático

En la generación de los escenarios de cambio climático correspondientes a la Cuarta Comunicación Nacional, se utilizaron metodologías provenientes tanto del Grupo de Trabajo I como del Grupo de Trabajo II del Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4), y principalmente la actualización metodológica realizada en junio de 2007 por el TGICA del IPCC, cuyo título es *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2* (IPCC-TGICA, 2007¹). La razón más fuerte para la utilización de dicha metodología es que es la propuesta del IPCC hecha con el fin específico de dar guías para la generación escenarios de cambio climático para realizar evaluaciones de impactos y adaptación (que es el propósito general de los estudios para la elaboración de planes estatales de acción climática). Esta propuesta toma ya en cuenta los avances propuestos tanto en el Grupo de Trabajo I como en el II del AR4.

Algunas de las consideraciones más relevantes de la metodología del IPCC-TGICA se refieren a que los escenarios de cambio climático regionales deben cumplir con las siguientes características:

- ❖ **Consistencia** a nivel regional con las proyecciones globales;
- ❖ **Plausibilidad** física y realismo;
- ❖ **Información apropiada para las evaluaciones de impactos** (en cuanto a su resolución, horizonte y variables);
- ❖ **Representatividad del rango potencial** de cambio climático regional;
- ❖ **Actualidad** de las simulaciones (uso de experimentos numéricos más recientes);
- ❖ **Resolución espacial.** La más alta resolución generalmente la tiene la última generación de modelos (por ejemplo, el modelo GFDL ha sido usado desde la primera comunicación hasta la cuarta, pero son versiones con diferentes resoluciones);
- ❖ **Validez** (que reproduzcan en lo posible el clima observado);
- ❖ **Representatividad** de sus resultados (seleccionar salidas de modelos que den un rango representativo de los posibles cambios futuros);
- ❖ **Comparabilidad** con estudios anteriores;
- ❖ **Ser útiles** para los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación.

Para garantizar el cumplimiento del criterio de utilidad de los escenarios de cambio climático para la estimación de impactos, se realizó un proceso secuencial en el que primero se partió de escenarios iniciales de baja resolución y se fueron ajustando a las necesidades en cuanto a variables, y resolución espacial y temporal requeridas por los grupos dedicados a la estimación de impactos. En un primer paso, las bases de climatología y los escenarios de cambio climático a baja resolución para las variables de temperatura y precipitación, con frecuencia mensual y para los horizontes 2030 y 2050, se pusieron a disposición de los grupos encargados de las estimaciones de impactos. Un segundo paso consistió en la realización de un taller en el cual los distintos grupos presentaron sus propuestas de trabajo y requerimientos de información de climatología actual y de

escenarios de cambio climático. Con esta información, los escenarios iniciales se fueron ajustando y complementando de acuerdo con las necesidades de información en cuanto a variables, y resolución espacial y temporal, expresadas durante el taller. Para esto, se llevaron a cabo reuniones con los grupos de impactos para construir la información a la medida de sus necesidades.

Es fundamental tomar en cuenta que los escenarios de cambio climático deben ser producto del trabajo conjunto entre los generadores de escenarios y los usuarios de los mismos, para que sean de utilidad y se ajusten a las necesidades de información. Es decir, los escenarios de cambio climático deben ser un producto hecho a la medida de las necesidades de los usuarios y no un producto genérico que pretenda satisfacer a cualquier usuario.

Atendiendo a los criterios de actualidad, consistencia y plausibilidad, para la construcción de los escenarios, se emplearon dos fuentes de información que fueron utilizadas en el AR4 (tanto en el Grupo de Trabajo I, como en el II), y que son el software MAGICC-SCENGEN y las salidas de modelos de circulación general que están disponibles en, por ejemplo, <http://www.pacificclimate.org/tools/select>.

De acuerdo con el IPCC, en el AR4, el Grupo de Trabajo I logró un avance muy importante en cuanto a las proyecciones de cambio climático ya que ahora existe un número mayor de simulaciones disponible, obtenidas de un rango mayor de modelos. La Tabla 2.1 muestra un resumen de los modelos de circulación general, las corridas disponibles para cada uno de ellos (control, SRES, doblamiento de CO₂, entre otras) y el tipo de variables para las cuales existe información.

Tabla 2.1. Simulaciones de modelos de circulación general disponibles y utilizadas en el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC. (IPCC-WGI, 2007)

Model ID	Model, Country	Pre industr. control	Present day control	20th century	Commitment	SRES A2	SRES A1B	SRES B1	1% to 2xCO ₂	1% to 4xCO ₂	Slab ocean control	2XCO ₂	AMP
1	BCC-CM1, China												
2	BCCR-BCM2.0, Norway												
3	CCSM3, USA *												
4	CGCM3.1(T47), Canada												
5	CGCM3.1(T63), Canada												
6	CNRM-CM3, France												
7	CSIRO-Mk3.0, Australia												
8	ECHAM5/MPI-OM, Germany												
9	ECHO-G, Germany/Korea												
10	FGOALS-g1.0, China												
11	GFDL-CM2.0, USA												
12	GFDL-CM2.1, USA												
13	GISS-AOM, USA												
14	GISS-EH, USA												
15	GISS-ER, USA												
16	INM-CM3.0, Russia												
17	IPSL-CM4, France												
18	MIROC3.2(hires), Japan												
19	MIROC3.2(medres), Japan												
20	MRI-CGCM2.3.2, Japan												
21	PCM, USA												
22	UKMO-HadCM3, UK												
23	UKMO-HadGEM1, UK												

Para el AR4 se realizaron escenarios de cambio climático utilizando principalmente los escenarios de emisiones “marker” correspondientes a tres de las seis familias de emisiones de los SRES (A1B, A2 y B1) para el periodo 2000-2100.

En la Cuarta Comunicación se consideró, además de los escenarios de emisiones antes mencionados, el escenario de emisiones B2, con los propósitos de utilizar las estimaciones disponibles más recientes y mantener la comparabilidad con estudios anteriores.

Adicionalmente, a pesar de que ninguno de los SRES incluye acciones para la mitigación del cambio climático ni son escenarios de estabilización, los escenarios A1B (emisiones medias-altas en el rango del SRES), B2 (emisiones medias-bajas en el rango del SRES) y B1 (las emisiones más bajas del SRES) ofrecen la ventaja de que pueden ser utilizados como sustitutos de escenarios de estabilización a 750 ppm, 650 ppm y 550 ppm, respectivamente, debido a su similitud en trayectorias (Swart et al., 2002; IPCC-WGII, 2007). El escenario A2 representa una línea de emisiones alta en el rango de los SRES y no guarda similitud con ningún escenario de estabilización. De esta forma, sin tener que repetir el trabajo para los casos de estabilización, el estudio pudo ofrecer una evaluación aproximada de

cuáles podrían ser los impactos potenciales de cambio climático en México para los casos de estabilización de las concentraciones atmosféricas de CO₂ a 550 ppm, 650 y 750 ppm. Estos resultados se contrastaron con los correspondientes al escenario de emisiones A2, que representaría un caso de inacción.

Asimismo, se generaron para las 18 regiones de Douglas, escenarios con 22 de los modelos presentados en la Tabla 1, y que son MIROC32_HIRES, NCAR_CCSM30, UKMO_HADGEM1, CSIRO_MK30, MPI_ECHAM5, GFDL_CM20, GFDL_CM21, CCCMA_CGCM3_T63, IAP_FGOALS10G, MRI_CGCM232A, BCCR_BCM20, CNRM_CM3, NCAR_PCM1, CCCMA_CGCM3, UKMO_HADCM3, MIROC32_MEDRES, IPSL_CM4, GISS_AOM, MIUB_ECHOG, GISS_EH, GISS_ER, INMCM30.

El propósito de generar todos estos resultados consistió en proporcionar una estimación del rango de incertidumbre en los escenarios de cambio climático y que no se pierda información potencialmente importante, tanto para la estimación de impactos como para la toma de decisiones. De esta manera, se generaron los elementos suficientes para atender el criterio de representatividad.

Una vez que se obtuvo un rango de posibles cambios en las variables climáticas para distintos horizontes de tiempo, y debido a que la mayor parte de las metodologías disponibles para la estimación de impacto todavía no son capaces de manejar adecuadamente la incertidumbre (ver, por ejemplo, UNFCCC, 2008; Estrada y Conde, 2008), se procedió a aplicar una serie de criterios para la selección de modelos que garantizara que el rango de posibles cambios se mantuviera bien representado. A continuación se describe brevemente el procedimiento efectuado.

Primero se adoptó un criterio basado en la selección de los modelos que son capaces de reproducir mejor el clima observado (IPCC-TGICA, 2007). En esta evaluación de desempeño de los modelos, también se consideró la media del ensamble como una de las opciones a evaluarse. Evidentemente, este criterio tiene la debilidad de que no existe garantía de que un modelo (o la media del ensamble) que reproduzca adecuadamente el clima actual, logre reproducir el clima futuro bajo condiciones de cambio climático y por lo tanto no debe ser considerado como definitivo.

Los estadísticos que se utilizaron para evaluar el desempeño de los distintos modelos para reproducir el clima observado, tanto a nivel global como para la región de México, son: correlación de patrones (r), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), sesgo y la raíz del error cuadrático medio corregida por sesgo (RMSE-corr)¹⁸. A cada uno de los modelos que se encontrara entre los primeros 7 con mejor desempeño se le asignó un punto y a cada uno de los modelos con peor desempeño un -1. Considerando los niveles global y región de México, la puntuación máxima es 8 y la mínima -8. Las tablas 2.2 y 2.3 muestran las puntuaciones de 20 modelos en cuanto a su desempeño a nivel global y a nivel México. La tabla 2.4 muestra el puntaje y *ranking* combinados. En cada una de estas tablas, los números en rojo identifican a los 7 modelos con mejor desempeño de acuerdo con el estadístico, con negrita roja los tres mejores, en azul los siete peores y en negrita azul los tres peores.

Tabla 2.2. Desempeño de los modelos a nivel global

MODELO	r	RMSE degC	SESGO degC	RMSE-corr degC	PUNTAJE	RANKING
CCSM-30	0.995	1.396	-0.294	1.364	4	1
MIROC-HI	0.994	1.665	-0.536	1.576	4	1
MPIECH-5	0.996	1.473	-0.257	1.45	4	1
MRI-232A	0.995	1.889	-0.811	1.706	4	1
MODBAR	0.996	1.783	-1.236	1.285	3	2
UKHADCM3	0.994	2.051	-0.901	1.842	3	2
ECHO-G	0.99	2.029	0.307	2.006	2	3
GFDLCM21	0.992	2.299	-1.47	1.767	2	3
CNRM-CM3	0.99	2.68	-1.756	2.025	0	4
CSIRO-30	0.991	2.649	-1.772	1.969	0	4
MIROC-MED	0.991	2.198	-1.059	1.926	0	4
GISS-EH	0.983	2.71	0.62	2.638	-1	5
GISS-ER	0.988	2.296	-0.499	2.241	-1	5
IPSL_CM4	0.989	2.782	-1.789	2.13	-1	5
NCARPCM1	0.99	2.977	-2.138	2.071	-2	6
UKHADGEM	0.992	2.9	-2.109	1.991	-2	6
CCCMA-31	0.99	3.011	-1.805	2.411	-3	7
BCCRBCM2	0.988	3.274	-2.216	2.411	-4	8
FGOALS1G	0.973	4.393	-1.994	3.915	-4	8
GFDLCM20	0.989	3.12	-2.278	2.132	-4	8
INMCM-30	0.987	3.019	-1.969	2.288	-4	8

¹⁸ Todos estos estadísticos fueron pesados por coseno para tomar en cuenta el cambio en el área por cuadro en la malla dependiendo de la latitud.

Tabla 2.3. Desempeño de los modelos para la región de México

MODELO	r	RMSE	SESGO	RMSE-corr	PUNTAJE	RANKING
		degC	degC	degC		
CCSM-30	0.92	1.714	-1.117	1.3	4	1
MIROC-HI	0.972	1.512	-0.818	1.272	4	1
MPIECH-5	0.941	1.33	-0.054	1.329	4	1
GISS-ER	0.841	2.081	-1.258	1.658	2	2
MODBAR	0.916	2.108	-1.687	1.265	2	2
UKHADGEM	0.938	2.644	-2.173	1.507	2	2
MRI-232A	0.806	1.864	-0.011	1.864	1	3
BCCRBCM2	0.928	3.777	-3.525	1.357	0	4
CNRM-CM3	0.932	3.992	-3.773	1.302	0	4
ECHO-G	0.739	2.063	0.059	2.062	0	4
UKHADCM3	0.871	2.36	-1.564	1.767	0	4
GFDLCM20	0.938	3.865	-3.519	1.599	-1	5
MIROCMED	0.739	2.11	0.243	2.096	-1	5
CCCMA-31	0.854	3.683	-3.316	1.602	-2	6
CSIRO-30	0.87	3.287	-2.309	2.34	-2	6
FGOALS1G	0.781	2.584	-1.737	1.913	-2	6
GFDLCM21	0.917	3.809	-3.329	1.851	-2	6
INMCM-30	0.755	3.209	-2.28	2.258	-2	6
IPSL_CM4	0.785	2.418	-1.476	1.915	-2	6
NCARPCM1	0.836	4.109	-3.672	1.844	-2	6
GISS-EH	0.526	3.38	1.893	2.8	-3	7

Tabla 2.4. Puntaje y desempeño general de los modelos

MODELO	PUNTAJE	RANKING
CCSM-30	8	1
MIROC-HI	8	1
MPIECH-5	8	1
MODBAR	5	2
MRI-232A	5	2
UKHADCM3	3	3
ECHO-G	2	4
GISS-ER	1	5
CNRM-CM3	0	6
GFDLCM21	0	6
UKHADGEM	0	6
MIROCMED	-1	7
CSIRO-30	-2	8
IPSL_CM4	-3	9
BCCRBCM2	-4	10
GISS-EH	-4	10
NCARPCM1	-4	10
CCCMA-31	-5	11
GFDLCM20	-5	11
FGOALS1G	-6	12
INMCM-30	-6	12

Como se puede observar en las tablas 2.2 y 2.3, los modelos CCSM30, MIROC32-HIRES y ECHAM5 tienen el mejor desempeño a nivel global y para la región de México, y por lo tanto son los que tienen un mejor *ranking* general. También es interesante notar que el promedio de los veinte modelos (MODBAR) tiene un puntaje considerablemente menor que cualquiera de los tres modelos mencionados.

Un criterio adicional que se consideró fue el de la resolución espacial de los diferentes modelos. La Tabla 2.5 muestra el número de cuadros en la malla que corresponden a la región de México. Como se puede observar el modelo con mayor resolución es el MIROC32-HIRES con 162 cuadros, seguido por el CCSM30 con 105, mientras que el ECHAM5 tiene 61 cuadros. Los modelos con menor resolución apenas tienen 13 cuadros para México.

Tabla 2.5. Resolución espacial para la región de México de los distintos modelos considerados

Modelo	Número de cuadros en la región
MIROC32_HIRES	162
NCAR_CCSM30	105
UKMO_HADGEM1	92
CSIRO_MK30	71
MPI_ECHAM5	61
GFDL_CM20	45
GFDL_CM21	40
CCCMA_CGCM3_T63	34
IAP_FGOALS10G	32
MRI_CGCM232A	31
BCCR BCM20	29
CNRM_CM3	28
NCAR_PCM1	28
CCCMA_CGCM3	27
UKMO_HADCM3	27
MIROC32_MEDRES	26
IPSL_CM4	25
GISS_AOM	21
MIUB_ECHOG	19
GISS_EH	13
GISS_ER	13
INMCM30	13

A pesar de su desempeño y alta resolución, el modelo MIROC32-HIRES tiene el inconveniente de que su sensibilidad del clima es de 5.6°C, muy por arriba de la de 3°C marcada como “best estimate” en el AR4 del IPCC. Por otra parte, el modelo CCSM30 no cuenta con simulaciones para los cuatro escenarios de emisiones considerados (A1B, A2, B2 y B1).

Tomando en cuenta el criterio de representatividad sugerido por el TGICA-IPCC, se escogieron 3 modelos que fueran capaces de representar el rango de incertidumbre, es decir que tuvieran un rango en posibles aumentos de

temperatura y, más importante, que proporcionaran tanto incrementos como reducciones en precipitación.

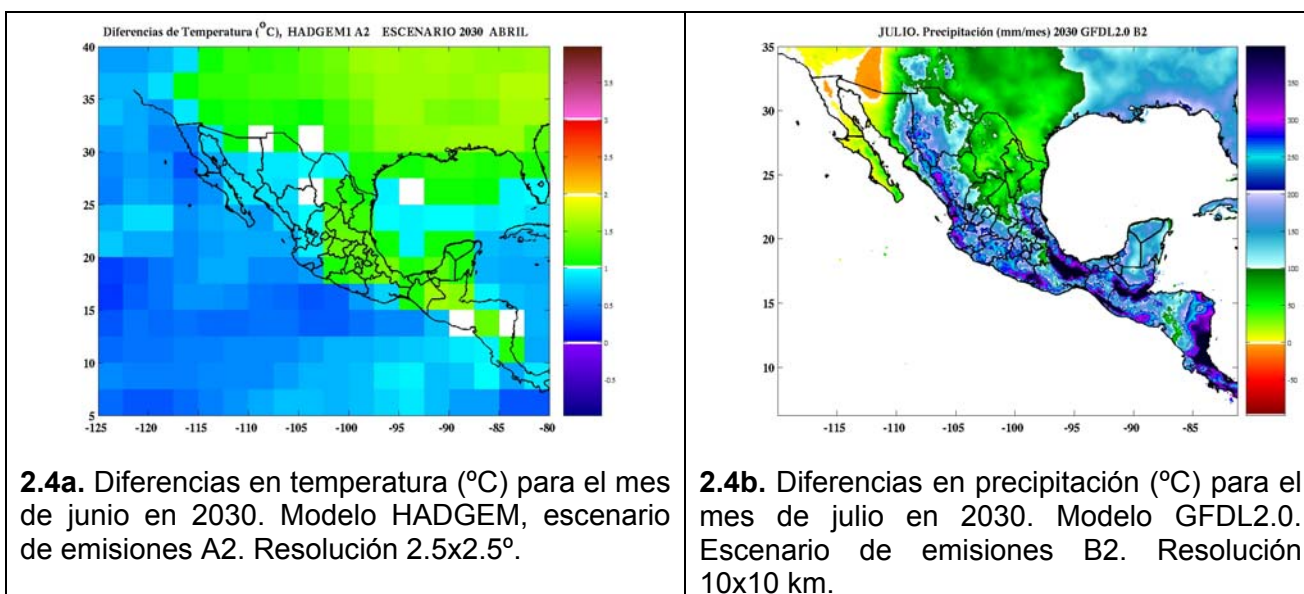
Además de que se construyeron escenarios de cambio climático para las 18 regiones de Douglas utilizando todos los modelos disponibles, para los estudios de impactos sólo se usaron los modelos ECHAM5, HADGEM1 y GFDL CM2.0 con resoluciones de 2.5x 2.5° y de 10x10 km.

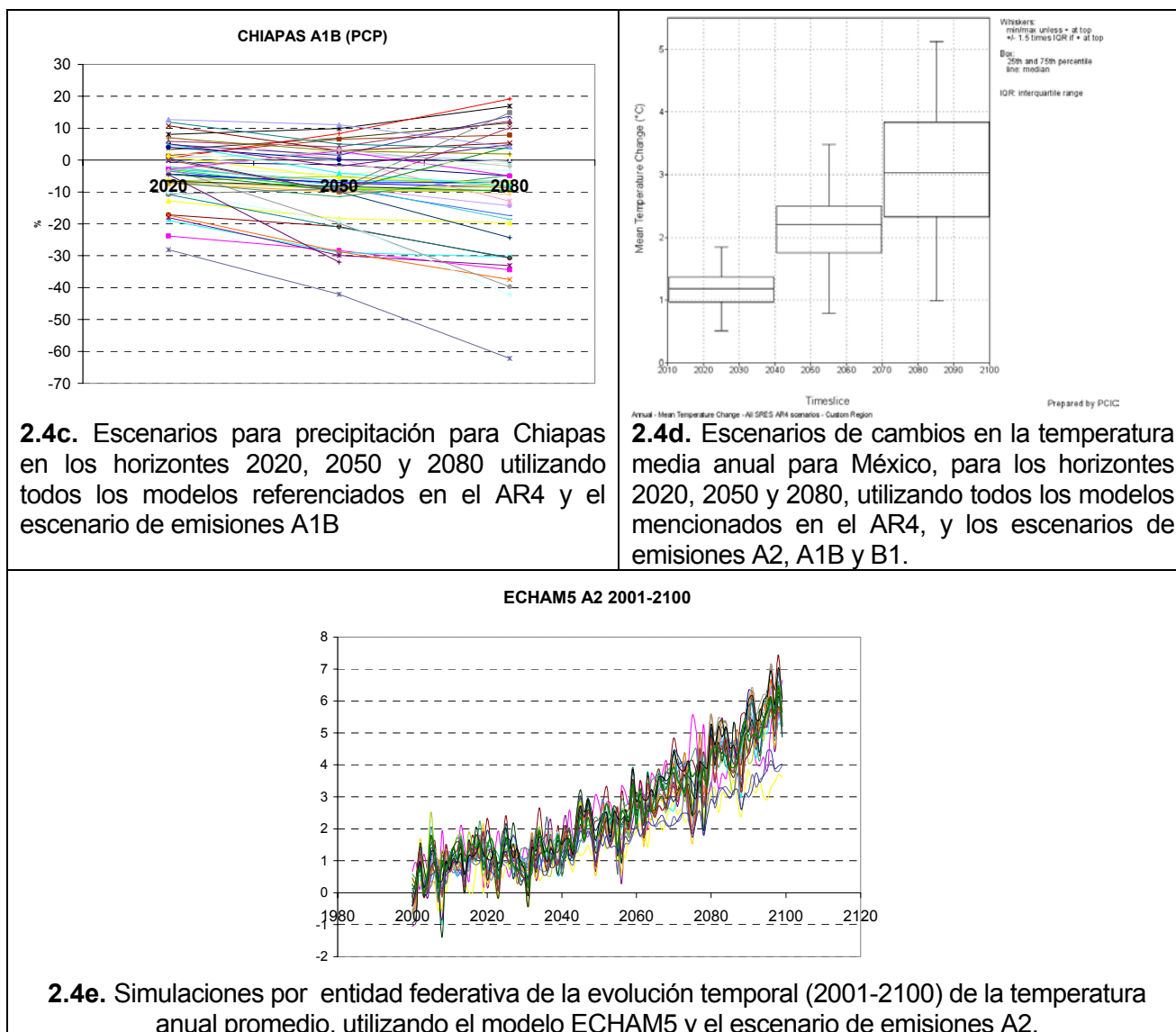
Siguiendo estos criterios, están disponibles en la página del CCA- UNAM varias aproximaciones para la construcción de escenarios regionales de cambio climático para México y América Central:

http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/scenarios/Escenarios_de_cambio_climatico_Mexico_2008.htm).

En los capítulos 4 a 6 del presente documento se ilustra la creación de escenarios utilizando dos fuentes de información disponibles libremente en Internet, y mediante el uso del software MAGICC/SCENGEN. El capítulo 7 muestra el procedimiento y rutinas utilizadas para la generación de escenarios de alta resolución usando interpolación por *splines*.

Las figuras 2.4a a 2.4e muestran algunos ejemplos de la metodología y fuentes de información descritos en este capítulo y que fueron preparados para la Cuarta Comunicación Nacional.





2.2 Bases de datos.

Las series de datos de temperatura, precipitación, radiación, vientos, etc., para los estudios climáticos en México, y en general, para cualquier país en desarrollo constituyen un grave problema. No sólo es un problema su carencia, sino también su calidad y la irregularidad en su registro.

Algunas fuentes de datos se presentan en la siguiente tabla, aunque no es exhaustiva. Las fuentes de las agencias extranjeras pueden contener datos para algunas regiones de México, por lo que se sugiere consultarlas.

Tabla 2.1. Fuentes de datos públicas

Tipo de datos base	Fuente
Clima Observado	<p>*Global Historic Climatology Network (GHCN) http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-monthly/index.php</p> <p>* The Climatic Research Unit Global Climate Dataset http://www.ipcc-data.org/obs/cru_climatologies.html</p> <p>*Global Precipitation Climatology Center (GPCC) http://cics.umd.edu/~yin/GPCP/main.html</p> <p>*Climate Diagnostics Center at NOAA. http://www.ncdc.noaa.gov/wdcamet.html</p> <p>*National Center for Atmospheric Research (NCAR) Data Support System http://www.unidata.ucar.edu/</p> <p>*Global Climate Observing System (GCOS) http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/index.php</p> <p>*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) at NOAA http://icoads.noaa.gov/index.shtml</p>

Tipo de datos base	Fuente
Para México	<p>+ Página del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM http://www.atmosfera.unam.mx/uniatmos/atlas/uniatmos.html</p> <p>+ Página web del Servicio Meteorológico Nacional http://smn.cna.gob.mx/</p> <p>+Extractor Rápido de Información Climática (ERIC1, ERIC2 y ERIC3). Comisión Nacional del Agua (CNA). Sólo CDs</p> <p>+Dat322. CNA. Sólo CDs</p> <p>Centro de Investigación de Holanda KNMI. http://climexp.knmi.nl/selectdailyseries.cgi?someone@somewhere.</p>
Datos de Re-análisis	<p>*NCEP Reanalysis Data http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml</p> <p>*IPCC Data Distribution Center (DDC-IPCC) http://www.ipcc-data.org/</p>

Los escenarios de cambio climático generados para México están disponibles en la página del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, y siguen los criterios descritos en la sección anterior, además de que han sido utilizados para los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de los sectores: agricultura, ecosistemas forestales y recursos hídricos en regiones específicas. La dirección actual de esos escenarios es:

http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/scenarios/Escenarios_de_cambio_climatico_Mexico_2008.htm).

Para la construcción de los escenarios regionales se utilizaron:

1. Las salidas de los modelos reportados en el 4AR, disponibles en las páginas:
 - a. <http://www.pacificclimate.org/tools/select>. Del Pacific Climate Impacts Consortium, de Canadá.
 - b. www.ipcc-data.org. Centro de Distribución de Datos del IPCC.
 - c. <http://climexp.knmi.nl/selectdailyseries.cgi?someone@somewhere>. Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI.
2. La versión 5.3 del MAGICC/SCENGEN

En la página del CCA-UNAM puede encontrarse el Atlas Climático Digital para México:

<http://www.atmosfera.unam.mx/uniatmos/atlas/uniatmos.html>

El Atlas Climático Digital de México permitirá acceder a los valores promedio mensuales de variables climatológicas y de parámetros bioclimáticos derivados, en cualquier punto del país hasta con una resolución de 1 km en una primera etapa. Esta información se presentará en mapas georeferenciados en un servidor de mapas interactivo en Internet. La información se podrá exportar en distintos formatos para ser incorporada con datos de otras fuentes.

3. Escenarios de Cambio Climático en la República Mexicana

Escenarios de Cambio Climático en la República Mexicana

3.1 Antecedentes

La información del clima adquiere un alto valor cuando se le considera en la planeación o en la toma de decisiones. El ejemplo más importante en cuanto al uso de información climática se tiene en el sector agua. El cambio en la disponibilidad de este recurso es un problema de la mayor importancia, pues se ha vuelto recurrente el paso de periodos de secas a periodos de inundaciones. El ciclo sequías-exceso de lluvia, reflejo de la variabilidad climática natural, frecuentemente resulta en desastres por la alta vulnerabilidad en materia hidrológica. Parte del problema radica en que no se ha pasado de usar la información climática para explicar los desastres, a un esquema en que ésta se utilice para prevenirlos. El riesgo de crisis severas en el sector agua podría acentuarse bajo condiciones de cambio climático.

El uso de modelos de clima o de circulación general de la atmósfera, conocidos como GCMs, es fundamental cuando se desea aprovechar la información climática, mediante asimilación de observaciones, en predicciones estacionales o generando escenarios de cambio climático. Los modelos climáticos permiten

pronosticar o hacer "experimentos" que nunca serían posibles en la realidad. Por ejemplo, si se dispone de un buen modelo se puede analizar cómo variará la temperatura si se aumenta la concentración bióxido de carbono (CO₂). La limitación obvia es que un modelo simula, pero no es la realidad. Por muy bueno que sea, siempre estará lejos de la complejidad del proceso natural.

El uso de un modelo del clima incluye evaluar en qué medida se aproxima a lo observado. Comparar climas pasados con las simulaciones del modelo requiere de datos de buena calidad. En el caso de cambio climático, la evaluación de las proyecciones es muy difícil pues habrá que esperar muchos años para analizar en qué medida se vienen cumpliendo los escenarios construidos bajo diversas suposiciones. Es por ello que no resulta fácil establecer cuál es el mejor o peor modelo para cambio climático. Sólo mediante un entendimiento del significado de proyectar el clima al futuro se puede establecer cómo trabajar con modelos numéricos del clima.

Así como existen diferencias de principio entre tiempo y clima, hay también diferencias entre pronosticar el clima y proyectarlo a futuro a través de escenarios. El pronóstico del tiempo es un problema de valor inicial, en el que el resultado, luego de uno o dos días de integración requiere se evaluado en un contexto determinístico. Bajo tal marco de referencia, entre mejor sea la condición inicial utilizada, mejor será la predicción de tiempo que se realice. Los pronósticos determinísticos no pueden extenderse más allá de dos o tres días, antes de que el nivel de acierto caiga por debajo del umbral que los hace útiles. Las predicciones a más de tres días amplifican los errores de la condición inicial, por lo que dos pronósticos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes pueden llegar a resultados altamente contrastantes luego de cinco o diez días de integración.

Alguien podría preguntar, "¿por qué si no podemos pronosticar con precisión el tiempo a uno o dos días, intentamos pronosticar el clima?" Es cierto, no podemos pronosticar el tiempo a largo plazo, pero podemos decir cosas útiles sobre el clima. Edward Lorenz, dijo: "tiempo es lo que usted tiene, mientras que clima es lo que usted espera". Implícita en esta observación de Lorenz está la aserción de que mientras el tiempo es determinista, el clima es probabilista. Para explicar lo anterior se puede discernir entre predecibilidad del tiempo contra predecibilidad del clima.

Mientras que las variaciones del tiempo se asocian con inestabilidades del fluido atmosférico, la representación del clima está relacionada con la componente estable del comportamiento de un fluido. En el corto plazo, la dinámica de la componente inestable de los modelos domina y hace que el error de pronóstico crezca tan rápido (en el plazo de 3 a 7 días) que no es posible ir más allá de ese plazo. Debido a este límite, cualquier esperanza de hacer una predicción del tiempo a largo plazo (más de dos semanas) será siempre un sueño. Sin embargo, las ecuaciones de un modelo de pronóstico también contienen una componente más estable. Esta componente corresponde al 'clima'; y con ella se puede hacer un mucho mejor trabajo de predicción.

Son varios los elementos que se deben tomar en cuenta para proyectar el clima en escalas estacionales o anuales, o para generar escenarios de cambio climático. Uno de los de mayor importancia en materia de modelación numérica del clima ha sido el reconocer que las predicciones o proyecciones del clima sólo pueden darse en un sentido probabilístico que refleje la naturaleza caótica del sistema climático. Por ello, un pronóstico del clima se debe construir con varios experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes. El conjunto de todos los experimentos constituye un ensamble, que permite establecer la condición más probable. La dispersión entre esos experimentos nos habla de la confianza o incertidumbre de la proyección y se puede expresar como una Función de Densidad de Probabilidad (PDF).

Así, la información de pronóstico incluye, no sólo el valor medio, sino también una medida de la dispersión entre las realizaciones que forman el ensamble, e incluso información sobre las condiciones extremas. Si la dispersión en la PDF es baja, se tiene mayor confianza de que se llegará a una condición climática en un rango dado. Si la dispersión es alta, existe mayor incertidumbre en cuál será el estado más probable y por tanto se habla de que el clima para ese periodo es poco predecible. La medida de cuán predecible es el clima se puede obtener a través de experimentos con modelos numéricos y de establecer la dispersión entre los miembros de los ensambles, bajo diversos forzantes. Si recurrentemente se tiene alta dispersión entre miembros del ensamble se habla de que el clima tiene baja predecibilidad en esa región. Por el contrario, baja dispersión corresponde a una alta predecibilidad.

Existe por supuesto otra fuente de incertidumbre relacionada con el conocimiento de los procesos que determinan el clima y que no quedan incluidos en las simulaciones realizadas con los GCM. Dichos procesos son generalmente de escalas menores a la resolución del modelo y su impacto lleva a diferencias entre lo simulado y lo observado. La magnitud de tales diferencias da una idea de la importancia que tales fenómenos tienen en el clima a escala regional, proporcionando información sobre su importancia como fuente de incertidumbre en las proyecciones del clima. Quizá el caso más claro es el de los huracanes en el norte de México, donde las diferencias de un año a otro en la precipitación se pueden deber a la entrada de un sistema de este tipo, y que resulta en anomalías de precipitación de entre 50 y 100% en la lluvia total a escala regional. Sin embargo, en las proyecciones de cambio climático es difícil proyectar cuál será el efecto de los huracanes (e.g., sus trayectorias) en un plazo de alrededor de 30 años, razón por la cual, se trabaja con las condiciones medias y la variabilidad interanual entre proyecciones. En el caso de la temperatura, la incertidumbre asociada a “desconocimiento de procesos” es mucho menor y no es comparable con las anomalías positivas que se proyectan a futuro, excepto cuando se trata de las llamadas sorpresas climáticas.

Los modelos de circulación general de la atmósfera sólo pueden resolver procesos de escalas espaciales relativamente gruesas (250 km X 250 km), aunque en las últimas décadas se han hecho esfuerzos por aumentar su resolución espacial. En experimentos de largo plazo, como pueden ser las predicciones estacionales del clima o las proyecciones de cambio climático, los modelos son incapaces de resolver circulaciones o procesos de mesoescala, por lo que los GCM recurren a parametrizaciones, que son esquemas físicos mediante los cuales se trata de simular procesos como los asociados a nubes o capa límite mediante información de baja resolución espacial. Esto no significa que las parametrizaciones nos den información explícita o a nivel local de procesos de mesoescala, sino que sólo se intenta estimar el impacto que en conjunto los procesos de escalas no resueltas tienen en la circulación general. Por ello, es difícil sacar conclusiones de proyecciones del clima a escala local cuando se utilizan directamente las salidas de los GCM.

Es sabido que la atmósfera es fuertemente influenciada por las características de los océanos o de la concentración de gases de efecto invernadero. Un forzante del clima es aquel que hace que la mayoría de los experimentos de proyección se agrupen alrededor de un atractor del espacio fase. Así por ejemplo, el forzante dado por condiciones El Niño hace que las soluciones del modelo tiendan a agruparse en anomalías negativas de precipitación sobre gran parte de México. En el caso del aumento de los gases de efecto invernadero y del aumento en el forzante radiativo, las proyecciones de temperatura superficial son atraídas a un atractor que indica siempre aumentos en la temperatura global.

El forzante varía lentamente con respecto a las variaciones del tiempo meteorológico por lo que es el elemento clave para pronosticar o proyectar el clima. Ejemplos de forzantes son la temperatura de superficie del mar, las anomalías en la humedad del suelo, los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero o las condiciones de uso de suelo. Dentro de los grandes foros de análisis del clima, como el IPCC, se discute que aún y cuando se determine la predecibilidad de las variaciones interanuales del clima, ésta no necesariamente determina la confianza que se tenga en las proyecciones de cambio climático. La razón principal está en que el forzante que determina unas y otras es diferente. Mientras que en la variabilidad interanual del clima, es la temperatura de superficie del mar o la humedad del suelo el forzante principal; en el cambio climático los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero y los cambios en el albedo (cambios en el uso de suelo) son los forzantes clave. Es por ello, que las proyecciones de cambio climático global y regional, consideran la incertidumbre de las variaciones en los forzantes determinadas por factores incluso de orden socioeconómico para proyectar las variaciones del clima futuro.

3.2 Escenarios regionales de cambio climático

Construir condiciones regionales o locales de clima a partir de GCMs requiere, además del entendimiento de la dinámica del clima en estas escalas, el uso de técnicas de post-procesamiento de la información del GCM. Los métodos de post-procesamiento estadístico han sido exitosos en corregir muchos de los defectos inherentes a los modelos numéricos de la atmósfera. Entre estos métodos destaca el Model Output Statistics (MOS) que consiste en relacionar las salidas históricas

del modelo con las condiciones regionales o locales observadas, y en usar dicha relación estadística o función de transferencia para post-procesar o regionalizar cada salida del modelo. Algunos estudios sugieren que MOS supera a Perfect Prog en calidad de post-procesamiento de información, aunque no elimina por completo los sesgos de los modelos.

La reducción de escala no es simplemente un proceso de interpolación de una malla de baja resolución a una de alta resolución. Desde hace ya más de una década, el simple proceso de sumar una anomalía del GCM a una climatología de alta resolución espacial también ha sido superado por lo que en la actualidad se buscan esquemas que cumplan con ciertas consideraciones físicas, y en el contexto de que las proyecciones del clima, éstas deben ser probabilísticas. En el caso de cambio climático la reducción de escala puede basarse en diferentes aproximaciones, que algunos dividen en cuatro formas principales:

1. Métodos de regresión
2. Aproximaciones basadas en patrones de tiempo
3. Generadores estocásticos de tiempo
4. Modelos dinámicos de área limitada.

Existen diversos ejemplos de métodos de regresión, la mayoría de los cuales lleva a conclusiones de cambios locales en el clima a partir de los campos de baja resolución generada por GCMs. El más conocido es quizá el Statistical Downscaling Method (SDSM), y que ha sido utilizado en diversos estudios de cambio climático regional (<https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/>).

Los modelos estocásticos de precipitación diaria son útiles tanto para la caracterización de los climas y su simulación local, como para construir relaciones con la agricultura, hidrológicas, o de otros modelos de respuesta. Un generador estocástico de tiempo es un modelo numérico creado para generar series diarias de tiempo “estadísticamente idénticas” a las observadas. El resultado de reducción de escala de un GCM por un modelo estocástico puede ser fácilmente utilizado para analizar impactos del cambio climático. Los generadores estocásticos de tiempo meteorológico son relativamente simples como para ajustar datos observados con campos medios, y los parámetros pueden ser establecidos como

características del clima de un lugar. Los esquemas más conocidos son LARS y WGEN.

3.3 Los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero

Para tratar la primera fuente de incertidumbre es decir, la incertidumbre en las emisiones futuras, el IPCC generó una serie de escenarios de emisiones de GEI. Para ello se partió de cuatro diferentes proyectos de desarrollo socioeconómico global, denominadas A1, A2, B1 y B2, que describen consistentemente las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero. Todos los escenarios basados en una misma historia constituyen una “familia”. Un escenario adicional es conocido como COMMIT y corresponde al escenario idealizado en que todos los países cumplen con las cuotas de emisiones de GEI bajo el protocolo de Kyoto; el escenario COMMIT es el escenario que supone menor concentración futura de GEI y es una idealización de lo que sucedería si todas las naciones se comprometieran con el medio ambiente.

La creación de los escenarios de temperatura o precipitación futura es una de las etapas más importantes dentro de los estudios de riesgo ante cambio climático. Los escenarios de cambio climático se han desarrollado como puentes entre los encargados de los GCMs, con los que se hacen los experimentos de cambio climático, y aquellos responsables de estudiar los potenciales impactos del cambio climático. Por ello, los escenarios de cambio climático deben brindar información relevante para los sectores o a la medida de las necesidades del usuario; suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto; representativa del rango de incertidumbres de las proyecciones; que incorpore las características de la región y diseñados para alimentar esquemas de toma de decisiones. La necesidad de contar con información detallada para diseñar políticas de adaptación ha resultado en que la mayoría de los escenarios de cambio climático, como los presentados por el IPCC en el 4º Informe de Evaluación (IPCC AR4) han sido regionalizados.

3.4 El uso de *Climate Predictability Tool (CPT)* para reducción de escala

Existe una herramienta de regionalización de salidas de GCM de tipo estadística, conocida como *Climate Predictability Tool (CPT)*, desarrollada por el International Research Institute for Climate and Society (<http://iri.columbia.edu>) que permite reducir la escala espacial de predicciones climáticas estacionales hechas con GCMs. El CPT es una herramienta estadística basada en la corrección de errores sistemáticos de las salidas de los GCMs a través de la identificación de patrones espaciales, siguiendo la filosofía de MOS. Para el presente trabajo el esquema CPT fue modificado para ser aplicado en el contexto de un gran número de escenarios de cambio climático de forma que se mantenga la tendencia de largo plazo, reflejo del impacto del forzante radiativo. De esta forma, los campos generados por GCMs con escalas espaciales del orden de 250 Km X 250 Km (en promedio) se reducen a resolución espacial de 50 Km X 50 Km, con base en la resolución de los campos de datos de temperatura y precipitación históricos observados disponibles.

Una muestra de la capacidad de regionalización espacial de CPT se puede establecer cuando se comparan los campos climáticos observados, los generados con GCMs y los regionalizados con CPT (Fig. 3.1). Se puede observar que a través de la función de transferencia del CPT se logra captar el efecto de la topografía, tanto en temperatura como en las precipitaciones acumuladas.

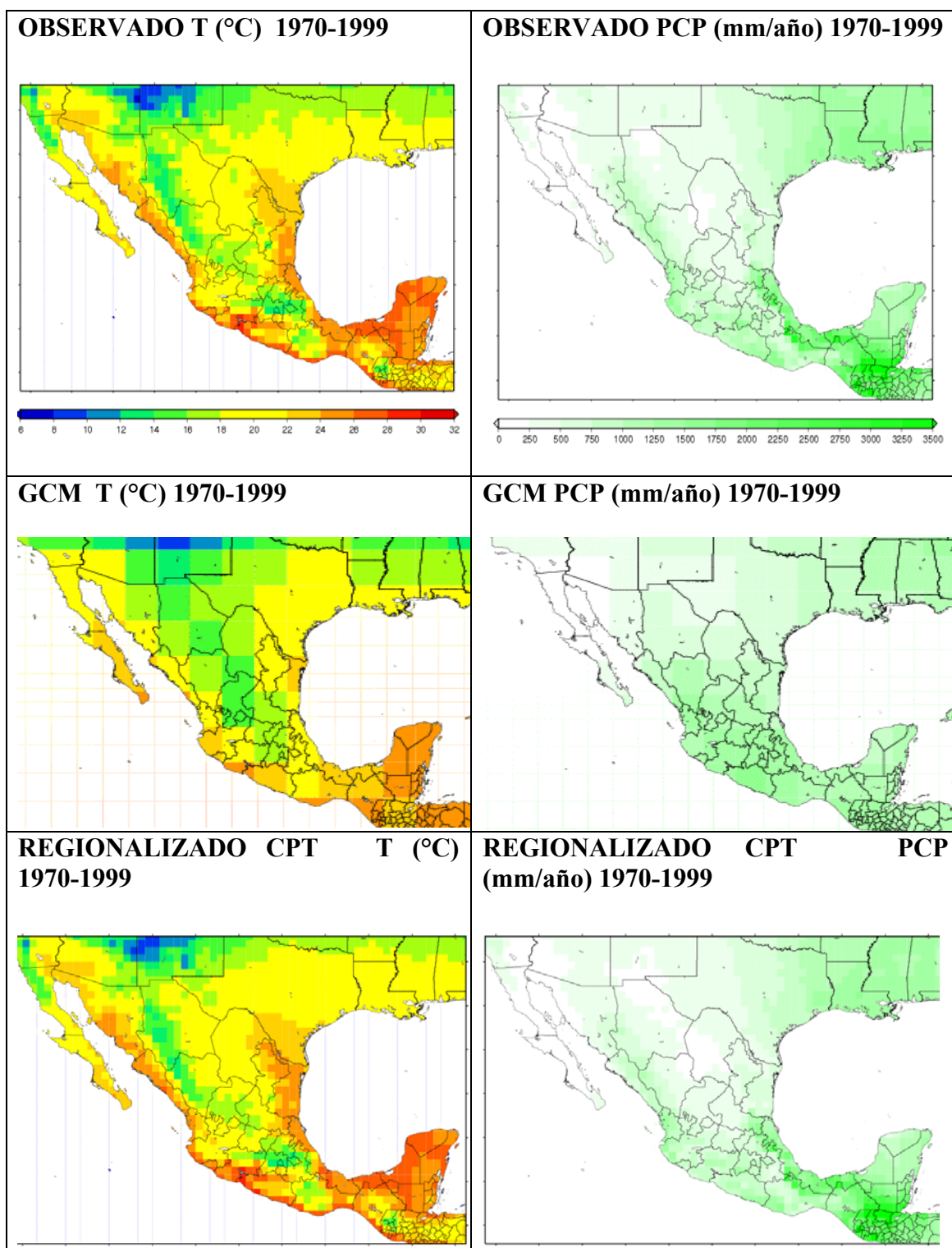


Fig. 3.1 Campos de temperatura (°C) promedio anual y precipitación acumulada anual (mm/año) para la climatología 1970-1999, usando datos observados, de GCM y regionalizados espacialmente con CPT

El uso de CPT para escalamiento espacial se realiza con campos mensuales. Sin embargo, el análisis de eventos extremos requiere de considerar procesos en escalas temporales menores. Para el presente análisis, el escalamiento temporal es de tipo estadístico y para ello se usa un Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico (GETM). Como todos los métodos estadísticos de reducción de escala, los GETM se basan en el establecimiento de relaciones empíricas entre variables de baja y alta resolución temporal en donde la resolución deseada generalmente es diaria, derivada por campos mensuales o estacionales, aunque no necesariamente se ocupa un campo dependiente y otro dependiente para establecer las funciones de transferencia, es decir, comúnmente se utilizan las estadísticas establecidas entre varios campos clave, como precipitación, radiación, temperatura mínima, máxima de los campos observados diarios y se deriva la respuesta ante cambios relativos de estas variables para alguna época del año, o mes.

Un GETM genera secuencias diarias realistas de variables climáticas como precipitación, temperatura máxima, mínima, humedad, etcétera, con las mismas características estadísticas que los datos observados para la estación o punto de malla a escalar en la proyección. La componente estocástica en un generador de tiempo está controlada por la selección de un número al azar. Cambiando este número se obtienen secuencias de tiempo completamente diferentes. Esto significa que es posible generar muchas secuencias de tiempo diario de un escenario en particular – las secuencias estadísticas de cada escenario serán muy parecidas, pero no idénticas. Así, diferentes combinaciones de datos diarios se generan, moduladas por una condición climática mensual. Dado que la variable mensual de escenarios de cambio climático con menos incertidumbre es la temperatura, esta variable se usa como modulador del GETM tanto para temperaturas, como para precipitación diaria.

3.5 Resultados

El esquema CPT permite aplicar las técnicas estadísticas de reducción de escala de regresión por componentes principales (PCR), análisis de correlación canónica (CCA) y regresión múltiple a cualquier variable. El esquema de

regionalización CPT aplica diferentes técnicas estadísticas para estandarizar los campos de los GCM, muestrear los datos, recalibrar las ecuaciones en un segundo periodo de calibración, normalizar los campos o sustituir valores faltantes, con el objeto de optimizar las ecuaciones de reducción de escala (ecuaciones de regresión). CPT trabaja con campos mensuales o estacionales obtenidos de un periodo histórico de simulación del GCM (periodo de calibración) y construye una ecuación de transferencia mensual.

Para la generación de escenarios de alta resolución espacial se tomaron las salidas de los modelos utilizados para el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC, (*Data Distribution Center*, <http://www.ipcc.ch>). Los escenarios de emisiones utilizados son A2 y A1B en el periodo 1900-1999 para la calibración, es decir la simulación de control del siglo XX (escenario referido como 20c3m) y el periodo 2000-2099 para proyecciones futuras. Las variables utilizadas son razón de precipitación por día en resolución mensual y temperatura media mensual. Los modelos del AR4 utilizados son 23, con solo una o varias realizaciones para los diferentes escenarios de emisiones. Una realización es un experimento en el que la condición inicial varía. El escenario A1B fue el que más experimentos incluye, pues para éste se utilizaron 22 GCMs. Una descripción completa de cada uno de los modelos, sus centros de creación, corridas, y variables se tiene en http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/info_for_analysts.php#time_info. En total se manejan del orden de 50 realizaciones, tanto para A2 como para A1B.

La base de datos observados de temperatura media mensual y precipitación mensual acumulada se tomó del Centro de Investigación Climática, de la Universidad de Norwich, conocido como CRU, que es una base de datos usada a nivel mundial. Las bases de datos observados CRU están en mallas interpoladas de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, que comprende un periodo de 102 años, de 1901 a 2002. Solo se ocupó el periodo 1901 a 1999 correspondiente al periodo correspondiente a 20c3m.

Los escenarios de cambio mensuales permiten inferir la estructura diaria de los cambios esperados empleando un GETM que para el presente caso es LARS, que genera datos sintéticos diarios para una estación o punto de precipitación, temperatura máxima y mínima. Para el presente trabajo, los datos observados

en puntos específicos provienen de la base de datos ERIC3 para las variables precipitación, temperatura mínima y máxima. Los escenarios mensuales se manejan como cambios relativos y absolutos respecto a las condiciones medias observadas.

Para evaluar la calidad de la simulación, se analizó la respuesta bajo el forzante radiativo del siglo pasado, calculando la tendencia anual simulada en precipitación y temperatura en México para el periodo de control del siglo XX (20c3m). Esta evaluación se aplicó a los veintitrés modelos usados en el AR4. La tendencia fue calculada para el periodo 1901-1969 mediante una línea recta que pasa del promedio de la primera década y continúa hasta el valor promedio de la última década. Los cálculos se hicieron para cada punto de malla de modelo dentro del dominio. La tendencia en temperatura observada en este periodo es en promedio positiva en todo México, salvo en la región noreste. Los veintitrés GCMs simularon esta tendencia en forma aproximada, aunque con ciertos sesgos en el patrón espacial y magnitud de calentamiento. En general, la respuesta al forzante radiativo impuesto durante el presente siglo fue correcta, pues muestra mayor calentamiento hacia el noroeste del país, como ocurre con lo observado, por lo que la mayoría de los GCMs cumple con una primera condición, que es responder en forma adecuada al forzante radiativo.

En el caso de la precipitación, los modelos tienen problemas para capturar la estructura regional de la precipitación y tal dificultad se refleja en el hecho de que la tendencia de la precipitación simulada es en general muy pequeña. Algunos modelos muestran una tendencia a más lluvia en el norte de México aun y cuando lo observado parece corresponder a un dipolo norte sur relacionado con la variabilidad de muy baja frecuencia (décadas) de las precipitaciones en México.

Un ejemplo del efecto del escalamiento espacial en los GCM se puede mostrar para el caso de los incrementos de temperatura proyectados hacia finales del presente siglo con referencia a la condición de finales del siglo XX. Con el GCM *miub_echo_g* y el escenario de emisiones A1B, el máximo calentamiento ocurre hacia el norte-noroeste de México, y es de alrededor de 4.5° C (ver ejemplo del GCM *miub_echo_g*, Fig. 3.2a). Después del proceso de escalamiento espacial con CPT, las regiones con mayores incrementos de

temperatura se ubican hacia la zona de entrada del Golfo de California (Fig. 3.2b), pero con incrementos máximos de temperatura del orden de 3.5°C. Debe recordarse que el escalamiento con CPT corrige errores sistemáticos del GCM como son los relacionados con la magnitud, así como ubicación y forma del patrón espacial de la proyección de la anomalía, de la misma forma en que lo hacen los esquemas de post-procesamiento de las salidas de los pronósticos del tiempo tipo MOS.

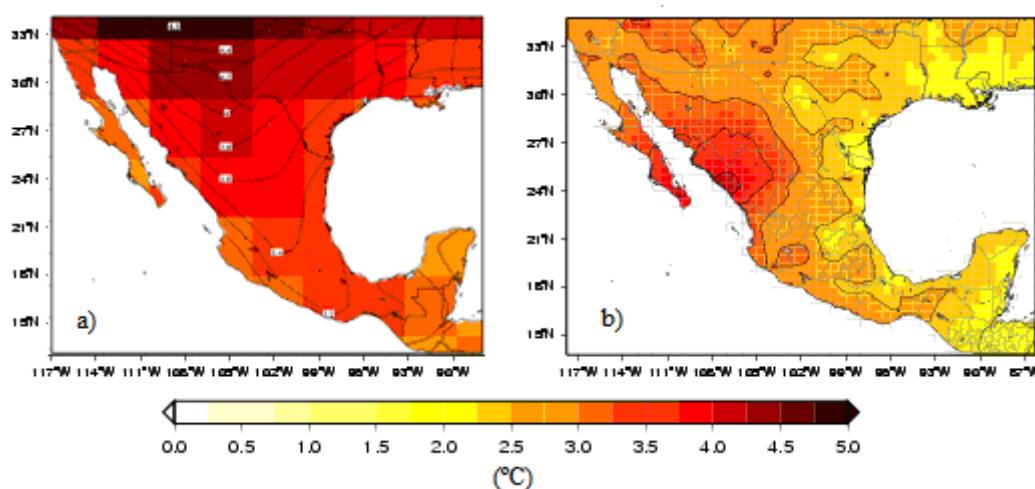


Fig. 3.2. Escenario de cambio en temperatura al 2080-2099 con el GCM *miub_echo_g* bajo el *escenario de emisiones SRES-A1B* (a) *antes* y (b) *después del escalamiento con CPT*.

La incertidumbre en los escenarios asociados a las diferencias entre modelos y realizaciones se presenta en términos de la diferencia el rango inter-cuartil de los valores proyectados, ejercicio que se realiza para las proyecciones de emisiones de GEI A2 y A1B. Si bien es cierto que no existe una única manera de estimar la incertidumbre en escenarios de cambio climático, en el Grupo I del IPCC existen acuerdos para generar una medida de ésta a partir de la dispersión entre las proyecciones (IPCC 2007). Así, la incertidumbre en el cambio estimado de las variables climáticas requiere considerar:

- ❖ La consistencia entre diferentes modelos (globales y regionales), pues un fuerte consenso acerca del signo del cambio genera más confianza que cuando se tiene grandes diferencias entre proyecciones.
- ❖ El nivel de entendimiento de los procesos, pues si pueden explicar físicamente por qué ocurren los cambios, la incertidumbre es menor; y

- ❖ La tendencia de cambio en las observaciones, ya que si el cambio puede ser claramente distinguido de la variabilidad natural, es más cierto que ocurra bajo las suposiciones de cambio climático.

3.6 Los escenarios de temperatura

El patrón de calentamiento global para finales del siglo XXI muestra en general, éste será mayor en el Hemisferio Norte, en latitudes medias y altas, principalmente sobre las regiones continentales (ver Cap. 11, IPCC-AR4¹⁹). Analizando las salidas de los modelos de baja resolución, es decir los GCM directamente, las proyecciones para México bajo los escenarios SRES de emisiones de GEI, se encuentra un incremento de temperatura superficial del mismo modo que con el patrón global, hacia latitudes más altas y sobre regiones continentales. Prácticamente todas las realizaciones indican un cambio positivo (Fig. 3.3). Entre las décadas del 2010 y el 2040 (referido como 2030), los cambios en la mayor parte de Norte América no superan 1°C, aunque la dispersión es del orden de 0.75°C sobre Estados Unidos y de alrededor de 0.5°C sobre México. Entre las décadas 2040 y 2070 (referido como 2050) el aumento promedio proyectado entre modelos está entre 2 y 2.5°C, con mayores aumentos hacia el norte de México. La dispersión entre proyecciones es de 0.75°C (rango intercuartil), es decir la dispersión sobre México es relativamente pequeña comparada con el valor del cambio. Finalmente, hacia finales del presente siglo, entre el 2070 y el 2099 (referido como 2080), los aumentos llegan a ser de entre 4 y 4.5°C en el norte de México, con una dispersión entre proyecciones de hasta 1.25°C.

La incertidumbre es mayor cuando se trata de analizar la magnitud del incremento de temperatura por regiones. De acuerdo a los GCM, la magnitud más fuerte de anomalía de temperatura promedio anual en México alcanza los 4.5° C hacia finales del presente siglo bajo el escenario A2. Esta señal se

¹⁹ Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ubica principalmente hacia el noroeste de México, al parecer como una continuación del patrón espacial de la anomalía de temperatura que aparece desde suroeste de Estados Unidos.

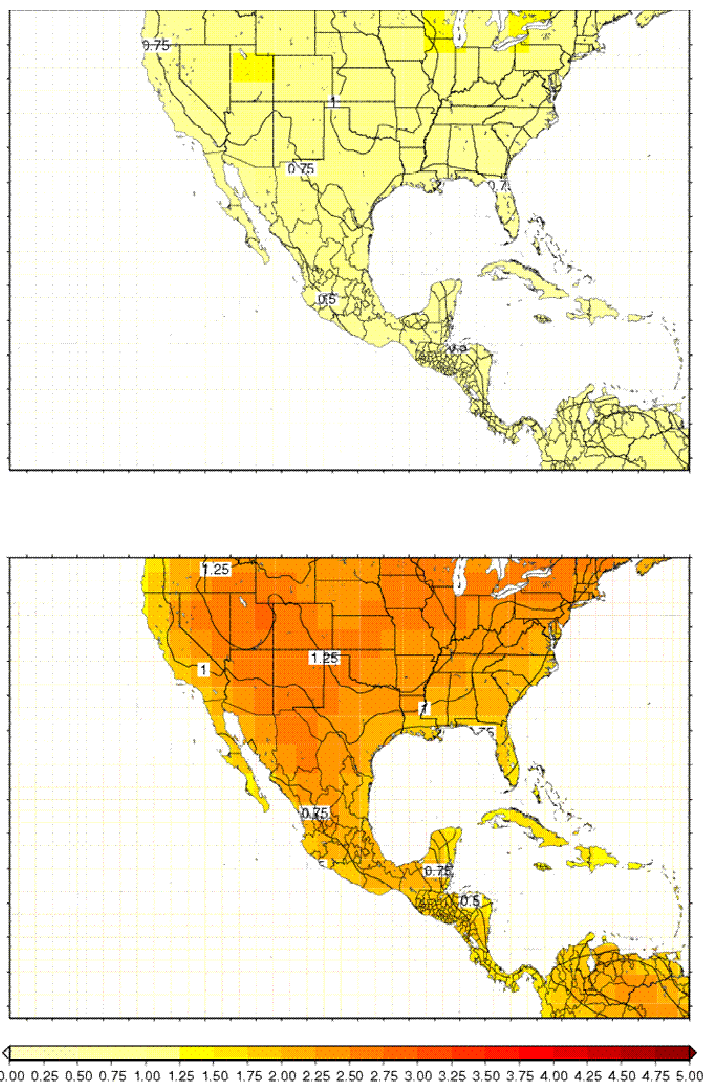


Fig. 3.3. Escenarios (ensamble) de cambio en temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (colores) de los GCMs y de dispersión entre modelos (rango inter-cuartil) (líneas) bajo el escenario de emisiones A2. a) al 2030, b) al 2050 y c) al 2080,

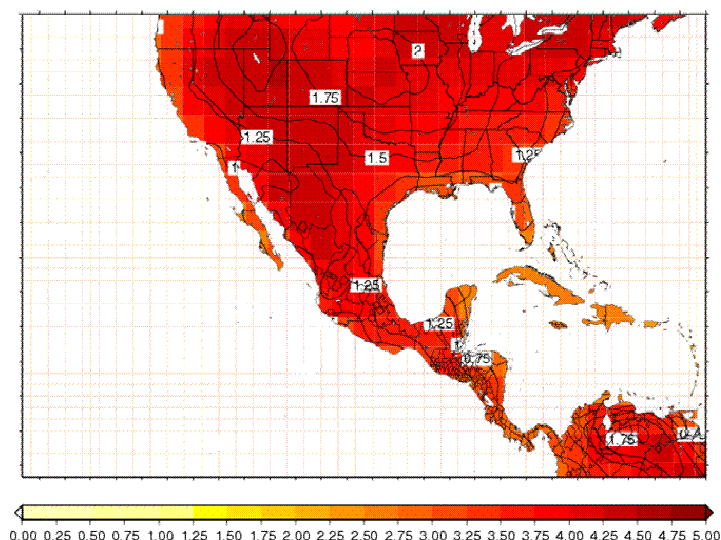


Fig. 3.3. Continuación

Cuando se considera la proyección de cambio en la temperatura bajo el escenario de emisiones A1B la magnitud de los aumentos en temperatura es al menos 1°C menor que en el escenario A2 aunque la dispersión disminuye en menor medida (Fig. 3.4). Como en el caso de A2, el ensamble de los GCM muestra que es en la región noroeste del país en donde se producen los mayores cambios en temperatura, alcanzando incrementos de casi 4°C.

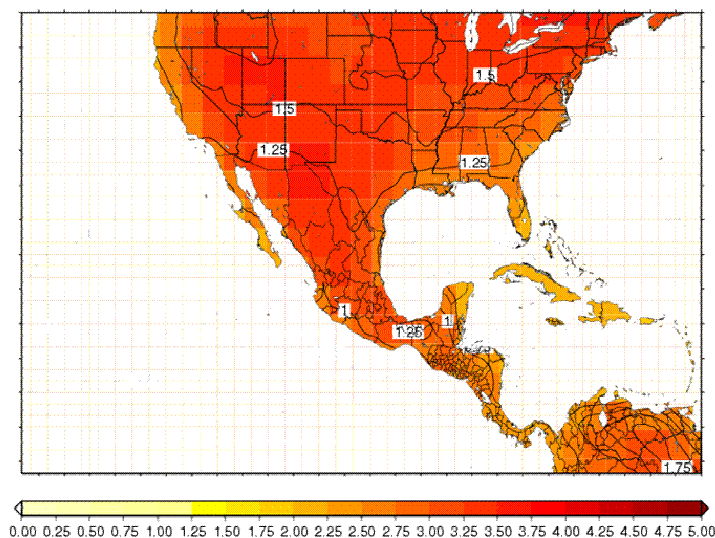


Fig. 3.4. Como en la Fig. 3c pero para el escenario de emisiones A1B.

Aunque el patrón de cambio en la temperatura con GCMs bajo los escenarios regionalizados de emisiones A2 y A1B comparte similitudes importantes, se

debe tener en cuenta que la baja resolución de los modelos no permite incorporar efectos de menor escala, como es la topografía o el uso de suelo y por tanto presentan errores sistemáticos. Cualquier modelo de la atmósfera tiene errores sistemáticos en cuanto a la magnitud, forma del patrón espacial y magnitud de las anomalías climáticas simuladas o proyectadas. Por ello, se han desarrollado esquemas de post-procesamiento de la información tipo MOS, que corrigen dichos errores cuando son sistemáticos. El esquema CPT es uno de los procedimientos capaces de corregir dichos problemas de los GCMs, siguiendo procedimientos tipo MOS.

Las mayores diferencias entre proyecciones de clima son aun debidas a la magnitud del forzante radiativo del escenario de emisiones. El ensamble para el escenario A2 regionalizado (Fig. 3.5) para finales del siglo 2070-2099 presenta un calentamiento pronunciado en el noroeste de México. Las proyecciones a nivel país en el escenario A2 están en un rango de 2.5 a 4° C con una dispersión de alrededor de 1.75° C en la región de mayores anomalías, aunque en casi todo México la dispersión es inferior 1.5° C.

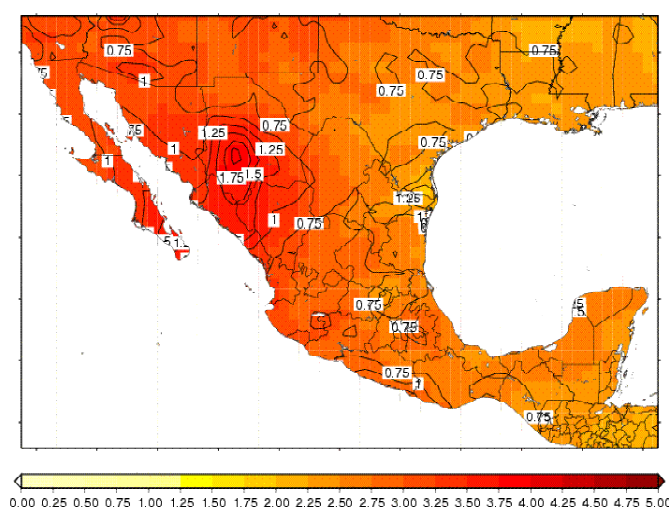


Fig. 3.5 Como en la Fig. 3c, pero para el escenario regionalizado de cambio en temperatura bajo A2

Resulta claro que el procedimiento de regionalización utilizado es más que una simple interpolación o una superposición de anomalías de baja resolución en un campo medio de alta resolución. Bajo un escenario de altas emisiones como A2, la mayor magnitud de aumento en temperatura se ubica ahora en la frontera entre el norte de Sinaloa y el suroeste de Chihuahua. Es ahí donde se

tiene la mayor dispersión entre escenarios, reflejo de una mayor diferencia entre modelos en cuanto a la magnitud del cambio regional. Por la naturaleza de cómo se define la incertidumbre, basada en la dispersión entre proyecciones bajo un mismo escenario de emisiones, se consideran en la dispersión sólo aquellos modelos que caen en el rango intercuartil. Ello deja fuera de este rango de incertidumbre a los modelos que proyectan condiciones verdaderamente extremas. Uno de esos modelos que se aleja de la gran mayoría es el modelo del Hadley Center (HadCM3) considerado un “*outlier*” para los integrantes del Cap. 11 del Grupo I del IPCC en el AR4.

Regionalmente el noroeste de México ha mostrado un calentamiento más intenso durante casi todo el siglo XX. El noreste ha experimentado una ligera tendencia al enfriamiento (<http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/trends.html>), en términos de la temperatura media. Otras características regionales aparecen al reducir la escala espacial mediante CPT, como por ejemplo, anomalías mayores de temperatura sobre el sur de la península de Yucatán, Istmo de Tehuantepec y centro de México. Esta condición aparece incluso al regionalizar con modelos dinámicos.

Como se observa en el ensamble de series de tiempo en el periodo de calibración, por ejemplo en la región de Chihuahua (Fig. 3.6), el conjunto de modelos simula adecuadamente la tendencia de calentamiento entre 1970 y 2000, condición impuesta para considerar que los modelos responden adecuadamente al forzante radiativo. En la región del suroeste de Chihuahua, donde se proyecta el mayor cambio en temperatura hacia finales del presente siglo, los modelos tienden a una mayor dispersión luego del 2050. Por ello, las proyecciones en las próximas dos o tres décadas varían poco entre ellas, lo que lleva a que los mayores cambios entre modelos ocurran en la proyección al 2080. Adicionalmente, la rapidez de cambio en la temperatura proyectada se incrementa después de la mitad del presente siglo, en el caso del escenario A2.

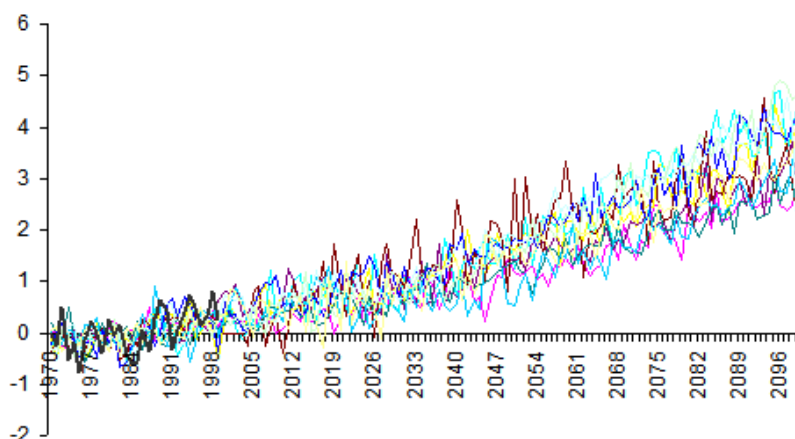


Figura 3.6. Anomalía de temperatura media anual (°C) en Chihuahua, observada en el periodo 1970-1999 (línea negra), y simulada regionalmente por 14 modelos regionalizado, así como proyectada para el periodo 1970-2099 para el escenario A2 (líneas en colores).

Para dar una mejor idea del significado de escenario en términos probabilísticos se puede fijar un umbral y determinar el número de realizaciones que se encuentran por encima o por debajo de éste. Dicho ejercicio permite contextualizar la magnitud de los cambios. En el caso de la temperatura media anual, se analiza la probabilidad de superar una desviación estándar (interanual), como la observada en el periodo 1970-1999, para los meses JJA (verano) y DEF (invierno). Existe mayor variabilidad interanual hacia la región noreste de México que hacia la región sur o la costa de Pacífico mexicano.

3.7 Los escenarios de precipitación

La señal de cambio climático en la lluvia sobre la región de México y Caribe muestra en promedio entre GCMs un decremento en la precipitación anual acumulada. Sin embargo, la mayoría de las proyecciones de precipitación de los GCM para finales de siglo indican que esta región es una en la que se tiene mayor incertidumbre en sus proyecciones (Meehl et al., 2007). Las anomalías respecto a la climatología construida en el periodo 1970-1999 alcanzan hasta un 15% menos de lluvia en el acumulado anual bajo el escenario A2 (Fig. 3.7).

Con la baja resolución espacial de los GCMs, la señal del cambio en lo que respecta a la anomalía y dispersión presenta cambios significativos bajo los escenarios A2 y A1B en casi todo México. Los cambios más fuertes se

observan hacia la región del Pacífico centro y norte, en los estados de Michoacán, Colima, Nayarit y Sinaloa, con anomalías que van de -60 a -100 mm al año en los escenarios A2 y A1B, con una dispersión que supera con mucho la magnitud de la anomalía proyectada (Fig. 7). Superponer esta anomalía directamente a un campo de precipitación de alta resolución pasa por alto el hecho de que la precipitación responde a factores orográficos. Por ello, los errores en los patrones de precipitación proyectados deben corregirse en el proceso de regionalización.

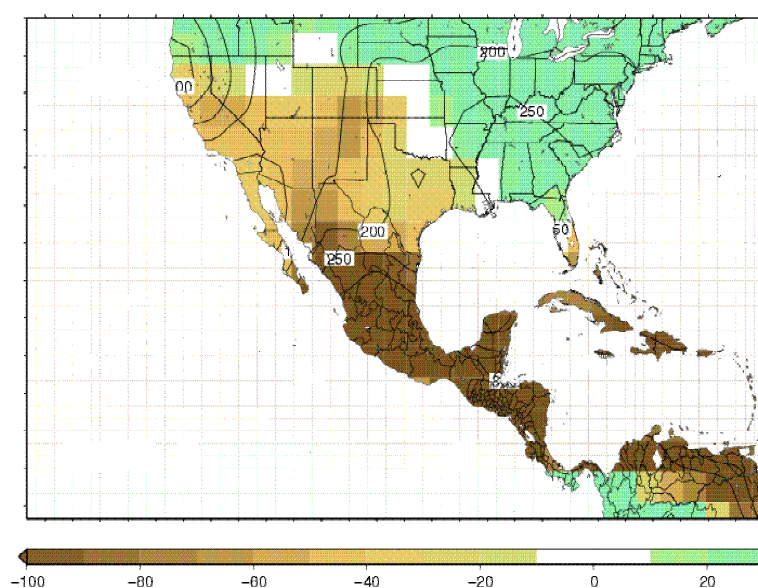


Figura 3.7. Ensamble (colores) de anomalías de precipitación acumulada anual (mm/año) de los GCM con respecto del periodo 1970-1999 y la dispersión (rango intercuartil) entre miembros (líneas) para el periodo 2070-2099 en el escenario de emisiones A2.

En el capítulo 10 del cuarto informe de evaluación del IPCC se señala que aunque el cambio climático en México y el Caribe apunta a una condición seca, este resultado no es tan confiable debido a que gran parte del régimen pluviométrico de esta región está definido por la actividad de huracanes, y estos sistemas no son bien modelados aún en los GCM. En el noroeste del país, se tiene una fuerte componente orográfica en la lluvia que debe reflejarse en el proceso de regionalización. La fuente de mayor incertidumbre está relacionada con la limitación propia de los GCM de generar fenómenos de mesoescala. Aun bajo estas limitaciones, la mayoría de los modelos de circulación general de la atmósfera proyectan disminuciones porcentuales en la

precipitación en México. Menos de una cuarta parte de los GCMs usados en el IPCC AR4 del Grupo I proyectan aumentos en la precipitación sobre México.

En el campo regionalizado de precipitación para el periodo 2070-2099 se presenta una condición más seca principalmente en la Península de Baja California y en el noroeste y centro de México (en términos del porcentaje de lluvia acumulada promedio anual) (Fig. 3.8). Las mayores incertidumbres sobre dichos cambios se tienen en la península de Baja California, no sólo porque ahí se tiene la mayor dispersión entre proyecciones sino porque ahí, gran parte de la precipitación está asociada al paso de ciclones tropicales, los cuales son difíciles de proyectar (trayectoria) bajo cambio climático. Las variaciones cuando se tiene o no un ciclón tropical pueden ser de hasta 50% en la precipitación anual acumulada, mayor que las proyecciones de disminución en la precipitación.

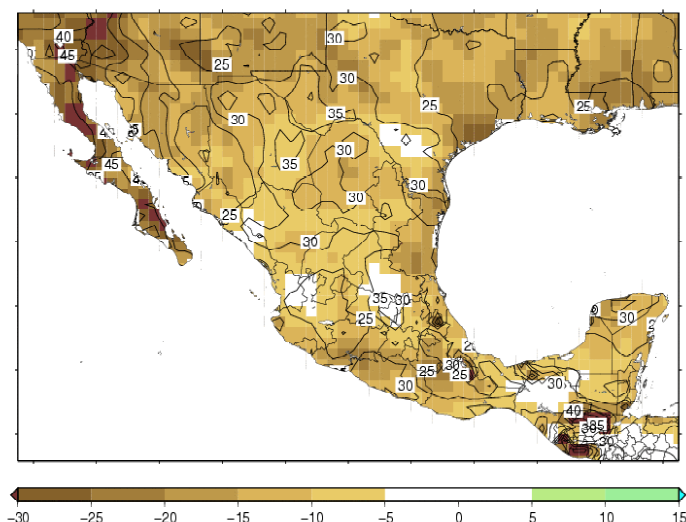


Fig. 3.8 Ensamble de cambios regionales proyectados en la precipitación (%) (colores) hacia el 2080 bajo el escenario A2, y dispersión (rango intercuartil) entre modelos (líneas).

En la parte sur de México, los cambios proyectados en precipitación indican disminuciones, muy probablemente asociadas a una reducción en la actividad en las ondas del este, sistemas capturados en las simulaciones de los GCM. Por esta razón, la mayor incertidumbre en las proyecciones de disminución en el centro de México se debe a las diferencias entre realizaciones y modelos.

Los escenarios para verano en el periodo 2070-2099 bajo el escenario A1B (Fig. 3.9) señalan una disminución en la precipitación que refleja básicamente el patrón observado bajo el escenario A2, aunque con menor magnitud.

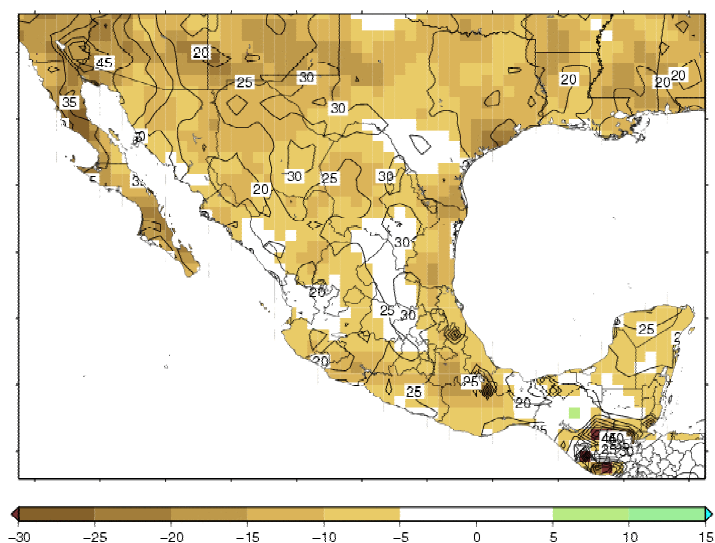


Fig. 3.9 Como en la Fig. 13, pero para el escenario de emisiones A1B.

En general, los mayores cambios se presentan en las regiones y temporadas que climatológicamente llueve más por lo que el análisis puede ser hecho sobre anomalías estandarizadas o en términos porcentuales con respecto de la condición actual. Los fuertes contrastes en el régimen pluviométrico de México hacen que una anomalía de precipitación anual proyectada sea mucho mayor en Tabasco o Chiapas que en Chihuahua o Baja California. Sin embargo, porcentualmente los mayores cambios se encuentran al norte del país.

Para calcular las probabilidades de que se rebase algún umbral crítico, se tomó como referencia decrementos mayores a 15% respecto al periodo 1970-1999. Los escenarios A1B y A2 muestran que al periodo 2020-2039 las probabilidades de rebasar. Dicho umbral son bajas en la mayor parte del norte de México, aunque en estados como Sonora y península de Baja California, las probabilidades son cercanas al 50%, un valor que al ser combinado con la vulnerabilidad en la disponibilidad de agua representa un riesgo muy alto. En esta región, la lluvia tiene su máximo en invierno, temporada que presenta probabilidades altas de calentamiento significativo, con lo cual habrá mucha menor humedad y disponibilidad de agua. El centro de México presenta

probabilidades relativamente altas rebasar el umbral crítico, con probabilidades cercanas al 40%.

Los eventos extremos y su proyección

La habilidad de un generador estocástico de tiempo meteorológico (GETM) de producir distribuciones de probabilidad de condiciones meteorológicas diarias de temperatura y precipitación a partir de condiciones mensuales permite analizar eventos extremos a partir de escenarios de clima futuro. En el noroeste de México los cambios en la temperatura media mensual anual son de poco más de 3°C bajo el escenario A1B y de más de 4°C bajo el escenario A2. Considerando que se tiene menos incertidumbre en las proyecciones de temperatura, la condición que se entrega al GETM para estimar distribución de eventos diarios es la que corresponde a los cambios de temperatura de los modelos reducidos por CPT.

La Función de Distribución de Probabilidad (FDP) de temperatura máxima para la estación Siquirichic en Chihuahua, se construyó con cerca de 44 años de datos diarios observados de temperatura máxima y de medias mensuales de temperatura, a partir de 1950. Los principales cambios hacia las décadas 2030, 2050, y 2080 están, tanto en los valores medios, como en los de las colas de la distribución (Fig. 3.10). Los cambios de temperatura media mensual alteran la forma de la FDP, ampliando la variabilidad, por lo que los eventos de máxima temperatura incrementan su distribución en los extremos. Por ello, las ondas de calor podrían ser más intensas con aumentos de temperatura incluso a los de los valore medios proyectados. Los cambios en la intensidad de ondas de calor en Chihuahua podrían así llegar a extremos de 46 o 47°C hacia finales del presente siglo.

Aunque este caso corresponde a una sola estación en el noroeste de México, los resultados en términos generales son de eventos extremos cálidos más fuertes en la mayor parte del país. Un análisis similar, bajo el escenario A1B, para temperaturas mínimas para la década 2080 (Fig. 3.11) muestra incrementos en los valores máximos de las temperaturas mínimas, es decir un incremento en el número de noches cálidas.

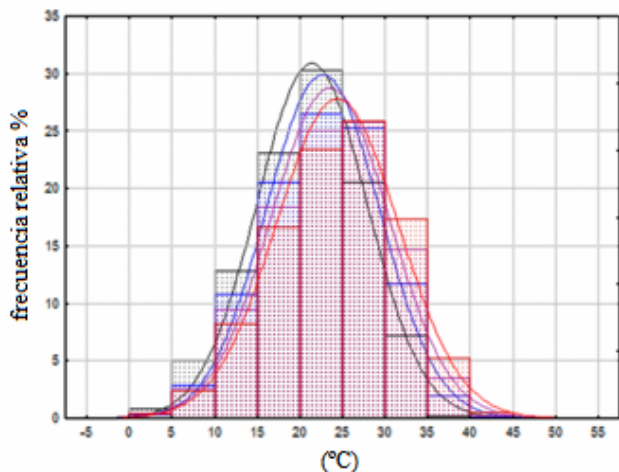


Figura 3.10. Función de distribución de Probabilidades (FDP) de temperatura máxima diaria para la estación Siquirichic en Chihuahua bajo el escenario A1B regionalizado. Línea negra corresponde a la observada actual, línea azul: proyección al 2030, morada: 2050 y roja: 2080.

Los cambios proyectados para las temperaturas mínimas son del mismo tipo que los observados para las temperaturas máximas, es decir, se presenta un aumento en la variabilidad de las temperaturas y con ello, un aumento en las temperaturas mínimas más elevadas, superior incluso al de la misma media climatológica (Fig. 3.11)

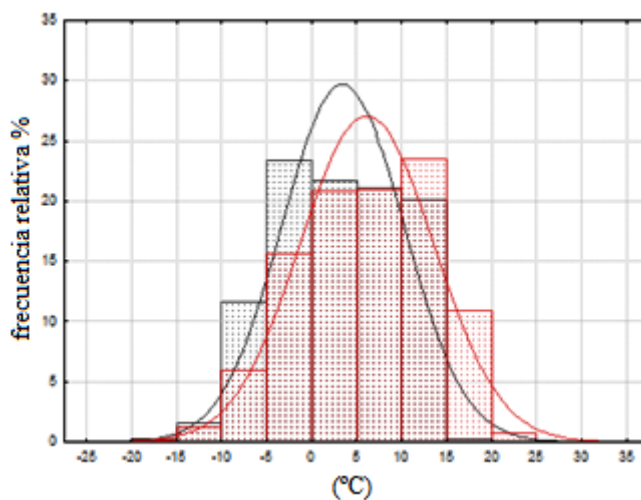


Figura 3.11. FDP de temperatura mínima diaria para la estación Siquirichic en Chihuahua bajo el escenario A2 regionalizado. Negro FDP observada y rojo FDP en 2080.

Los cambios sugieren que las ondas de calor podrían alcanzar valores que pongan en riesgo la salud de los habitantes de esta región. Incluso en el caso de las temperaturas mínimas es muy probable que las noches con valores extremos lleguen a más de 30°C en noches cálidas, lo cual requerirá de medidas de adaptación para mantener el confort humano.

Es sabido que los años de lluvias acumuladas intensas resultan de un mayor número de eventos extremos. La construcción actual de la distribución de las lluvias diarias debe tomar en cuenta el potencial aumento de humedad en la atmósfera bajo cambio climático. Un mayor contenido de humedad en la atmósfera, combinado con menos estabilidad asociada al calentamiento superficial hará que la probabilidad de tormentas severas aumente. Cuando se genera la FDP de precipitación estocásticamente bajo condiciones de una mayor temperatura únicamente, por ejemplo de Siquirichic, se obtiene un ligero aumento en eventos de precipitación entre 45 y 60 mm/día con respecto al clima actual (Fig 3.12). Dicha condición sugiere que en una atmósfera más caliente el contenido de vapor de agua o agua precipitable aumentará por lo que quizá sea más difícil que ocurra un evento de precipitación, pero la cantidad de lluvia que deje será mayor. Lo anterior es simplemente consecuencia de la relación de Clausius Clapeyron para los cambios de fase en un gas. Lo importante, desde el punto de vista dinámico, será analizar si la estabilidad de la atmósfera aumentará al calentarse la superficie y si los mecanismos dinámicos que produzcan movimientos ascendentes cambiarán como para favorecer la convección intensa en un lugar determinado.

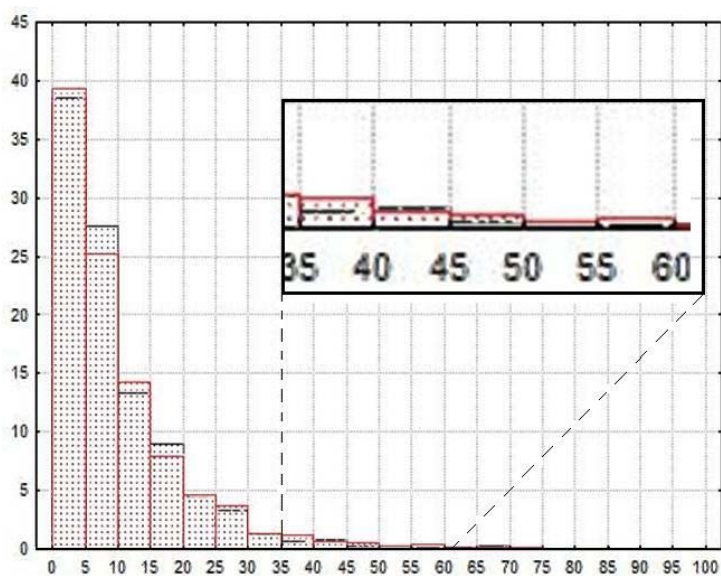


Figura 3.12 FDP de precipitación acumulada diaria para la estación Siquirichic en Chihuahua bajo el escenario A1B regionalizado. Negro FDP observada, azul FDP en 2030, morado FDP en 2050 y rojo FDP en 2080.

Quizá la forma en que se presente el cambio climático en el ciclo hidrológico de México sea con menos días de lluvia pero con algunos eventos de intensidad

que supere lo conocido hasta ahora. Tal parece ser el caso en el ejemplo de Chihuahua, pero puede mostrarse también para regiones como Yucatán o Tabasco. Por otro lado, en Tabasco (Fig. 3.13), región de alta vulnerabilidad a tormentas intensas, las proyecciones indica que pueden presentarse condiciones de aumento en la intensidad de las precipitaciones mas fuertes. Si este es el caso, se debe considerar cuál será el impacto de tormentas de más de 100 mm/día cuando se mantiene una tasa alta de deforestación.

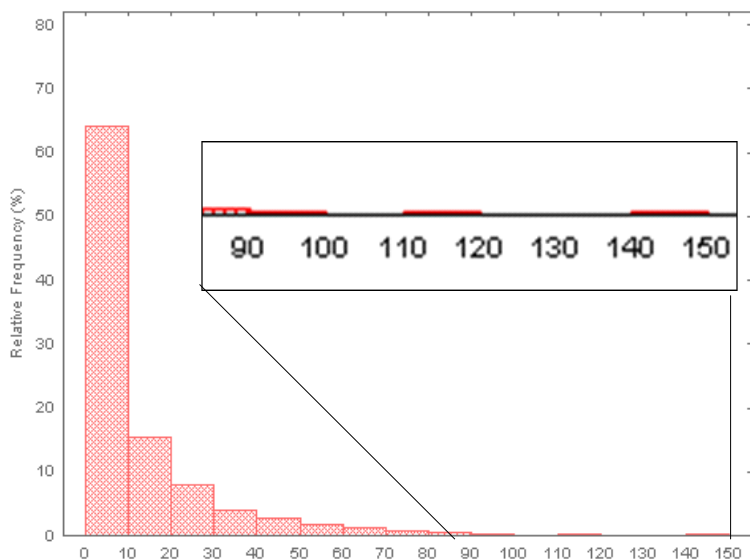


Figura 3.13. Como en la figura 12, pero para Boca del Cerro, Tabasco..

3.8 Conclusiones

La generación de escenarios regionales de cambio climático es una condición necesaria para tener una mejor estimación del riesgo ante lo que se considera es la mayor amenaza ambiental del presente siglo. Las técnicas de reducción de escala espacial o temporal permiten pasar a un análisis de potenciales impactos regionales o locales del cambio climático cuando se considera la vulnerabilidad ante condiciones extremas del clima. Los escenarios regionalizados son fundamentales cuando se trata de establecer una estrategia de adaptación o reducción de vulnerabilidad.

La reducción de escala no es un simple problema de interpolación o de superposición de anomalías de GCM a un campo climático de alta resolución espacial. Tales estrategias fueron superadas desde hace varios años por nuevos y mejores métodos. Quizá los más avanzados se basen en el uso de modelos de mesoescala que capturan algunos de los procesos de relevancia

en el clima regional. Sin embargo, una aproximación de este tipo requiere de gran capacidad de cómputo y de procesamiento de información para construir escenarios en términos probabilísticas, tal como se hizo en el proyecto europeo PRUDENCE.

Una aproximación adecuada es el uso de métodos estadísticos y funciones de transferencia que permiten capturar las relaciones entre la baja y la alta escala espacial bajo consideraciones físicamente significativas. La aproximación por CPT permite corregir tanto la forma, como la posición y la magnitud de las anomalías asociadas a los cambios de clima proyectados por GCMs. La prueba de que el método funciona se tiene cuando se evalúa desde diversas perspectivas la muestra independiente de datos 1970-1999, en la que los cambios en temperatura han sido marcados, respondiendo a un forzante radiativo más intenso.

El CPT permite regionalizar todas las realizaciones utilizadas para escribir los capítulos sobre escenarios del Grupo I en el IPCC AR4. En particular, los obtenidos para el presente análisis concuerdan con las conclusiones que a nivel de Norte América presenta el IPCC-AR4. Disponer de un gran número de realizaciones permite pasar a estimar las probabilidades de que ocurra una condición que lleve a que se rebasen valores umbral de riesgo, con lo cual se pueden proponer acciones de adaptación a nivel regional o local, tal y como comienzan a demandar los tomadores de decisiones y los actores clave.

4. Fuentes de Información para Generar Escenarios de Cambio Climático. I. Pacific Climate Impacts Consortium. Ejemplo: Construcción de Escenarios para las 18 Regiones de Douglas

En los estudios de variabilidad y cambio climáticos se requiere seleccionar las regiones de estudio, los sectores por analizar y el marco temporal (Benioff, 1996).

Los estudios pueden realizarse a escala local, regional, estatal, o por país o global. En general, se espera que los resultados permitan realizar evaluaciones de posibles impactos del cambio climático en regiones definidas como: a) unidades administrativas (distritos, municipios, estados), b) unidades geográficas (como cuencas, planicies, lagos), c) zonas ecológicas (bosques, manglares), d) zonas climáticas (desiertos, zonas de monzón), d) regiones sensibles (costeras, nichos ecológicos, comunidades marginales). Los datos climáticos se pueden requerir a nivel diario, mensual o anual, y se espera en cualquier caso que se cuente con 30 años de datos o más.

Para el IPCC la escala regional para los estudios de cambio climático está definida como aquella que describe el clima en un rango de 10^4 a 10^7 km² (Giorgi et al, 2001). El límite superior de este rango es llamado escala sub-continental, y su alcance está limitado por las inhomogeneidades climáticas que ocurren a esa escala. Las condiciones que ocurren a escalas mayores a 10^7 Km² se denominan

de escala planetaria, y están dominadas por los procesos de circulación general y sus interacciones. El límite inferior (10^4) es representativo de las escalas que utilizan los modelos regionales. Menores escalas que la anterior se denominan escala regional. Para algunos estudios, la información que proveen los AOGCMs, puede ser suficiente. En otras ocasiones, es necesario aplicar técnicas de regionalización para poder utilizar la información que proveen los modelos AOGCMs acoplados, de tal manera que el clima regional se define en términos de la circulación y forzamientos a escala planetaria, y también a escalas regionales y locales. Los métodos empleados para este propósito pueden ser 1) los modelos de circulación general de alta resolución (AGCMs, por sus siglas en inglés); 2) los modelos regionales, o modelos anidados de área limitada (RCMs, por sus siglas en inglés) y 3) los métodos empírico - estadísticos o estadísticos - dinámicos. Estas técnicas son evaluadas básicamente en términos de su actuación en reproducir las características climáticas actuales y su simulación de los procesos climáticos regionales. Es posible entonces utilizar esa información para describir las condiciones climáticas a escalas temporales de días hasta decadales. Sin embargo, es importante recordar que los AOGCMs aún tienen grandes problemas para simular climas a escalas regionales menores a los 10^4 Km² pues no están contruidos para esas escalas y por tanto tienen problemas para reproducir condiciones climáticas para regiones con sistemas topográficos complejos o sujetos a condiciones extremas como pueden ser los ciclones tropicales, como es el caso de México.

Establecer una base de datos común y salidas de los modelos AOGCMs que puedan adecuarse a estudios para diferentes regiones, sectores y escalas temporales es un reto para los equipos de investigación encargados de la generación de los llamados escenarios climáticos, ya que se requiere que estos se puedan emplear en los estudios de vulnerabilidad y adaptación (V&A). En cualquier caso, se necesita contar con bases de datos climatológicas contra las que se puedan contrastar y/o añadir los cambios climáticos propuestos. Estas bases se denominan escenarios base o líneas base.

La regionalización de Douglas (1993; figura 4.1) permitió contar con una base de datos de las variables climáticas básicas para los estudios de cambio climático. Dicha base de datos tiene las siguientes ventajas para los estudios de V&A:

- permite hacer estudios a nivel país y/o regionales,
- es pública,
- es confiable,

Para los estudios recientes en primer lugar se actualizaron las 18 regiones de Douglas (ya que las series terminaban antes de 1990), para tener una serie desde 1948 a 2004. Para el escenario base se utilizó el periodo 1961 – 1990. Se construirán ecuaciones de regresión que permitan reconstruir la serie de datos originales, y que permita realizar un análisis estadístico de las tendencias en temperatura y precipitación regional. Se espera con ello determinar en qué regiones de México se pueden encontrar evidencias de cambio en las variables temperatura y precipitación.

Para esas mismas regiones se construyeron nuevos escenarios de cambio climático (<http://www.pacificclimate.org/tools/select>), para los mismos modelos y escenarios de emisiones que se generen con la nueva versión del MAGICC (5.3).

Para esas 18 regiones se generaron las salidas para 20 AOGCMs, para cuatro escenarios de emisiones (A1B, A2, B1, B2), y para diferentes horizontes de tiempo (2030, 2050, y 2080). Todos estos resultados se incluyen también en la página del CCA.

Los resultados para todos los modelos se agruparon en valores mensuales, considerando la mediana para cada horizonte, el rango intercuartílico (dando los percentiles 25 y 75) y los valores máximos y mínimos. Esto indicará la dispersión de estos resultados, pero no se indicará que corresponden a alguna probabilidad.

Tanto con el nuevo MAGICC /ScenGen como para las 18 regiones se utilizaron tres modelos AOGCM, que corresponden a las nuevas versiones del Echam, Hadley y GFDL (MPIECH-5, GFDL2.0, UKHADCM3).

Douglas construyó 18 regiones (o divisiones, ver figura 4.1), basándose en la densidad geográfica de las estaciones y en los criterios:

- ❖ similitud en la pendiente y elevación de las estaciones,
- ❖ recuperación de los datos de 95% para el periodo 1947 – 1988, y

- ❖ los totales anuales de lluvia de las estaciones debían encontrarse dentro del 20% del la media del área de la región.

Douglas encontró 15 estaciones con datos de largo periodo, (algunas desde 1910), que sirvieron de base para cada región. Para ello, analizó la calidad de la base “dato por dato”, calculando para ello las medias y desviaciones estándar de cada región, marcando los datos que se encontrarán por encima o abajo del límite considerado aceptable (3 sigmas).

Los datos encontrados se cotejaron con los datos originales, algunos sólo capturados en papel. Douglas verificó esos valores también utilizando la información climatológica disponible de las estaciones cercanas y la “experiencia climatológica” para finalmente corregir o descartar algún valor.

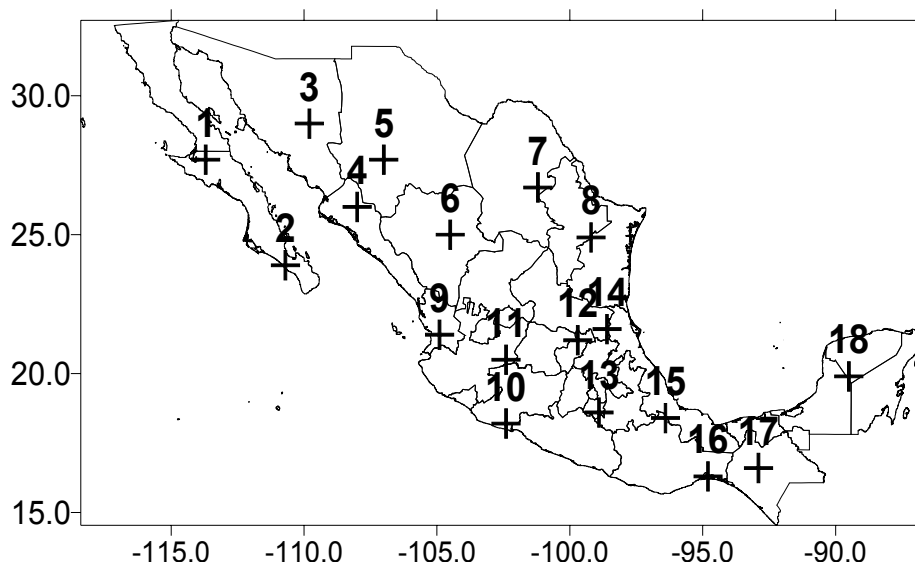


Figura 4.1. Las 18 Regiones de Douglas para México. Las marcas (+) indican la latitud y longitud promedios.

Para la reconstrucción de las series de temperatura y precipitación de las 18 regiones de Douglas se revisaron las bases de datos de estaciones meteorológicas incluidas en el ERIC3 y el CLICOM correspondientes a cada región y se seleccionaron estaciones que tuvieran información hasta por lo menos el año 2000, que cumplieran con criterios de calidad y que tuvieran pocos faltantes de información. A partir de esta información se construyeron modelos de regresión

estadísticamente adecuados que cumplieran con las pruebas de especificación siguientes:

No autocorrelación; Homoscedasticidad (general y autorregresiva); Permanencia estructural en los parámetros; Forma funcional; Normalidad; Correcta especificación (variables omitidas y redundantes);

Una medida adicional para discriminar entre modelos potenciales fueron los criterios de información de Akaike y de Schwarz.

El análisis de tendencia de las 18 regiones se basa en la misma metodología de construir modelos de regresión estadísticamente adecuados, haciendo especial énfasis en el análisis de la estabilidad de parámetros e identificando posibles fechas de cambio estructural en la función de tendencia (ver por ejemplo, Gay et al., 2008; Gay et al., 2007²⁰; Spanos y Mcguirk 2002²¹).

La Figura 4.2 muestra las reconstrucciones de la temperatura anual para 4 de las regiones de Douglas para el periodo de 1920 hasta por lo menos el año 2000. Durante esta etapa se reconstruyeron las 18 regiones para temperatura y precipitación y las bases están disponibles en la página del CCA. La figura 2.3 muestra las reconstrucciones para la precipitación anual para 4 regiones de Douglas.

Para el escenario base (o de referencia) para estas regiones se utilizó el periodo 1961 –1990, utilizando las series reconstruidas.

²⁰ Gay, C., Estrada, F. Conde, C. Some implications of time series analysis for describing climatologic conditions and for forecasting. An illustrative case: Veracruz, Mexico. *Atmosfera*, **20**, 2, 147-170 (2007).

²¹ Spanos, A. and Mcguirk, A. Where do Statistical Models Come From? The Problem of Specification Uncertainty in Empirical Modeling. (Virginia Tech working paper, 2002); (available at <http://www.econ.ucy.ac.cy/seminars/Spanos.pdf>).

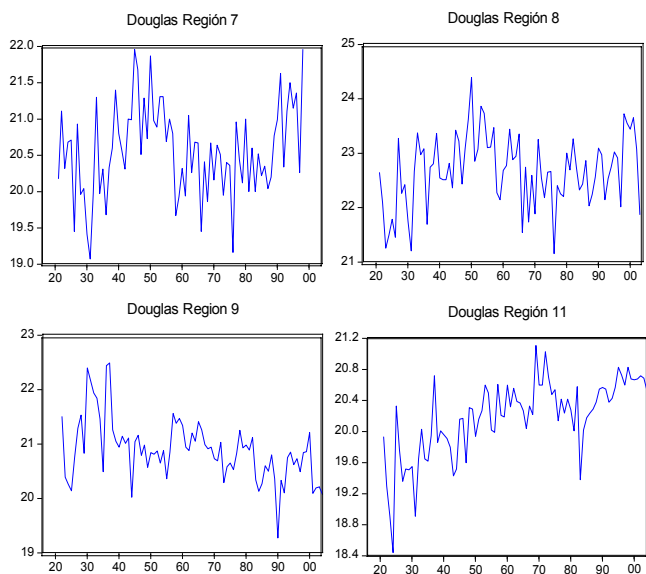


Figura 4.2. Reconstrucción de las series de temperatura para 4 regiones de Douglas

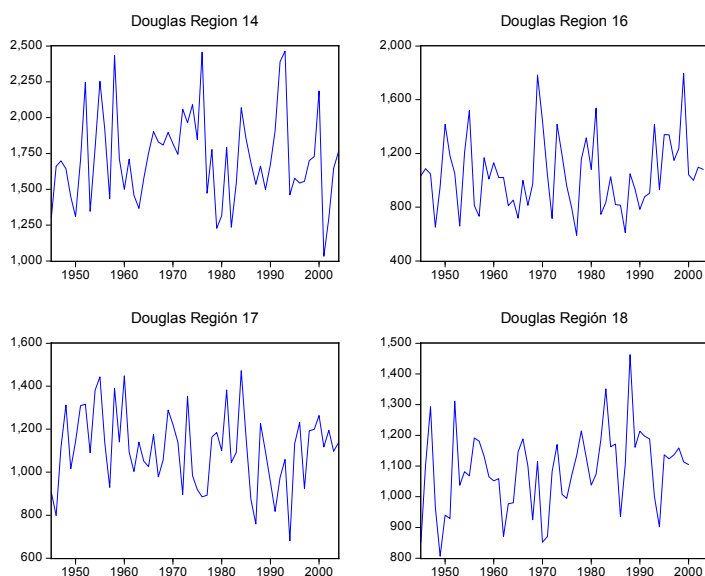


Figura 4.3. Reconstrucción de las series de precipitación para 4 regiones de Douglas

Agrupando las tendencias de temperatura, se observa que 9 regiones no presentan tendencias, 8 presentan tendencias positivas (tendencia al calentamiento) y 1 negativa (Estrada et al, 2008;figura 2.4). Las tendencias en

precipitación se están aún trabajando, pero estarán disponibles en la página del CCA.

Así, las reconstrucciones de Douglas muestran tendencias positivas en el norte y centro del país y muy marcadas en el noroeste del país. Las tendencias positivas más pequeñas en el lado del Pacífico (y enfriamiento en la región 9) que en el Atlántico. El análisis estadístico mostró evidencia sobre cambios estructurales en media o tendencia en 8 regiones (3, 7, 8, 10,11,13,14,16).

Tendencias anuales para las 18 regiones de Douglas

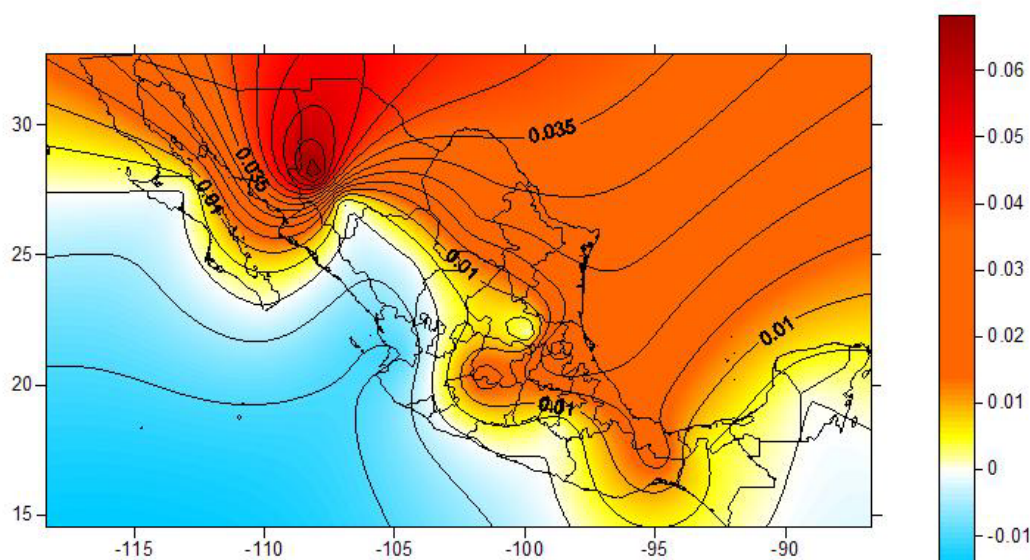


Figura 4.4. Tendencias anuales de temperatura para México, utilizando las 18 regiones de Douglas.

4.4 Escenarios de Cambio Climático para las Regiones de Douglas

Para la generación de escenarios de cambio climático correspondientes a las regiones de Douglas se utilizó la página <http://www.pacificclimate.org/tools/select>, del Pacific Climate Impacts Consortium (PICC), de Canadá, que es una herramienta gratuita.

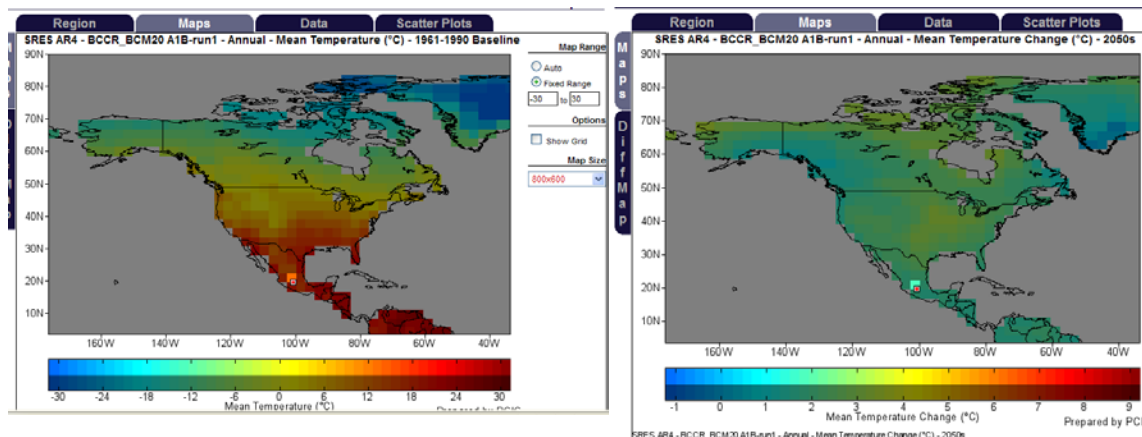
Con esta página es posible obtener todos los escenarios reportados en el 4AR para regiones específicas de México. La página permite establecer polígonos para regiones de interés.

Esta herramienta cuenta con lo siguiente:

- ❖ Define una región y genera mapas, gráficas y datos de ella.
- ❖ Los mapas generados muestran la región de uno o más GCM, mostrando la respectiva rejilla.
- ❖ Se genera una base de datos de la región para todos los GCM seleccionados, con la opción de desplegar los percentiles a través de ellos.
- ❖ Se puede graficar una variable contra otra para cada ensamble.
- ❖ Grafica la variable sobre un periodo de tiempo para cada ensamble.
- ❖ Despliega boxplot para cada climatología futura sobre cada ensamble

Así, la página citada nos permite seleccionar las regiones, construir mapas base (periodo 1961-1990), o mapas de cambio de las variables: Temperatura Media, Precipitación, Temperatura Máxima, Temperatura Mínima, Humedad Específica, Radiación Solar Incidente, Cubierta Nubosa, Humedad del Suelo, Presión Media a Nivel del Mar, Humedad Relativa, Temperatura de Superficie, Contenido de Humedad del Suelo, Profundidad de nivel, Altura Geopotencial, Derretimiento de Nieve.

También nos permite generar las bases de datos de los escenarios base y de cambio mensuales, estacionales o anuales. Por ejemplo, en las figuras 4.5a y 4.5b se presentan para la temperatura anual, los escenarios base y de cambio para el 2050s.



Figuras 4.5a. Escenario base para México. Temperatura Anual. **4.5b.** Escenario de Cambio Climático para 2050 para un AOGCM.

Para las 18 regiones de Douglas (figura 4.1) se utilizaron las coordenadas mostradas en la tabla 4.2, que están centradas en las regiones citadas.

Tabla 4.2. Regiones de Douglas (Conde, 2003)

Región	Latitud Promedio (N)	Longitud Promedio (W)	Estados del País
1	27.7	113.7	Baja California Norte Baja California Sur
2	23.9	110.7	Baja California Sur
3	29.0	109.8	Sonora
4	26.0	108	Sonora y Sinaloa
5	27.7	107	Chihuahua
6	25.0	104.5	Durango y Zacatecas
7	26.7	101.2	Coahuila y Nuevo León
8	24.9	99.2	Nuevo León y Tamaulipas
9	21.4	104.9	Nayarit y Jalisco
10	18.2	102.4	Colima y Guerrero
11	20.5	102.4	Jalisco, Guanajuato y Michoacán
12	21.2	99.7	San Luis Potosí, Distrito Federal, Hidalgo y Guanajuato
13	18.6	98.9	Morelos, Puebla y Guerrero
14	21.6	98.5	Tamaulipas San Luis Potosí, Hidalgo y Veracruz
15	18.4	96.4	Veracruz y

Región	Latitud Promedio (N)	Longitud Promedio (W)	Estados del País
			Oaxaca
16	16.3	94.8	Oaxaca
17	16.6	92.9	Chiapas
18	19.9	89.5	Campeche y Yucatán

4.3.1 Procedimiento

A continuación se describe la manera para obtener los datos de las salidas de los escenarios de emisión para cambio climático.

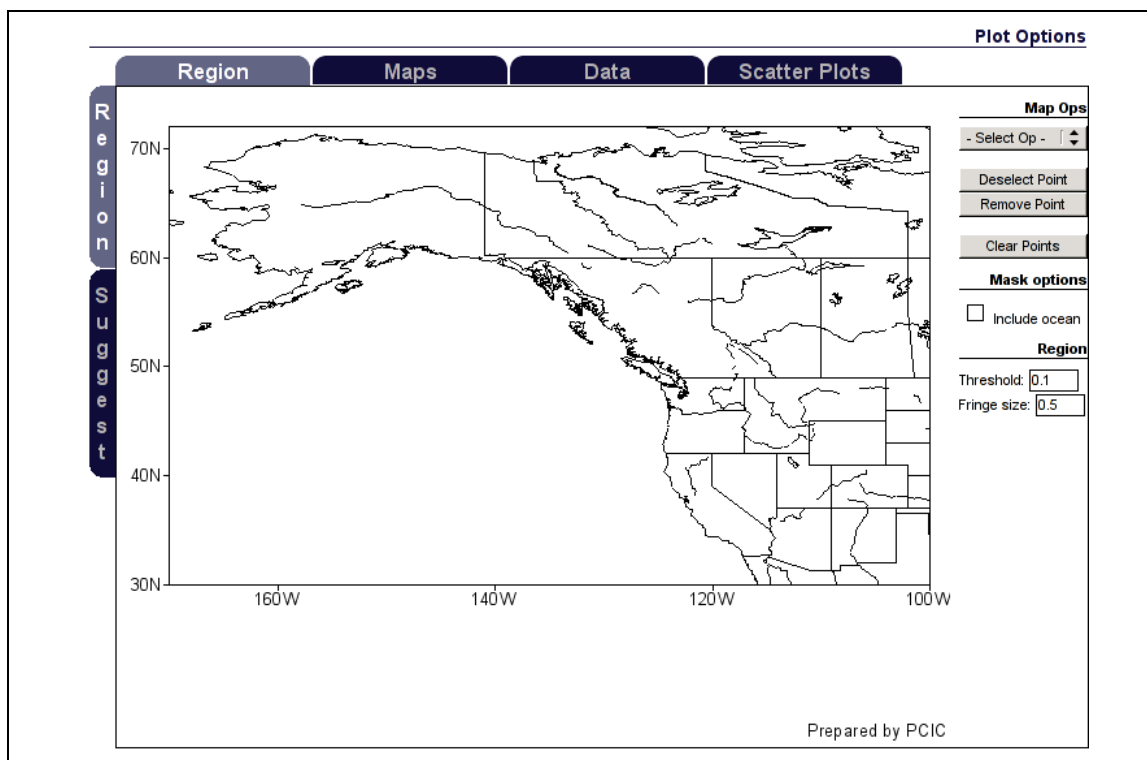
1. Se tiene que acceder a la pagina <http://pacificclimate.org/tools/select>, donde aparece la siguiente ventana:

PCIC Regional Analysis Tool:

VENTANA 1. DATA OPTIONS			
Data Options			
Experiment	CGCM3 A2-run4 (SRES AR4)	Variable	Mean Temperature
Timeslice	2050s	Time of Year	Annual

VENTANA 2. DISPLAY OPTIONS			
Display Options			
Window	PCIC Region	Region	--Entire Window--

VENTANA 3. PLOT OPTIONS



La ventana se divide en tres partes: En la primera se seleccionan las características del análisis a realizar (experimento, horizonte de tiempo, variable, e intervalo de tiempo – mes, estacional, anual). En la segunda se selecciona alguna región (de Canadá, Norteamérica, el mundo). En la tercera ventana se selecciona de manera manual un punto o una región de México. En esta ultima parte se despliegan los resultados.

Ejemplo:

2. “Ventana 1: Data Options” Seleccionar el experimento deseado, aunque se pueden incluir todos los utilizados en el cuarto reporte del IPCC; la variable, el horizonte y la escala de tiempo.

Experiment

Variable

Timeslice

Time of Year

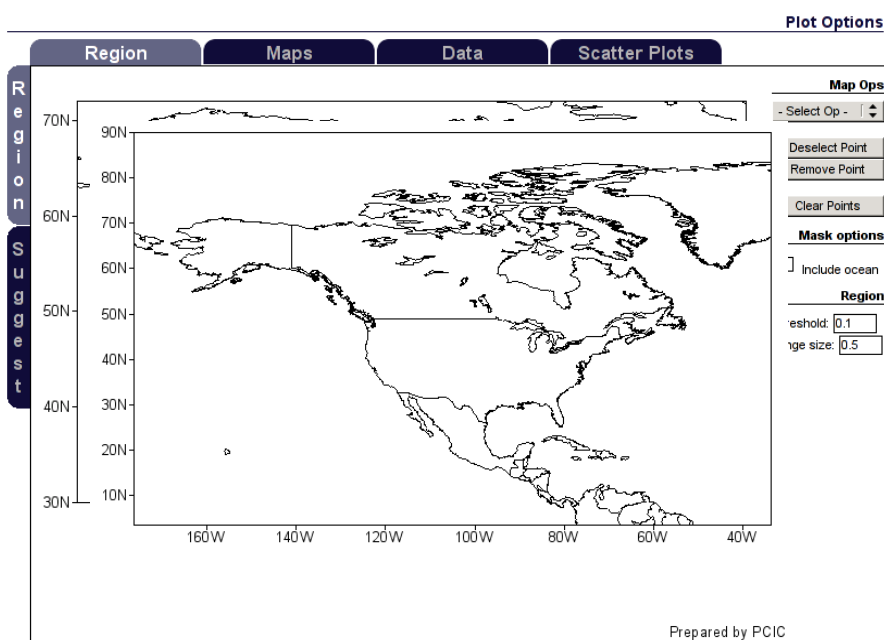
3. Ventana 2: “Display Options” Seleccionar Norte América y que despliegue toda la ventana.

Window

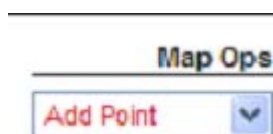
Region

Una vez que se realizó la selección debe darse clic en el boton “**Update**”.

4. Ventana 3: Posteriormente aparece el siguiente mapa:

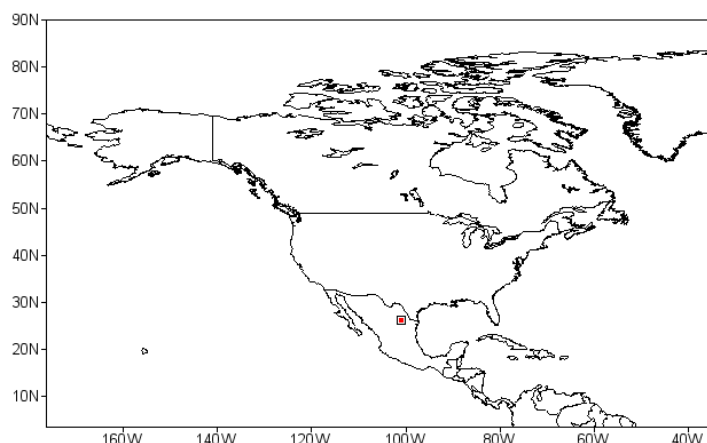


- 4.1. En la columna derecha donde dice “Map Ops” seleccionar “Select Op” y elegir “**Add Point**” para agregar un punto en la región.



Posteriormente, posicionar el cursor en la región deseada y hacer clic. Se añade entonces en el mapa el punto correspondiente a la región

deseada. En el mapa aparecerá el punto seleccionado, en este caso la Región 7:



Prepared by PCIC

Nota: es posible que al momento de seleccionar la región, la latitud y longitud no sea exacta, debido a que el país está dividido en pequeños cuadros, en tal caso se debe primero retirar ese punto erróneo (con Remove Point) y seleccionar uno nuevo.

También es posible agregar en el mapa una región, añadiendo no un punto sino varios de ellos, que se unirán como se muestra en la figura:



Nota: Hay que recordar que México es un país con una orografía accidentada. Así, se debe tener cuidado de no pedir que el programa promedie una región con muy diferentes altitudes.

5. En el lado izquierdo se muestran tres pestañas, elegir la que dice "Scatter Plot", para obtener las gráficas de las salidas del ensamble. Las gráficas generadas son Boxplot, Timeslices y Variable, de las cuales también se pueden descargar los datos.

Boxplot: Proporciona el boxplot correspondiente para la selección.

Timeslices: Muestra una grafica de la salida de todos los escenarios para la variable y el horizonte elegido. Podemos seleccionar otra variable para compararla con la anteriormente elegida.

Las gráficas y bases de datos correspondientes que pueden entonces obtenerse corresponden a:

1. Box-Plots (gráficas de caja). Figura 4.6 como ejemplo
2. Timeslices (u horizontes). Figura 4.7, como ejemplo
3. Variables en gráfica XY. Figura 4.8, como ejemplo.

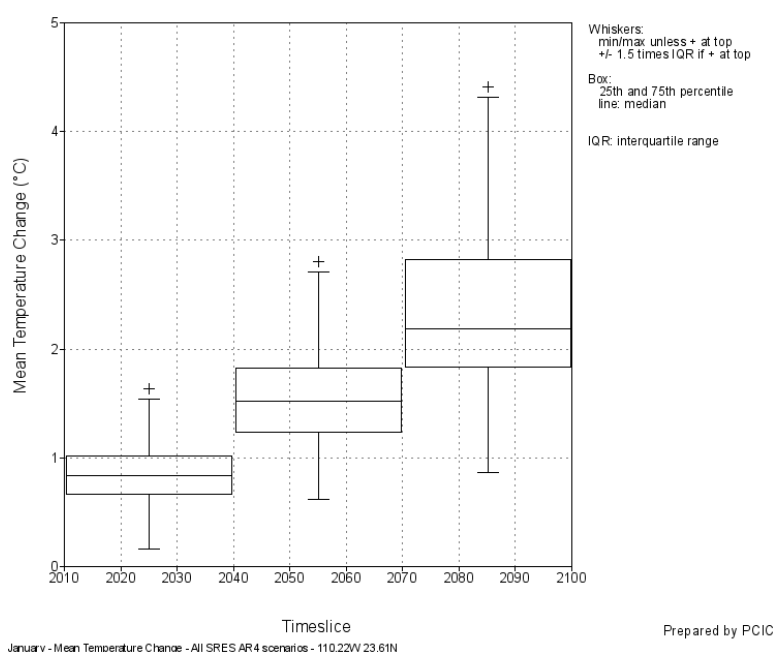


Figura 4.6. Escenarios de cambio climático para la región 2 de Douglas (ver figura 4.1) en forma de “box plot” para el mes de enero, horizontes 2020, 2050 y 2080. Se obtuvieron los valores de la mediana y el rango intercuartílico, además de los valores extremos, para todos los modelos y escenarios de emisiones.

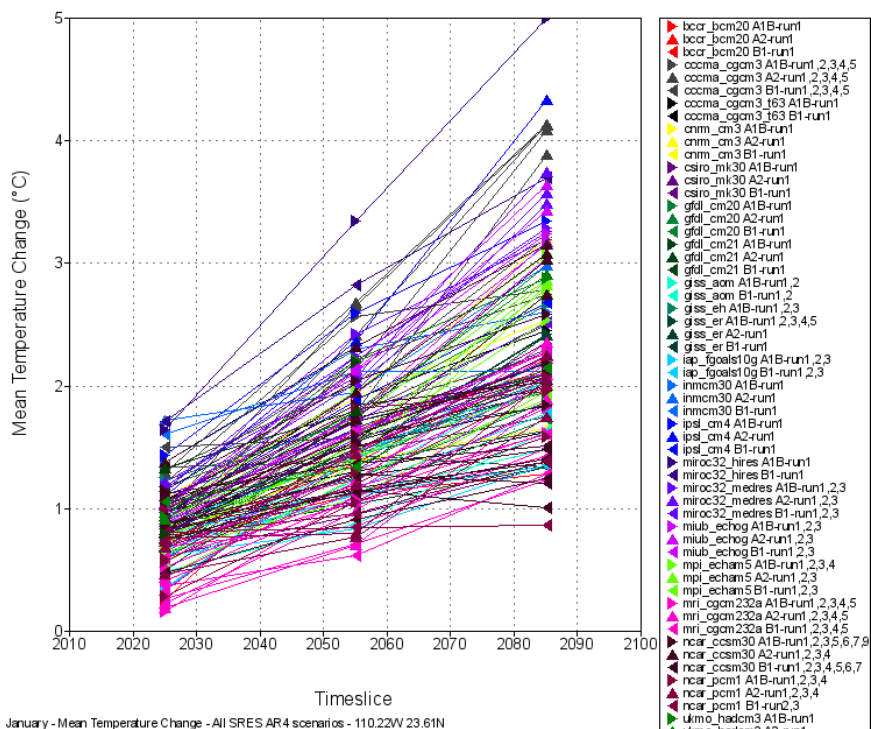


Figura 4.7. Escenarios de cambio climático para la región 2 de Douglas (ver figura 4.1) en forma de “box plot” para el mes de enero, horizontes 2020, 2050 y 2080.

Para descargar los datos dar un clic en la opción “CVS data”, el archivo que se guarda es *.cvs que posteriormente lo podemos guardar como *.xls. Se recomienda descargar los datos de las gráficas correspondientes a “Variable”, ya que en este archivo aparecen las anomalías de las variables seleccionadas.

Experiment	Longitude	Latitude	Prec.	temp
bccr_bcm20 A1B-run1	-101.25	26.51	-15.830961	2.021057
bccr_bcm20 A2-run1	-101.25	26.51	-5.910538	1.956726
bccr_bcm20 B1-run1	-101.25	26.51	-7.159647	1.76062
cccma_cgcm3 A1B-run1	-101.25	27.83	6.397954	2.528381
cccma_cgcm3 A1B-run2	-101.25	27.83	26.078749	2.293793
cccma_cgcm3 A1B-run3	-101.25	27.83	9.34688	2.251495
cccma_cgcm3 A1B-run4	-101.25	27.83	-9.485442	2.578308
cccma_cgcm3 A1B-run5	-101.25	27.83	24.195547	2.408295
cccma_cgcm3 A2-run1	-101.25	27.83	20.930283	2.578247

- Si el horizonte deseado no se encuentra en la selección proporcionada, se puede hacer una interpolación, ya que esta herramienta cuenta con los horizontes 2020, 2050 y 2080. En nuestro caso se hizo la interpolación para obtener los datos del horizonte 2030.

5. Fuentes de Información para Generar Escenarios de Cambio Climático II. Creación de escenarios de cambio climático utilizando el *Climate Explorer* del RNMI.

Introducción

El *Climate Explorer* del *The Royal Netherlands Meteorological Institute* (RNMI) es un sitio de internet mantenido por el Instituto Meteorológico Holandés que provee, de forma gratuita, información climática observada, bases de datos de reanálisis, así como escenarios de cambio climático, a nivel mundial, regional y local. A través de esta herramienta se pueden acceder diversas bases de datos sobre:

- ❖ Información observada diaria, mensual y anual proveniente de estaciones meteorológicas ubicadas alrededor del mundo
- ❖ Índices climáticos diarios, mensuales y anuales
- ❖ Campos observados cada seis horas
- ❖ Reanálisis y reconstrucciones históricas para distintos campos
- ❖ Pronósticos estacionales
- ❖ Escenarios de cambio climático mensuales y anuales

Este sitio, además, ofrece diversas opciones en línea para graficar, crear mapas en *GrADS*, hacer análisis estadísticos descriptivos, comparar con otras series, realizar correlaciones espaciales y entre variables, así como obtener su descomposición en componentes principales. Todos los mapas y figuras pueden ser exportados en eps y/o en pdf, mientras que las series de datos pueden ser exportadas en txt y pueden ser fácilmente leídas y editadas en *WordPad*, *Excel*, *Matlab*, entre otros.

Generación de escenarios de cambio climático usando el *Climate Explorer*

El primer paso para la utilización del *Climate Explorer* (Fig. 5.1) consiste en elegir una de las opciones de datos climáticos que se encuentran en el menú de la página de inicio. Estas opciones se muestran en la Figura 1 marcadas con un cuadro rojo.

La opción de *Monthly scenario runs* permite acceder las bases de datos correspondientes a los escenarios utilizados en los Tercer y Cuarto Reportes de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), así como los correspondientes a los experimentos PRUDENCE y ENSEMBLES.

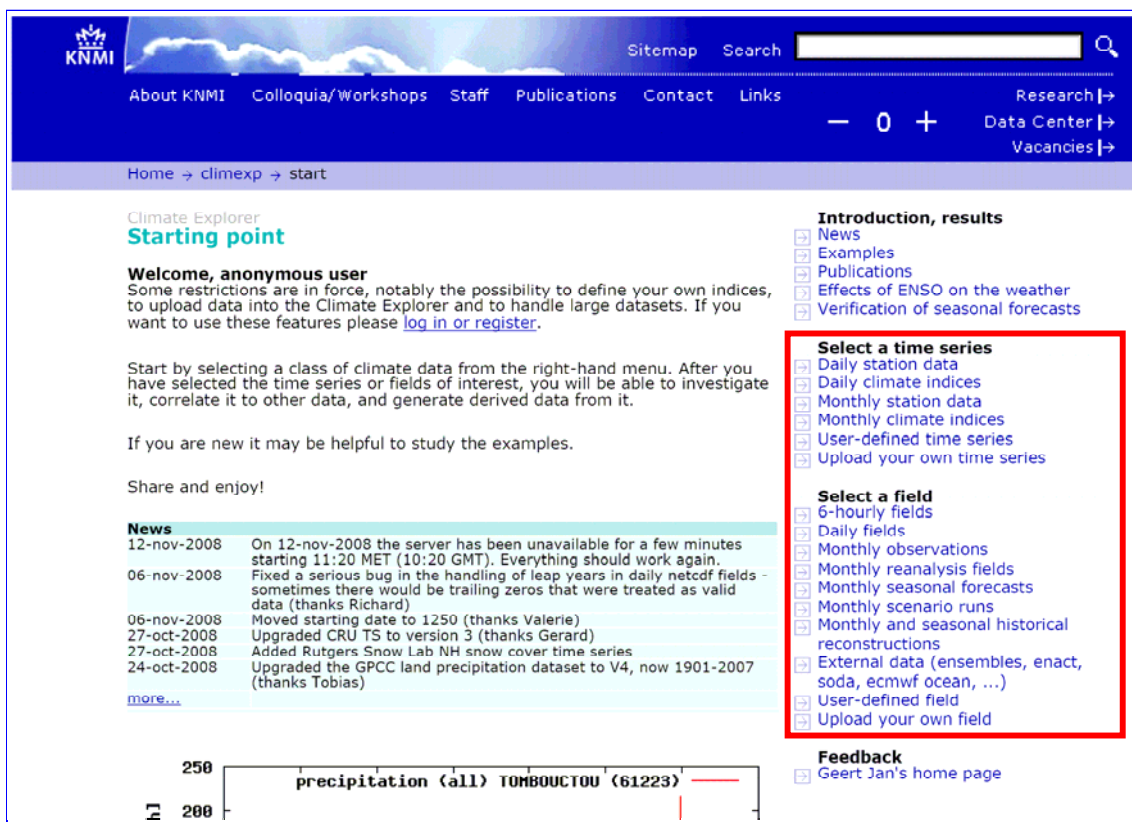


Figura 5.1. Página principal del *Climate Explorer* del RNMI.

La Tabla 5.1 muestra los modelos y escenarios de emisiones / experimentos disponibles en la sección que corresponde al AR4 del IPCC en el *Climate Explorer*. Los escenarios de emisiones y experimentos incluidos son: experimentos bajo concentraciones pre-industriales (picntrl), reproducción del clima del siglo XX (20c3m), aumentos de uno por ciento anual en las concentraciones de CO₂ hasta alcanzar el doblamiento o cuadruplicado de las concentraciones pre-industriales (1pctto2x, 1pctto4x), y los escenarios de emisiones del *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES; IPCC, 2001) A1B, A2 y B1. Es importante notar que no todos los modelos tienen simulaciones para cada uno de los escenarios/experimentos antes mencionados.

Así mismo, dependiendo de la combinación de modelo-escenario de emisiones puede existir información sobre las siguientes variables: temperatura superficial del aire (tas), precipitación total acumulada (pr), presión del nivel del mar (psl), esfuerzo del viento zonal en superficie (tx), esfuerzo del viento meridional en superficie (ty), temperatura superficial del mar (tos,sst), altura geopotencial (z500), elevación media del mar (zos), cambio promedio global del nivel del mar (zosga), cambio del promedio global del nivel medio del mar debido a expansión térmica (zostoga), temperatura a diferentes alturas (presiones) (t925, t850, t700, t500, t300).

En este sitio también se pueden acceder bases de datos de los escenarios de cambio climático utilizados en el Tercer Reporte de Evaluación del IPCC generados con los modelos HADCM3, ECHAM4, NCAR-CSM y GFDL y los escenarios de emisiones A2 y B2.

Tabla 5.1. Modelos y escenarios de emisiones / experimentos disponibles, utilizados en el AR4 del IPCC.

Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4)	
Modelos	Escenarios de Emisiones/Experimento
BCC CM1	20c3m (4 simulaciones)
BCCR BCM2.0	20c3m (1 simulación) SRES A1B (1 simulación)

Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4)	
Modelos	Escenarios de Emisiones/Experimento
CGCM3.1 (T47)	20c3m (5 simulaciones) SRES A1B (5 simulaciones) SRES A2 (1 simulación) SRES B1 (5 simulaciones) 1pcttonx (1 simulación)
CGCM3.1 (T63)	20c3m (1 simulación) SRES A1B (1 simulación) SRES B1 (1 simulación)
CNRM CM3	20c3m (1 simulación) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación)
CSIRO Mk3.0	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación)
CSIRO Mk3.5	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (1 simulación)
GFDL CM2.0	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación)
GFDL CM2.1	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación) SRES B1 (1 simulación) 1pctto4x (1 simulación)
GISS AOM	20c3m (2 simulaciones) SRES A1B (2 simulaciones)
GISS EH	20c3m (5 simulaciones) SRES A1B (3 simulaciones) 1pctto2x (1 simulación)
GISS ER	20c3m (9 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación)
FGOALS g1.0	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (3 simulaciones)
INGV ECHAM4	20c3m (1 simulación) SRES A1B (1 simulación)
INM CM3.0	20c3m (1 simulación) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación)
IPSL CM4	20c3m (1 simulación) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación)
MIROC3.2 (hires)	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES B1 (1 simulación) 1pctto2x (1 simulación)
Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4)	
Modelos	Escenarios de Emisiones/Experimento

MIROC3.2 (medres)	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (3 simulaciones) SRES A2 (3 simulaciones) SRES B1 (3 simulaciones) 1pctto4x (3 simulaciones)
ECHO G	20c3m (5 simulaciones) SRES A1B (3 simulaciones) SRES A2 (3 simulaciones) SRES B1 (3 simulaciones)
ECHAM5/ MPI- OM	20c3m (3 simulaciones) SRES A1B (3 simulaciones) SRES A2 (3 simulaciones) SRES B1 (3 simulaciones) picntrl (1 simulación) 1pctto2x (3 simulaciones) 1pctto4x (1 simulación)
MRI CGCM 2.3.2	20c3m (5 simulaciones) SRES A1B (5 simulaciones) SRES A2 (5 simulaciones)
MRI/JMA TL959L60	20c3m (1 simulación, 10 años) SRES A1B (1 simulación, 10 años)
CCSM3.0	20c3m (6 simulaciones) SRES A2 (5 simulaciones)
PCM	20c3m (2 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación)
UKMO HadCM3	20c3m (2 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación) SRES B1 (1 simulación)
HadCM3 QUMP	SRES A1B (17 simulaciones)
UKMO HadGEM1	20c3m (2 simulaciones) SRES A1B (1 simulación) SRES A2 (1 simulación) picntrl (1 simulación) 1pctto2x (1 simulación)

Para la construcción de un escenario de cambio climático utilizando el *Climate Explorer* se debe elegir, en primer lugar, un modelo y un escenario de emisiones, así como la variable de interés. Como ejemplo, supongamos que se desea crear un escenario de cambio climático con el modelo CGCM3.1 (T63) y el escenario de emisiones A1B para la temperatura superficial del aire (tas). Como se muestra en la Figura 5.2, el acceder a la base de datos correspondiente consiste simplemente en seleccionar la opción del modelo/escenario/variable y pulsar el botón de “Select field”. La página del *Climate Explorer* (ver Figura 5.2) sigue el formato que se

describe a continuación: la primera columna contiene el nombre del modelo; la segunda el experimento, es decir, los escenarios de emisiones que están disponible para cada modelo; la tercera el número de simulaciones que existen para esa combinación de modelo/escenario de emisiones y; las siguientes columnas muestran las variables disponibles para dicha combinación.

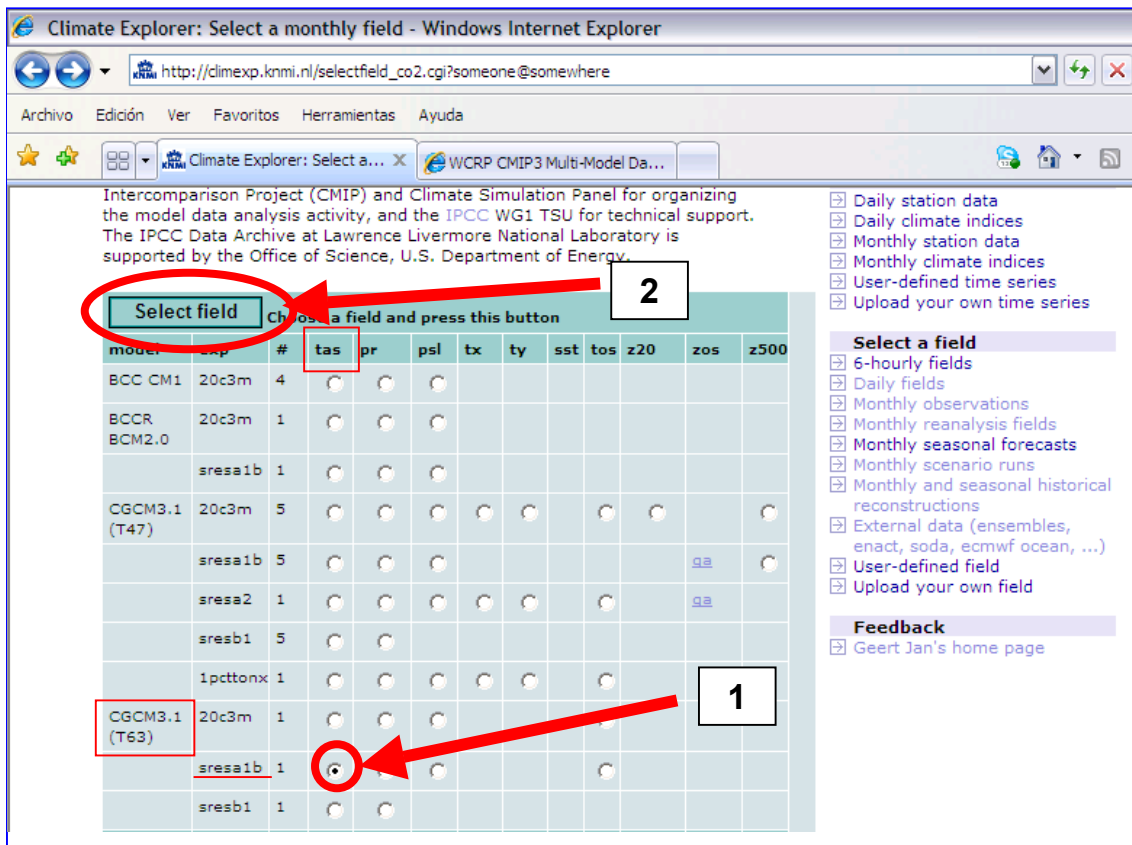


Figura 5.2. Accediendo a las bases de datos para los modelos, escenarios de emisiones y variables disponibles.

Una vez que se ha realizado la operación descrita en la Figura 2, el *Climate Explorer* ofrece una gran cantidad de opciones para acceder y visualizar la información. Como un primer resultado, la página nos muestra información básica sobre la base de datos (Figura 5.3): el modelo y corrida utilizados; la descripción de la malla y tamaño de cuadro; el periodo de tiempo para el que se tiene información y su frecuencia (en este caso mensual desde enero de 1850 hasta diciembre de 2300); el nombre de la variable de interés y sus unidades de medida (en este caso temperatura superficial del aire (tas) medida en grados Kelvin); e indica si existe o no una máscara tierra/océano disponible.

```

Climate Explorer
Field
cccma_cgcm3.1_t63_sresa1b_tas

CCCma model output prepared for IPCC Fourth Assessment climate of the
20th Century experiment (20C3M)
X axis: whole world in 128 2.81° steps, first point at 0.00° E
Y axis: irregular grid of 64 points at -87.86 -85.10 -82.31 -79.53 -76.74 -73.95
-71.16 -68.37 -65.58 -62.79 -60.00 -57.21 -54.42 -51.63 -48.84 -46.04 -43.25
-40.46 -37.67 -34.88 -32.09 -29.30 -26.51 -23.72 -20.93 -18.14 -15.35 -12.56
-9.77 -6.98 -4.19 -1.40 1.40 4.19 6.98 9.77 12.56 15.35 18.14 20.93 23.72
26.51 29.30 32.09 34.88 37.67 40.46 43.25 46.04 48.84 51.63 54.42 57.21
60.00 62.79 65.58 68.37 71.16 73.95 76.74 79.53 82.31 85.10 87.86
Z at 0.00
Monthly data available from Jan1850 to Dec2300 (5412 months)
Variable tas (Surface Air Temperature) in K
The associated land/sea mask is available for some operations
    
```

Figura 5.3. Descripción de la base de datos escogida.

Adicionalmente, el *Climate Explorer* muestra un menú para la extracción de las series de tiempo en el que se pueden determinar aspectos como: la región geográfica o punto deseado; si se desea interpolar entre los puntos; si se desea obtener una serie de tiempo del promedio para la región o recuperar todas las series correspondientes a los puntos que se encuentran dentro de dicha región; escoger solo puntos en tierra, en océano o ambos; y transformar las unidades a grados centígrados.

La Figura 5.4 muestra cómo acceder a la serie de tiempo promedio para una región que abarca México, considerando tanto puntos en tierra como en el océano y convertida a grados centígrados. Para este ejemplo, se tomaron las coordenadas de México entre las latitudes 14.54 a 32.72 norte y las longitudes -118.4 a -86.71 este. Las Figuras 5.5 muestra la gráfica de series de tiempo de la salida del modelo (panel a), el ciclo anual mostrado por los datos (panel b), y la serie de tiempo en anomalías con respecto a el ciclo anual y una climatología base (panel c)²². Cada una de estas gráficas puede ser exportada, y los datos correspondientes pueden ser obtenidos en formato txt (panel d).

²² La climatología base puede ser definida por el usuario. Por *default* el sistema utiliza la climatología 1971-2000.

Extract timeseries

latitude: °N - °N (leave second field blank for one point)

longitude: °E - °E

boundaries: ▾

make: average set of grid points

considering: everything only land points only sea points

units: convert to Celsius leave in K

Make time series

Figura 5.4. Menú para la extracción de los escenarios de cambio climático como series de tiempo.

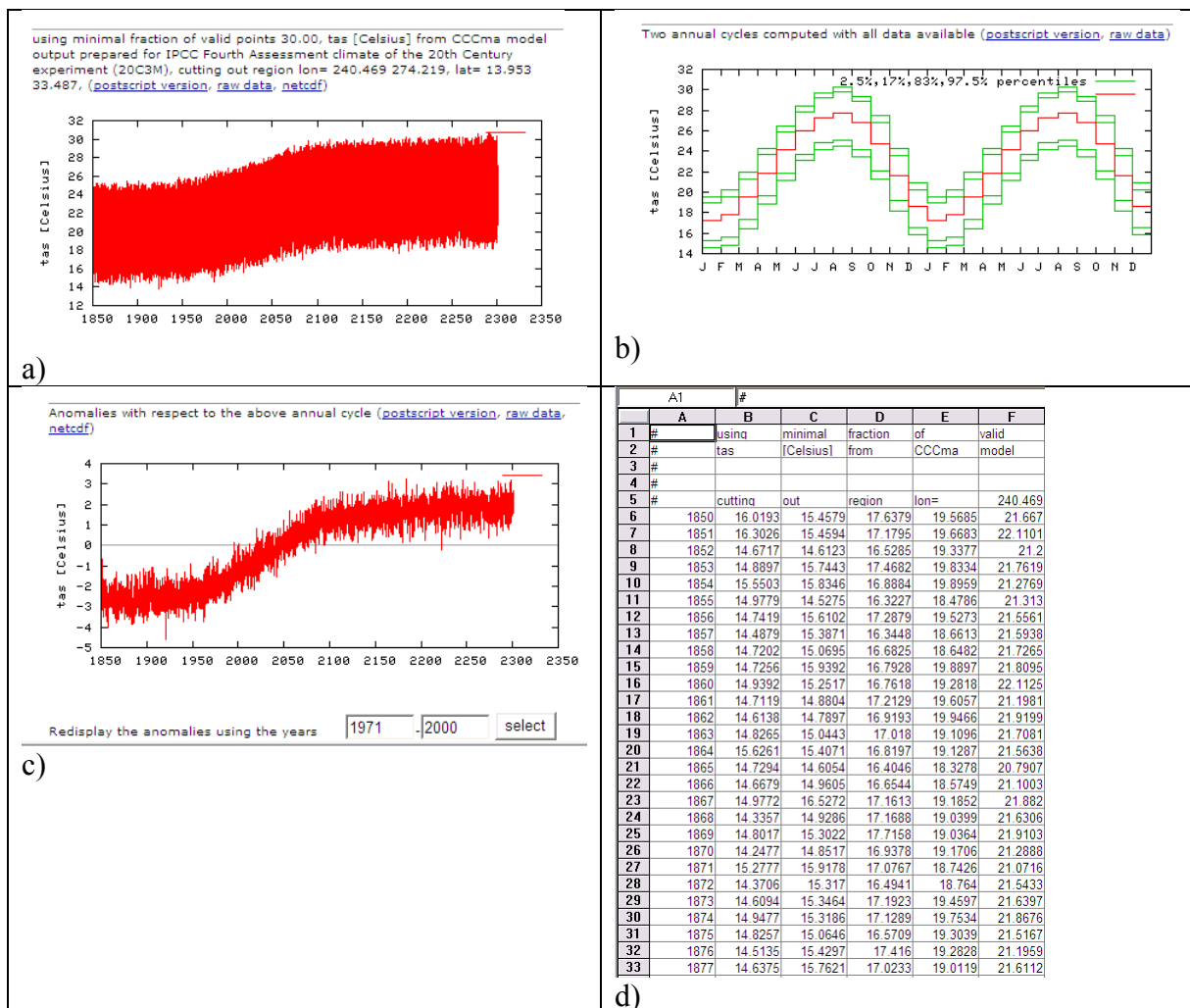


Figura 5.5. Escenarios de cambio climático en forma de series de tiempo utilizando el modelo CGCM3.1 (T63) y el escenario de emisiones A1B, para la temperatura superficial del aire (tas)

Adicionalmente, con esta herramienta resulta muy sencillo crear mapas para visualizar los escenarios de cambio climático. El menú inferior derecho de esa

misma página (Figura 5.6) ofrece varias opciones para realizar algunos análisis a la serie de tiempo y para producir mapas en *GrADS*. Como ejemplo, para visualizar la evolución por mes de la temperatura superficial del aire durante el periodo 1850-2300 basta con seleccionar la opción “*View per month*” ubicada en dicho menú. Como se muestra en las Figuras 5.7, al pulsar esta opción se obtiene una gráfica para cada mes y la posibilidad de guardar los datos en un archivo txt.

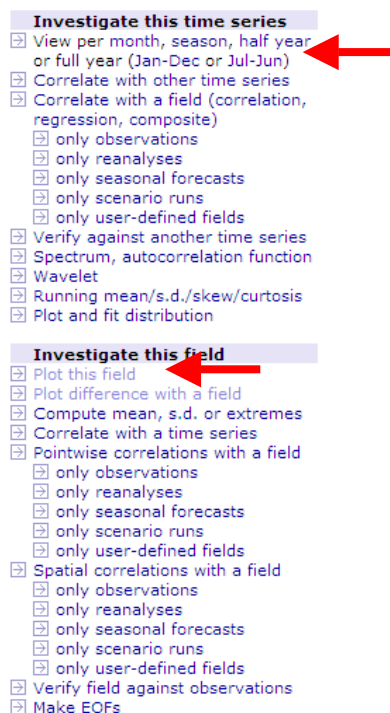


Figura 5.6. Menú de opciones para analizar la serie de tiempo y el campo consultado

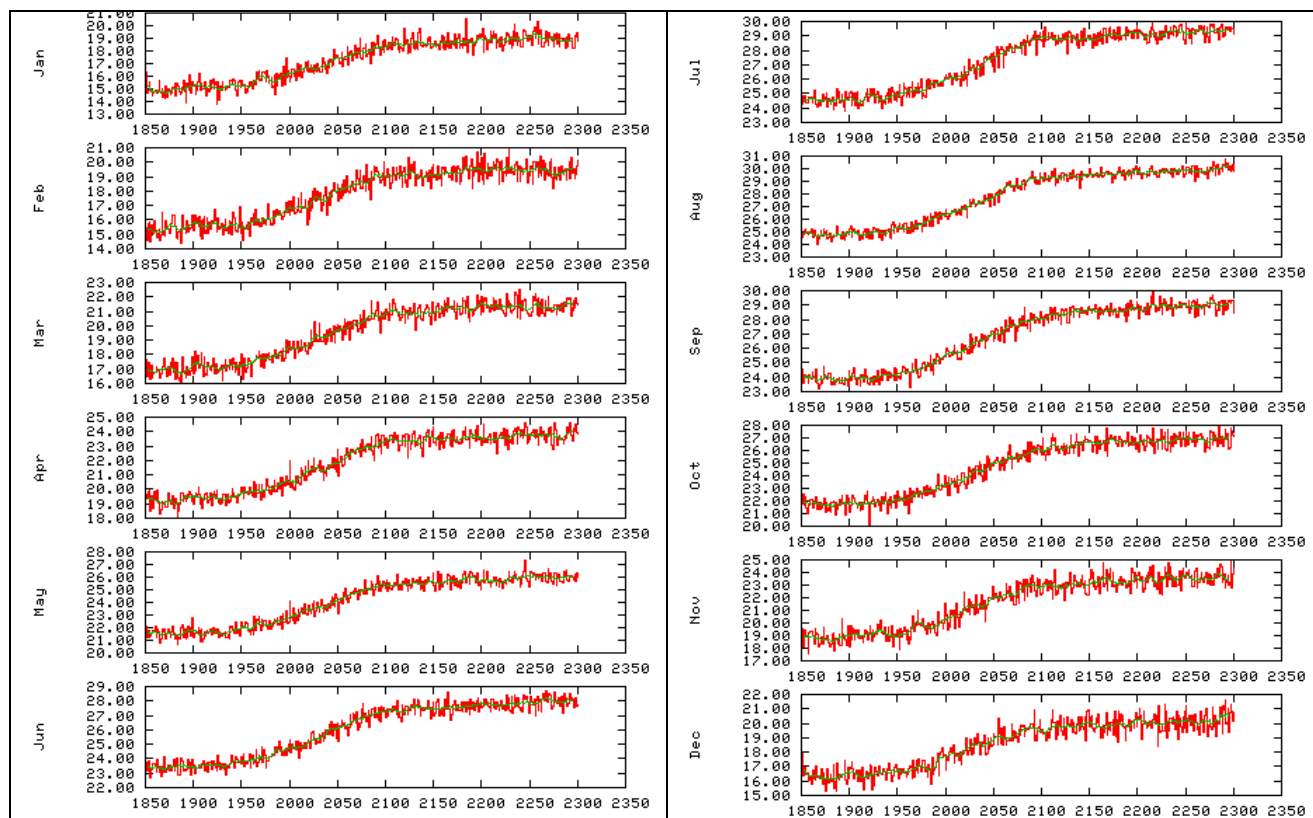
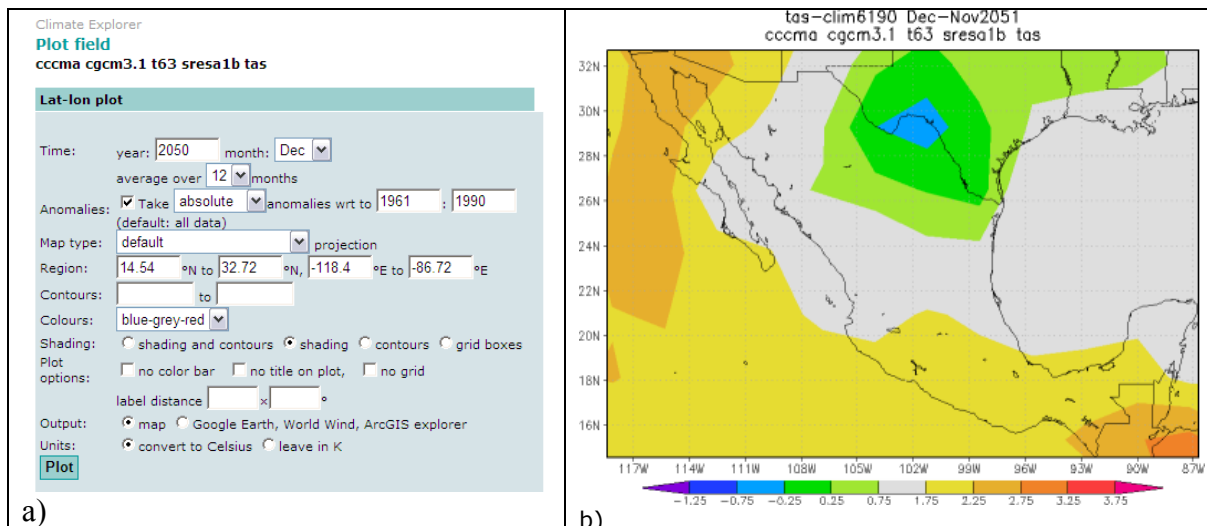


Figura 5.7. Series de tiempo mensuales de temperatura superficial del aire correspondientes al escenario de cambio climático del modelo CGCM3.1 (T63) y el escenario de emisiones A1B

La Figura 5.8b provee un ejemplo sobre las capacidades del *Climate Explorer* para generar mapas en *GrADS* con sólo llenar un sencillo formulario (Figura 5.8a). Este formulario consiste en el año y mes de interés, el periodo de meses a ser promediados, el periodo correspondiente a la climatología base a partir de la cual serán calculadas las anomalías, las opciones del gráfico en cuanto a colores, formatos, tipo de proyección y unidades, y el tipo de archivo de salida (mapa, archivo de *Google Earth* o archivo de *ArcGIS*).



Figuras 5.8. 5.8a). Formulario... 5.8b) Mapa generado con GRADS.

5. Guía para el uso de MAGICC/SCENGEN 5.3 V.2.

Introducción

El software MAGICC/SCENGEN 5.3 V.2, (Thomas Wigley wigley@ucar.edu) es un recurso disponible en Internet (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/>) que permite elaborar escenarios de cambio climático para temperatura media, precipitación y, solamente en la versión 5.3, presión. Adicionalmente se usa para tener acceso a los resultados de modelos del clima, bases de datos observados y con propósitos educativos.

Se compone de 2 módulos:

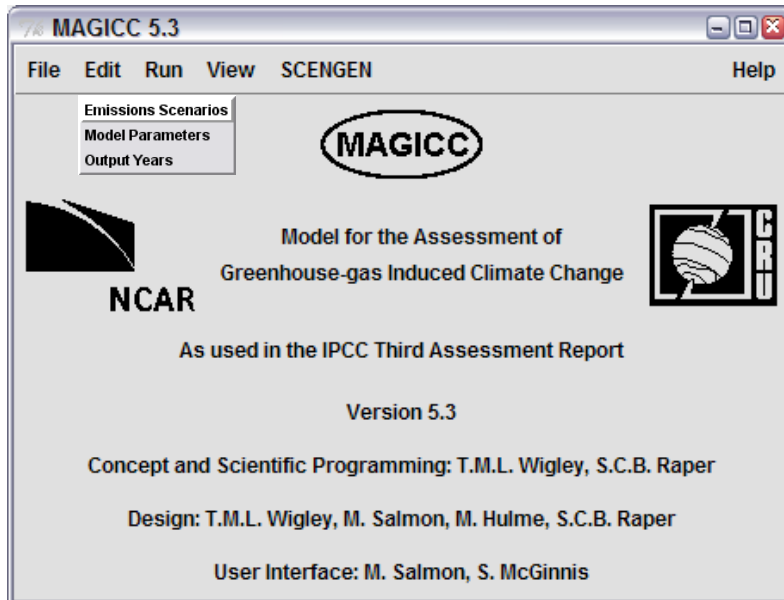
MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) es en realidad un modelo simple de la temperatura global y el incremento en el nivel del mar que fundamentalmente produce proyecciones de la temperatura media global y ha sido usado en los reportes del IPCC.

SCENGEN (SCENario GENERator) que usa las salidas producidas por Magicc para generar mapas con detalles regionales del clima futuro y usa patrones de escala para escoger los modelos de circulación general (GCM) adecuados de entre unos 20 modelos.

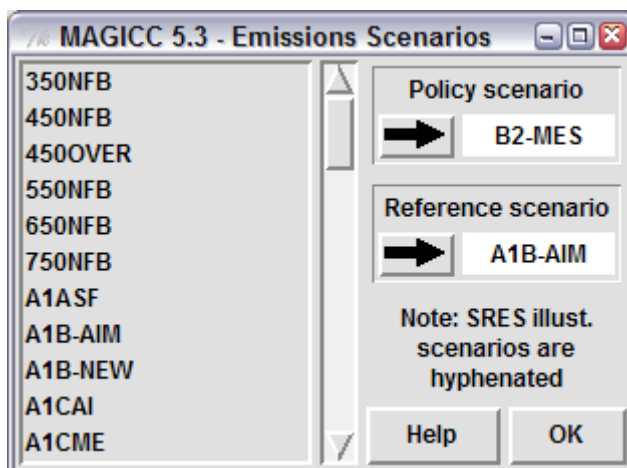
Magicc/Scengen permite al usuario seleccionar los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, de acuerdo a IPCC SRES, dentro de una gran variedad que incluye todos los escenarios de las 4 familias (A1, A2, B1, B2), además de las series de escenarios de estabilización NFB y WRE. También se puede seleccionar la concentración de CO₂, el factor de sensibilidad climática, entre otros parámetros.

¿Cómo se generan los escenarios?

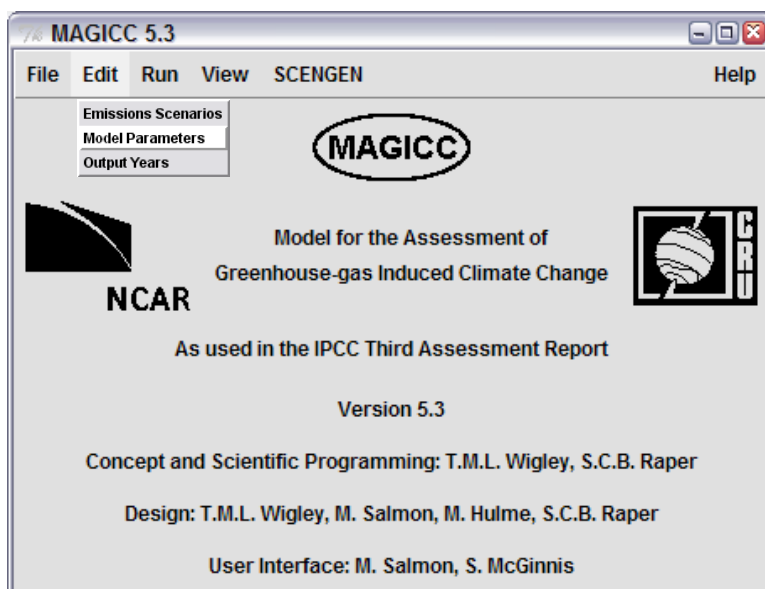
- 1) Descargar el archivo SG53.zip que contiene el software (unos 170MB) de la página web: <http://www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/> y descomprimirlo en el directorio raíz C:\
- 2) Ejecutar el archivo magicc.exe localizado en C:\SG53\SCEN-53\magicc\ (se puede enviar al escritorio por medio de un acceso directo).
- 3) Seleccionar la opción **Edit > Emissions Scenarios**:

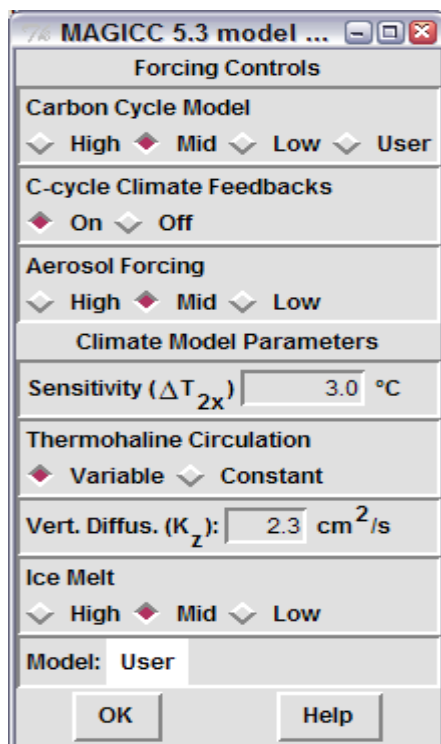


- 4) Seleccione los escenarios de referencia y de política, **B2-MES** y **A1B-AIM**, por ejemplo:

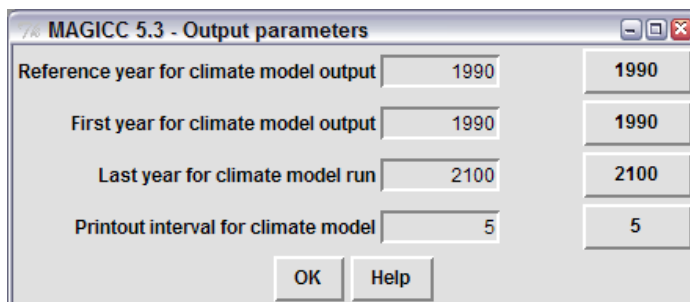


5) Escoger ahora **Model Parameters** y seleccionar las opciones deseadas:

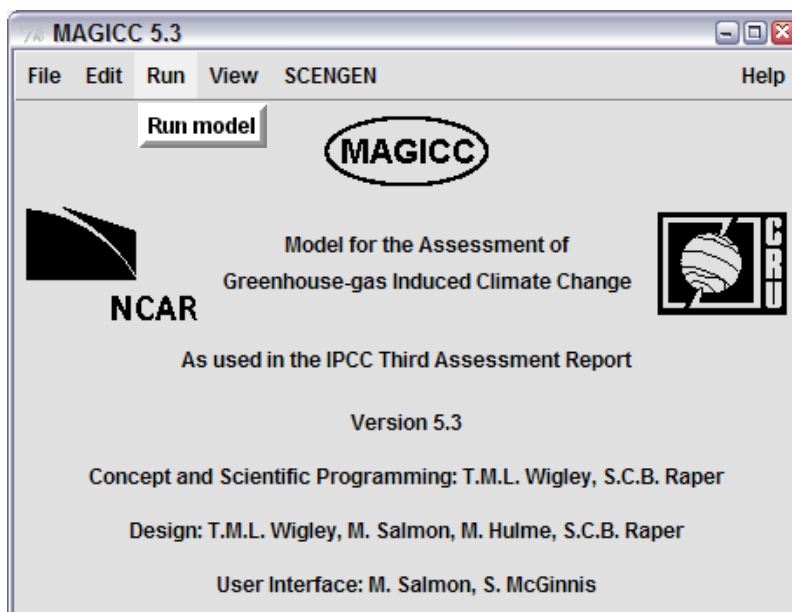




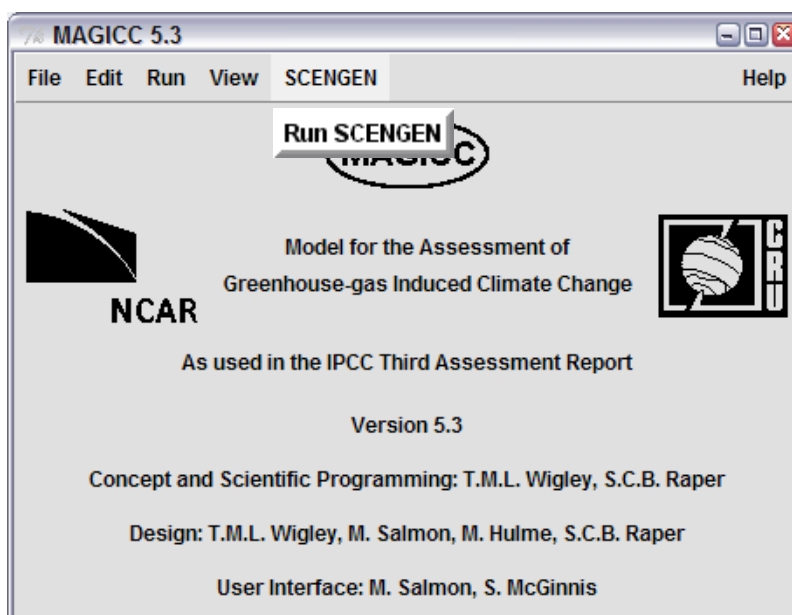
6) Seleccionar del submenú **Output years** los años e intervalos de la proyección:



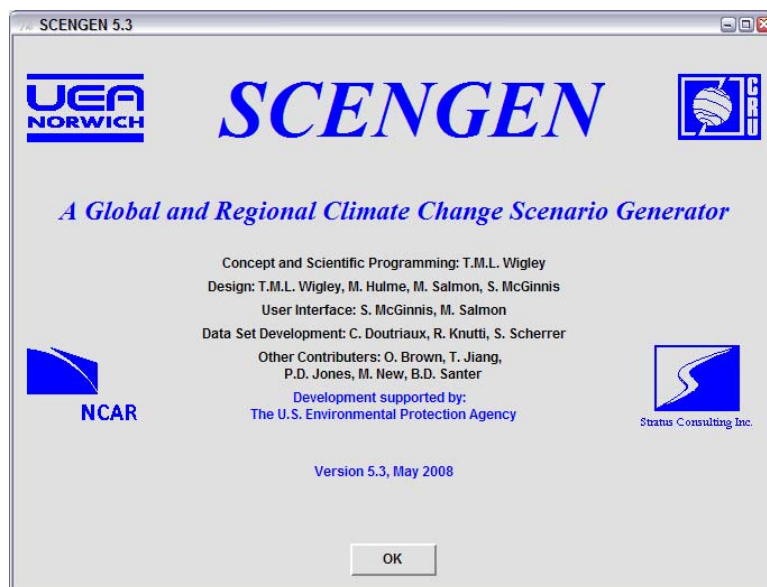
7) Ejecute la opción **Run Model** (tarda varios segundos):



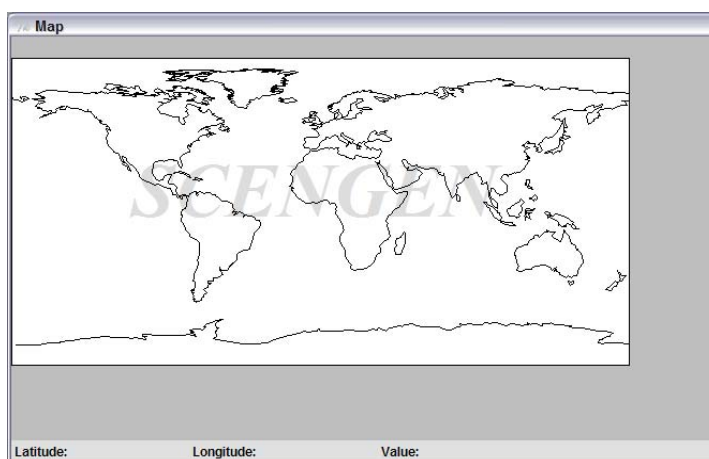
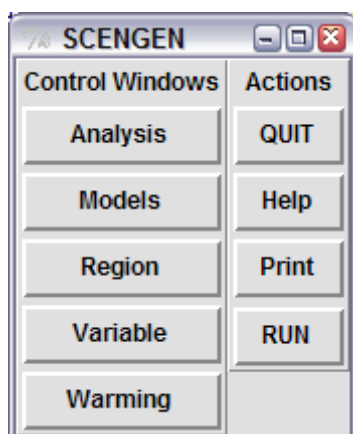
8) Ejecutar **SCENGEN**:



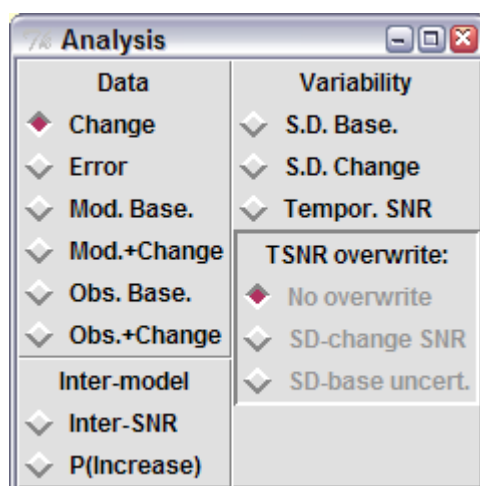
9) Y luego **OK**:



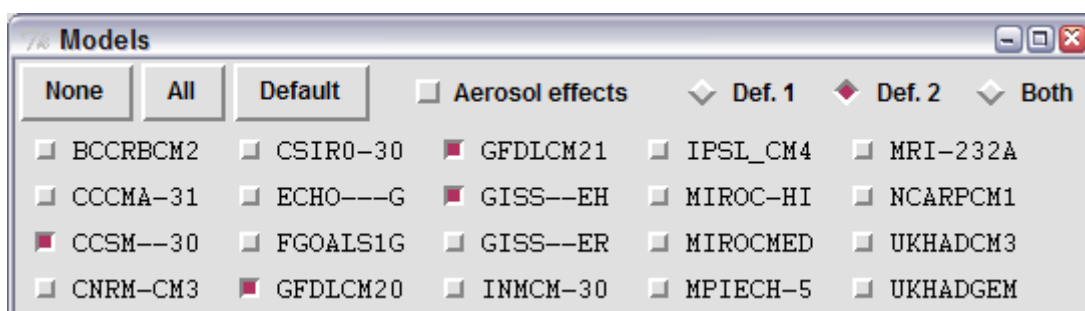
Aparecen dos ventanas, en la primera se seleccionan los parámetros que habrá de mostrar el mapa de la segunda:



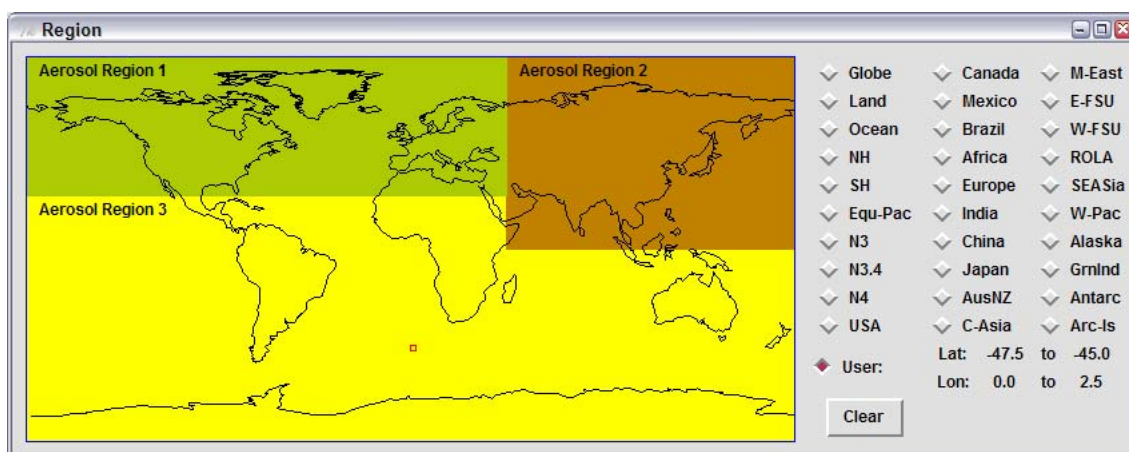
10) En el submenú **Analysis** se escoge el tipo de datos que se desea mostrar en el mapa, cambio (o incremento), error, escenario base de un modelo (GCM), modelo más incremento, base observado, observado más cambio, etc. Por ejemplo:



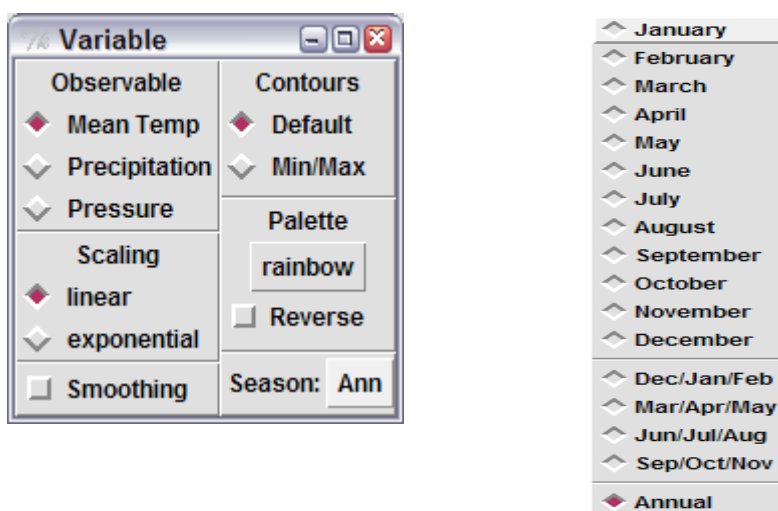
11) En el submenú **Models** se selecciona el o los modelos cuyas salidas se desea mostrar en el mapa:



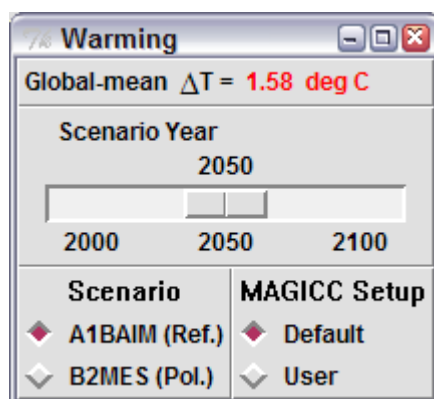
12) Seleccione la **Region** de estudio, pueden usarse coordenadas (SCENGEN aplica a todo el globo de cualquier forma):



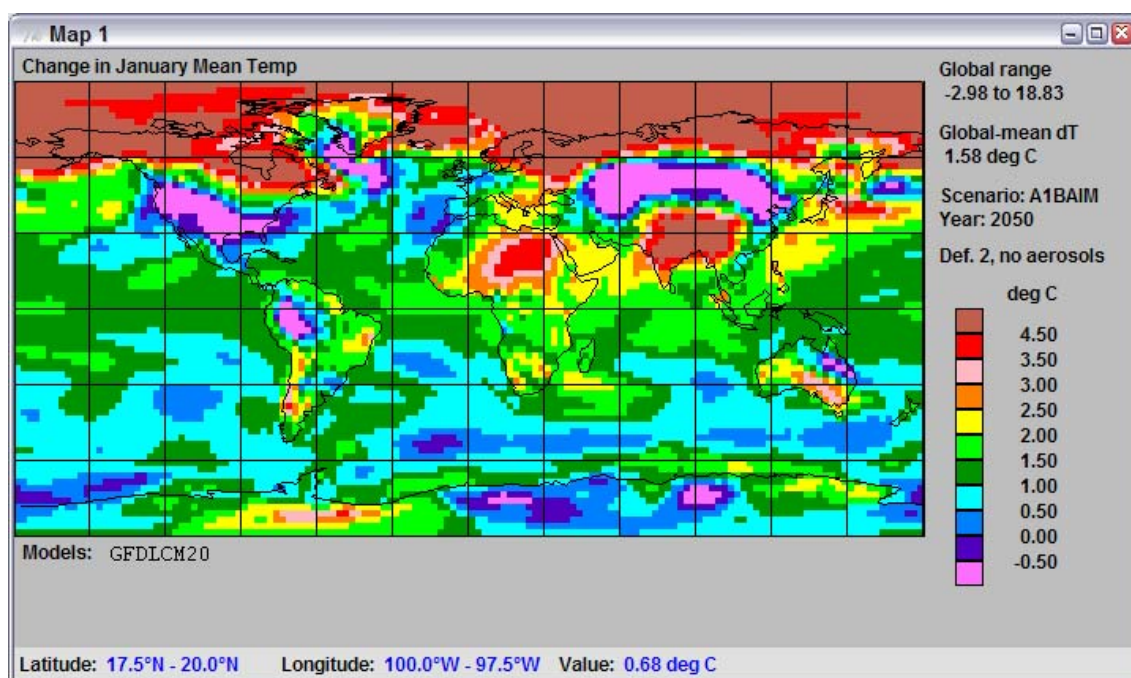
13) Se puede elegir la **Variable** climática, con su periodo anual, mensual o estacional, así como el tipo de paleta de colores que se mostrará en el mapa:



14) Finalmente se selecciona el año de la proyección, así como el escenario de emisiones (políticas o de referencia) cuyos valores se mostrarán en el mapa:



15) Ahora al ejecutar la opción **RUN** se obtiene un mapa con valores en una retícula de 2.5° x 2.5° que contiene un resumen de las opciones seleccionadas:



Los archivos de datos correspondientes al mapa se localizan en C:\SG53\SCEN-53\engine\imout\ particularmente la matriz de datos representados en el mapa se encuentra en el archivo IMFIELDS.DAT. Para guardar los datos se recomienda copiar las carpetas: **imout**, **scengen** y **sdout** que contienen toda la información que cada ejecución de SCENGEN produce, en una carpeta aparte. Los datos se pueden acomodar para poderlos usar en otras aplicaciones, como GRaDs, SURFER u otros, que usen datos en forma de vector: longitud, latitud, valor. Para esto se puede seleccionar la matriz que se desea acomodar y copiarla en un archivo de texto (usando notepad) y aplicar un programa que lea y arregle los datos (se tiene disponible uno en la página web del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM).

6. Atlas Climatológico y Escenarios de cambio climático

Atlas Climático Digital de México, Sistemas de Información Geográfica y mapas georeferenciados.

En relación a la generación de escenarios de cambio climático a escalas nacional y regional, y particularmente sobre su despliegue e integración en mapas, se hace necesario desarrollar cartografía digital georeferenciada que permita su manejo, acceso y fácil interpretación, para servir como base de estudios temáticos aplicados y para la toma de decisiones.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son un conjunto de herramientas orientadas al tratamiento de información digital que contenga una componente espacial o georeferenciada. Es decir, nos ofrecen la posibilidad de trabajar con cartografía de una manera similar a la que tradicionalmente se ha desarrollado en soporte analógico, pero aprovechando las ventajas de la era digital.

Con los SIG podemos superar el concepto clásico de mapa, ya que permiten integrar la modelización numérica con las herramientas cartográficas. De esta manera se pueden generar mapas objetivos (en el sentido de que no contienen

una interpretación subjetiva) y predictivos (en el sentido que no son exclusivamente interpretativos de los datos actuales). Este concepto moderno de la cartografía es un paso adelante ya que une el ámbito de la modelización, muy actual en todas las ciencias de la Tierra, con la expresión espacial de estos modelos, aspecto muy útil tanto para el despliegue gráfico y georeferenciado de los estudios del clima como para la comprensión, el análisis y sobreposición de los diversos escenarios de cambio climático en distintas escalas y despliegues.

Adicionalmente los SIG permiten una integración más fácil y consistente de los diferentes pasos del proceso cartográfico: filtrado de datos, consulta, modelización, visualización, impresión y difusión por Internet. Si bien el producto final puede ser trasladado a un soporte analógico (mediante diferentes dispositivos de impresión) el hecho de disponer de la versión digital nos permite intercambiar información con otros sistemas o simplemente ponerla a disposición de los usuarios mediante CD, DVD o Internet para su consulta y utilización.

Considerando lo anterior, los SIG constituyen el medio idóneo para la generación, despliegue y manejo de escenarios de cambio climático para México a escalas nacional y regional, ya que la integración y disponibilidad de información interinstitucional de datos climáticos, así como de información sobre biodiversidad y ambiente, y de escenarios de cambio climático, permite a los tomadores de decisiones contar con elementos cuantitativos para hacer propuestas que contribuyan a diseñar políticas de reducción de la vulnerabilidad y el aumento de la capacidad adaptativa en diferentes regiones y sectores ante el cambio climático.

El Atlas Climático Digital de México (ACDM), que actualmente se desarrolla en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, se fundamenta en la necesidad de disponer de mapas de nuestro país que contengan información de distintas variables climáticas útiles para una gran diversidad de usuarios. Entre dichas variables destaca la de modelar la distribución de la biodiversidad, así como manejar o adecuar el impacto de un posible cambio climático sobre ella.

El Atlas Climático Digital de México permitirá acceder a los valores promedio mensuales de variables climatológicas y de parámetros bioclimáticos derivados, en cualquier punto del país hasta con una resolución de 1 Km en una primera etapa. Esta información se presentará en mapas georeferenciados en un servidor de mapas interactivo en Internet. La información se podrá exportar en distintos formatos para ser incorporada con datos de otras fuentes.

La información contenida en el ACDM estará basada en las mediciones puntuales de diversas fuentes, principalmente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua, así como con información de las bases climáticas del *National Climatic Data Center (NCDC)* y del *North American Regional Reanalysis (NARR)* de los E.U.A. Los datos obtenidos serán validados e interpolados espacial y temporalmente con métodos objetivos, considerando los efectos topográficos para lograr la cobertura, calidad y resolución propuestas.

En la dirección: <http://www.atmosfera.unam.mx/uniatmos/atlas> se puede tener acceso en forma preliminar, a las distribuciones mensuales de las siguientes variables y parámetros:

- ❖ Temperatura máxima promedio (tmaxp) (°C)
- ❖ Temperatura mínima promedio (tminp) (°C)
- ❖ Temperatura media (tmaxp+tminp)/2 (°C)
- ❖ Precipitación (mm)
- ❖ Latitud, longitud, altitud o profundidad (m) respecto al nivel medio del mar, de las variables y parámetros climáticos
- ❖ Parámetros bioclimáticos:
 1. Parámetro 1: Temperatura media anual (°C)
 2. Parámetro 2: Media del promedio mensual de temperatura máxima – temperatura mínima (°C)
(Rango diurno promedio)
 3. Parámetro 3: Isotermalidad. Índice de variabilidad de la temperatura (P2/P7)x100 (Razón del rango diurno promedio con respecto al rango anual)
 4. Parámetro 4: Estacionalidad de la temperatura (desviación estándarx100).
 5. Parámetro 5: Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
 6. Parámetro 6: Temperatura mínima del mes más frío (°C)
 7. Parámetro 7: Rango de temperatura anual (°C). (temp. máx. del mes más cálido – temp. mín. del mes más frío)
 8. Parámetro 8: Temperatura promedio del cuatrimestre más lluvioso (°C)

9. Parámetro 9: Temperatura promedio del cuatrimestre más seco (°C)
10. Parámetro 10: Temperatura promedio del cuatrimestre más cálido (°C)
11. Parámetro 11: Temperatura promedio del cuatrimestre más frío (°C)
12. Parámetro 12: Precipitación anual (mm)
13. Parámetro 13: Precipitación del mes más lluvioso (mm)
14. Parámetro 14: Precipitación del mes más seco (mm)
15. Parámetro 15: Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
16. Parámetro 16: Precipitación del cuatrimestre más lluvioso (mm)
17. Parámetro 17: Precipitación del cuatrimestre más seco (mm)
18. Parámetro 18: Precipitación del cuatrimestre más cálido (mm)
19. Parámetro 19: Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)

De igual forma se pueden acceder algunos ejemplos sobre datos climáticos, bioclimáticos y escenarios climáticos, a escala estatal e incluso municipal, de los estados de México, Michoacán, Veracruz, Hidalgo y del Distrito Federal.

Escenarios de Cambio Climático

Con el fin de satisfacer las necesidades de los grupos de trabajo de impactos, se construyó una climatología mensual con resolución espacial de 10x10 Km para las variables precipitación y temperaturas media, máxima y mínima. La Figura 6.1 muestra algunos de los mapas elaborados para el proyecto. Los mapas y las bases de datos para todos los meses del año y las variables antes mencionadas se encuentran disponibles en la página de Internet del CCA²³.

²³ Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala, C. Gay. 2008. Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América . Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. Disponible desde internet en <http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/escenarios/Escenarios_de_cambio_climatico_Mexico_2008.htm>

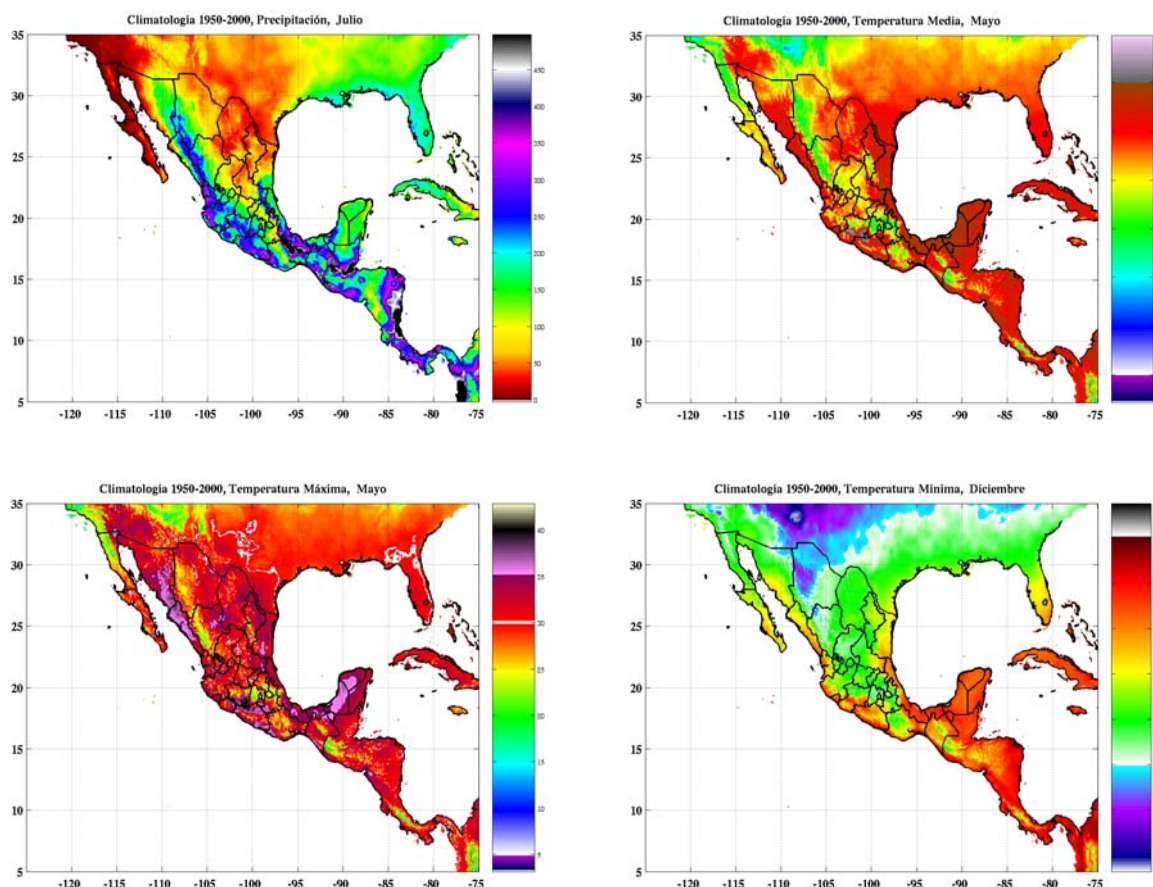


Figura 6.1. Climatología 1950-2000 para la República Mexicana para precipitación en julio, temperatura media en mayo, temperatura máxima en mayo y temperatura mínima en diciembre.

Los escenarios de cambio climático generados para la República Mexicana fueron realizados para la temperatura y precipitación mensual para los horizontes 2030 y 2050, y los escenarios de emisiones A1B, A2, B2 y B1. La Figura 6.2 muestra algunos ejemplos de escenarios de cambio climático de baja resolución ($2.5 \times 2.5^\circ$), y la Figura 6.3 de una resolución de 10×10 Km (climatología más cambio). De igual manera, las bases de datos y los mapas correspondientes se encuentran disponibles en la página de Internet del CCA.

Datos disponibles

Escenarios regionales de cambio climático mensuales para los horizontes 2030 y 2050 utilizando 4 escenarios de emisiones (A1B, A2, B2 y B1) y tres AOGCMs (ECHAM5, HADGEM1 y GFDL CM2.0). Cada uno de estos escenarios se construyó con 2 resoluciones espaciales: baja ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$) y alta (10×10 Km) y

están disponibles en la página: http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/escenarios/Escenarios_de_cambio_climatico_Mexico_2008.htm. En esta misma página se encuentra la climatología observada para el periodo 1950-2000, con una resolución de 10 x10 Km e incluye las siguientes variables: temperaturas media, mínima y máxima, y precipitación.

Metodología empleada

Los escenarios de cambio climático a escala espacial de 10 x10 Km se construyeron siguiendo una metodología similar a la propuesta en Hijmans¹⁷, *et al*, (2005), basada en interpolación por *splines*. La climatología mundial observada está disponible a una resolución de 30 segundos de arco (referida como 1 Km²) en la página <http://www.worldclim.org>. A partir de estos datos se generó una climatología para la República Mexicana con una resolución de aproximadamente 10 Km, tanto en latitud como en longitud. Los escenarios globales de cambio climático disponibles tienen una resolución espacial de aproximadamente 2.5° x 2.5° por lo que se procedió a interpolarlos en la misma malla usada en la climatología de 10 Km x 10 Km.

Si consideramos que el área de Chiapas queda completamente cubierta por solo dos celdas de las empleadas por los AOGCMs, es claro que tenemos un gran problema para determinar la manera en la que debemos de proyectar uno o dos valores sobre toda la extensión de Chiapas, por mencionar un ejemplo. Claramente, la orografía es un factor muy importante que no es tomado en cuenta en las simulaciones numéricas. Este factor, sin embargo, si está considerado en la climatología de alta resolución, así que una manera muy simple de proceder es sumarle la anomalía de los modelos a la climatología. Al hacer esto suponemos que el valor de la celda se distribuye de igual manera en toda el área cubierta por la misma, lo que implica que los gradientes existentes en la climatología se conservan exactamente. En zonas de orografía muy accidentada esta suposición es altamente idealizada, pero al menos es consistente con la dinámica impuesta por los modelos de circulación general los cuales no resuelven la topografía. Utilizar modelos con una resolución muy alta de área limitada representa una mejor alternativa, aunque implica un esfuerzo de cómputo enorme que debe de realizarse en trabajos futuros.

Dos ejemplos trabajados en detalle

EJEMPLO 1.

En la página siguiente que contiene la CLIMATOLOGÍA 1950 – 2000:

http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/escenarios/climatologia_1950_2000.htm

elija la temperatura media de enero. Descargará el archivo comprimido Tmed01.dat.gz; proceda a descomprimirlo usando el comando gunzip Tmed01.dat.gz, y obtendrá el archivo Tmed01.dat.

En la pagina:

http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/escenarios/gfdl20_mapas_y_datos_interpolado.htm

elija la anomalía de temperatura correspondiente al modelo GFDL CM 2.0 (INTERPOLADO) para el mes de enero del año 2050. Descargará el archivo comprimido Inttg50a201.dat.gz. Descomprímalo para obtener Inttg50a201.dat.

Formato de los datos:

Si edita cualquiera de estos archivos verá que constan de 160425 renglones, correspondientes a un arreglo bidimensional con dimensiones 465 x 345.

La primera dimensión corresponde a la longitud y la segunda a la latitud.

El formato de escritura de estos archivos es 3(F8.2), es decir, son tres columnas contiguas, cada una con 8 caracteres, de los cuales el sexto corresponde al punto decimal y los dos últimos a las fracciones.

La primera columna corresponde a la longitud, la segunda a la latitud y la tercera al valor de la variable en cuestión. Valores de la variable iguales a -999.90 indican que la variable no está definida en esa localidad. Note que los primeros 465 renglones corresponden a la latitud más al norte de la zona considerada, y así sucesivamente.

Procesado de los datos:

Inicie el programa Matlab y use el comando:

```
load Tmed01.dat
```

para leer los datos que contiene el archivo Tmed01.dat. Ahora use los 6 comandos siguientes:

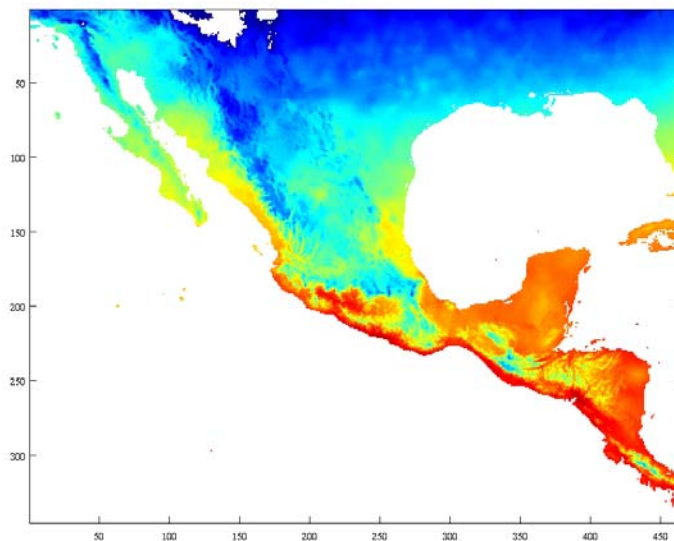
```
Valor=Tmed01(:,3);  
TmediaEnero=reshape(Valor,465,345);  
figure  
imagesc(TmediaEnero',[0 30])  
colormap(jet(128))  
colorbar
```

Nota: Es importante usar el punto y coma en algunos comandos para evitar el despliegue de información de las variables en la pantalla.

Con el primer comando se asignó el valor contenido en la tercera columna de la variable Tmed01 (archivo Tmed01.dat) al arreglo Valor (vector columna con 160425 entradas).

Con el segundo comando se forma un arreglo bidimensional (matriz) de datos tomando las primeras 465 posiciones, luego las 465 siguientes y así sucesivamente 345 veces del vector Valor. Lo que resulta es una matriz con dimensiones 465 x 345.

Los cuatro últimos comandos son para graficar, obteniéndose la figura siguiente:



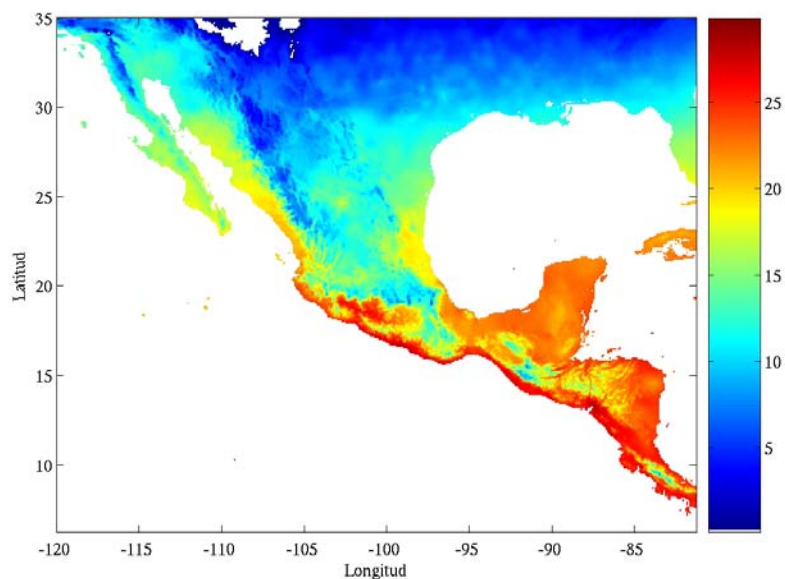
Para agregar las latitudes y las longitudes correspondientes se deben de formar vectores (que contengan estos valores) a partir de las primeras dos columnas de la variable Tmed01. Esto se puede hacer usando los comandos:

```
Longitud=Tmed01(1:465,1);  
Latitud=Tmed01(1:465:end,2);
```

Si ahora usa los siguientes comandos:

```
figure  
imagesc(Longitud,Latitud,TmediaEnero',[0 30])  
colormap(jet(128))  
axis xy  
xlabel('Longitud','fontsize',15)  
ylabel('Latitud','fontsize',15)  
set(gca,'fontsize',15);
```

Obtendrá una figura como la siguiente:



Para leer los datos del escenario de cambio climático y visualizarlos se procede de una manera similar. La única diferencia es que las anomalías si están definidas en la zona de los océanos, así que es necesario leer los datos correspondientes a la línea de costa y las demarcaciones de los estados de nuestro país para poder graficar el mapa de México.

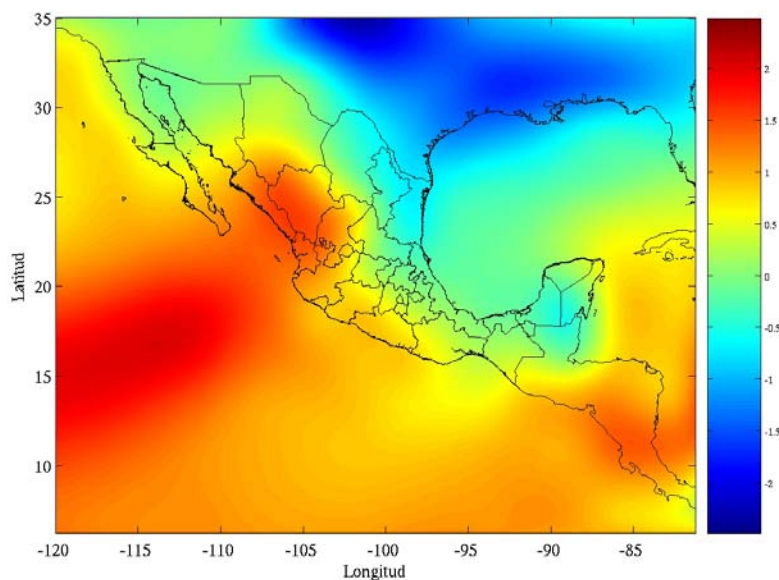
Para visualizar el escenario de cambio climático use los siguientes comandos:

```
load mexico.prn
load costagu.prn
xxlon=mexico(:,1);
yylat=mexico(:,2);
xlon=costagu(:,2);
ylat=costagu(:,1);
[I]=find(xlon==0.0);
xlon(I(1:length(I)))=NaN;
ylat(I(1:length(I)))=NaN;

load Inttg50a201.dat
ValorAnonalia=Inttg50a201(:,3);
TanomaliaEnero=reshape(ValorAnonalia,465,345);
figure
imagesc(Longitud,Latitud,TanomaliaEnero',[-2.5 2.5])
hold on
plot(xlon,ylat,'-k')
plot(xxlon,yylat,'-k')
colormap(jet(128))
axis xy
xlabel('Longitud','fontsize',15)
```

```
ylabel('Latitud','fontsize',15)
set(gca,'fontsize',15);
colorbar
```

Obtendrá la figura siguiente:



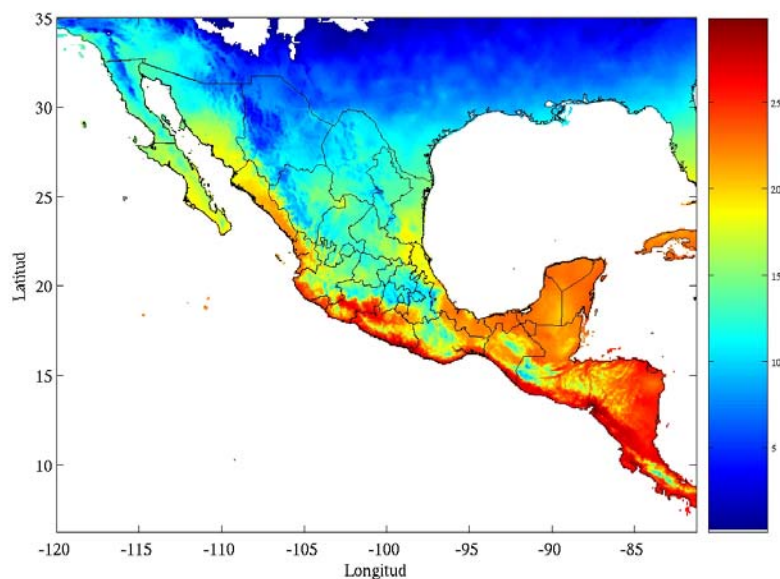
Ahora vamos a graficar el promedio de enero más la anomalía asociada al cambio climático. Primero use los dos comandos siguientes para cambiar las áreas de océanos por NaN's. Esto con la finalidad de enmascararlos y poder omitirlos de la figura (la climatología no incluye valores en los océanos, aunque se podría construir y agregar a la base de datos).

```
TmediaEnero = change(TmediaEnero,'==',-999.9, NaN);
TeneroMasAnomalia=TmediaEnero+TanomaliaEnero;
```

Para graficar use:

```
figure
imagesc(Longitud,Latitud,TeneroMasAnomalia',[0 30])
hold on
plot(xlon,ylat,'-k')
plot(xxlon,yylat,'-k')
colormap(colores)
axis xy
xlabel('Longitud','fontsize',15)
ylabel('Latitud','fontsize',15)
set(gca,'fontsize',15);
colorbar
```


El resultado es la figura siguiente:



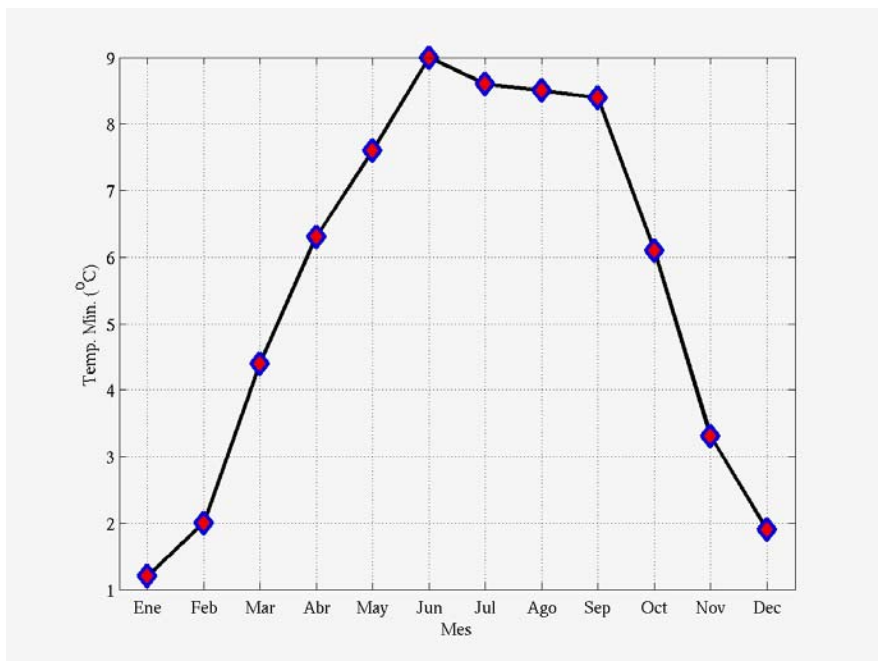
EJEMPLO 2.

En nuestro segundo ejemplo vamos a graficar el ciclo anual de la temperatura mínima en una localidad cercana al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Primero leeremos los datos de temperaturas mínimas descargados de la página del CCA (procedimiento ya explicado en el primer ejemplo). Después de descomprimir los datos tenemos los archivos: Tmin01.dat, ..., Tmin12.dat. Ahora se deben de formar 12 vectores (o un arreglo de doce columnas), uno(a) para cada mes del año y después generamos un arreglo tridimensional con la climatología de las temperaturas mínimas.

El siguiente paso es graficar. Para ello debemos de determinar la ubicación del punto que tenga las coordenadas geográficas más cercanas a la localidad cercana. Para ello utilizamos el comando "find" en matlab. Una vez que tenemos estos índices formamos un vector columna que contiene los doce valores de la temperatura mínima de esa localidad.

Lo graficamos con el comando plot y obtenemos la figura siguiente:



Los dos programas que realizan todo lo explicado hasta este punto, así como los datos y rutinas necesarias para correrlos están disponibles en el CD que acompaña a este manual.