

01060

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO
CLIMÁTICO PARA LA ZONA CENTRO DEL ESTADO
DE VERACRUZ, MÉXICO.**

Tesis para obtener el grado de

MAESTRO EN GEOGRAFÍA

Presenta

LCA. BEATRIZ ELENA PALMA GRAYEB

Director de Tesis:

Dr. Carlos Gay García

Asesora adjunta:

Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez

FAB. DE FILOSOFÍA Y LETRAS



DIVISION DE
ESTUDIOS DE POSGRADO

Esta tesis es parte del proyecto AIACC-LA29 (UNAM): "Evaluación Integrada de la Vulnerabilidad Social y Adaptación al Cambio y Variabilidad Climática de los Productores Agropecuarios en México y Argentina".

Ciudad Universitaria, México, D.F.

2005

m347635



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Beatriz Elena Palma Grayeb
FECHA: 7/09/05
FIRMA: Beatriz Elena Palma

*Este trabajo está dedicado a mis padres e hijos: Rafael Enrique Palma, Martha Elena José Grayeb, Luis Manuel, Jorge Alberto y Jonathan Iván.
¡Mis grandes tesoros!*

A Héctor Saiz Guerra, dándole las gracias por todo su apoyo, paciencia y afecto brindado.

A los doctores Carlos Gay, Ana Cecilia Conde, Adalberto Tejeda, Laura Maderey y Ernesto Jáuregui, agradeciendo sus valiosas sugerencias y conocimientos transmitidos.

A Dymas.

CONTENIDO

Introducción	i - x
Escenarios de cambio climático	
Antecedentes teóricos	
Planteamiento del problema	
Hipótesis de trabajo	
1. La región de estudio	1- 44
1.1. La región centro del estado de Veracruz	
1.1.1. Aspectos históricos	
1.1.2. Situación geográfica y localización	
1.1.3. Orografía	
1.1.4. Hidrología	
1.1.5. Edafología	
1.1.6. Vegetación y uso de suelo	
1.1.7. Flora	
1.1.8. Población	
1.1.9. Actividades	
1.2. Climatología general de la región centro del estado de Veracruz	
1.2.1. Los sistemas de circulación	
1.2.1.1. Ondas del este	
1.2.1.2. Huracanes	
1.2.1.3. Nortes	
1.3. Los elementos climáticos	
1.3.1. Temperatura	
1.3.2. Precipitación	
1.3.2.1. Análisis de la distribución espacial de la precipitación	
1.3.3. Fenómenos especiales	
1.3.4. Clima	
1.3.4.1. Los climas de la región centro del estado de Veracruz	
1.3.5. Tendencias	
2. Escenarios generados a partir de los modelos de circulación general CCC y GFDL-R30.	45 - 78
2.1. Los modelos climáticos	
2.1.1. Características generales de los modelos climáticos	
2.1.2. Tipos de modelos	
2.2. Criterios de selección de los modelos	
2.3. Confiabilidad de las simulaciones	
2.4. Modelos seleccionados para este estudio	
2.4.1. Características generales de los modelos seleccionados	
2.4.2. Salidas de los modelos CCC y GFDL-R30	
2.5. Escenarios generados a partir de los modelos CCC y GFDL-R30	
2.5.1. La reducción de escala (downscaling)	

- 2.5.1.1. Reducción de la escala de los modelos CCC y GFDL-R30 para el centro del estado de Veracruz
- 2.5.1.2. Datos
- 2.5.1.3. Análisis de la variabilidad espacial de las temperaturas y precipitaciones obtenidas de las salidas de los MCG.
- 2.5.2. Correlaciones
 - 2.5.2.1. Resultados y conclusiones del análisis de regresión lineal simple
- 2.5.3. Técnica para reducir la escala
 - 2.5.3.1. Modelo CCC
 - 2.5.3.1.1. Temperatura
 - 2.5.3.1.2. Precipitación
 - 2.5.3.2. Modelo GFDL-R30
 - 2.5.3.2.1. Temperatura
 - 2.5.3.2.2. Precipitación
- 2.6. Metodología para encontrar los factores de corrección para 2CO₂
 - 2.6.1. Obtención del factor de corrección para el incremento de las temperaturas (°C).
 - 2.6.2. Obtención del factor de corrección para el incremento en la precipitación (mm/mes).
- 2.7. Aplicación de los factores de corrección estimados a los incrementos de temperatura y precipitación para cada MCG.
 - 2.7.1. Tablas de cálculo para generar los escenarios de cambio climático de temperatura
 - 2.7.2. Tablas de cálculo para generar los escenarios de cambio climático de precipitación

3. Resultados

79 - 103

- 3.1. Escenarios futuros de temperatura para la región centro del estado de Veracruz
 - 3.1.1. Temperaturas medias anuales
 - 3.1.2. Temperaturas medias mensuales
 - 3.1.3. Temperaturas por estación del año
 - 3.1.4. Anomalías climáticas de temperatura
 - 3.1.4.1. Anomalías por mes
 - 3.1.4.2. Anomalías por estación del año
- 3.2. Escenarios futuros de precipitación para la región centro del estado de Veracruz
 - 3.2.1. Precipitación media anual
 - 3.2.2. Precipitación media mensuales
 - 3.2.3. Precipitación por estación del año
 - 3.2.4. Análisis de los periodos de mayor y menor variación de la precipitación en la región de estudio
 - 3.2.5. Cambios en la precipitación
 - 3.2.6. Climatología de la región de estudio bajo condiciones de cambio climático por duplicación de CO₂ atmosférico
 - 3.2.6.1. Temperaturas medias bajo condiciones de 2CO₂

- 3.2.6.2. Precipitaciones medias bajo condiciones de 2CO₂
- 3.3. Escenarios futuros para el cultivo de café de la región centro del estado de Veracruz
 - 3.3.1. Características del cafeto
 - 3.3.1.1. Requerimientos agroclimáticos del cultivo
 - 3.3.2. Escenarios de cambio climático

4. Conclusiones	C1 – C3
5. Bibliografía	B1 – B6
6. Anexo I	A1 – A2
7. Anexo II	A3
8. Anexo III	A4
9. Anexo IV	A5
10. Anexo V	A6 - A20
11. Abreviaturas	A21 – A22

Introducción

El clima de nuestro planeta puede ser afectado por cualquier factor que modifique el balance energético del sistema climático, la radiación recibida del Sol o la pérdida hacia el espacio.

Independientemente de cuál sea la causa de ello, tal afectación puede tener un impacto sobre las actividades humanas y los ecosistemas terrestres, pues en los casos más extremos se pueden presentar cambios en el ciclo hidrológico a nivel mundial y en la circulación atmosférica y oceánica.

Son considerados factores naturales de cambio, los cambios en las emisiones solares los cuales han sido relacionados con cambios climáticos pasados (ciclos glaciales e interglaciales) y la actividad volcánica, ésta última por la liberación que se presenta hacia la estratosfera de gases que contienen azufre (principalmente bióxido de azufre) y que son transformados en aerosoles de sulfato.

Por otra parte, las variaciones tanto en las concentraciones de aerosoles troposféricos causadas por la quema de combustibles de origen fósil y biomasa, como las variaciones de gases de efecto invernadero (GEI) son considerados agentes de cambio climático de origen natural y antrópico.

Los GEI atmosféricos producen un forzamiento radiativo¹ positivo que tiende al calentamiento de la atmósfera inferior y de la superficie por efecto invernadero; este efecto se ha venido dando en la atmósfera durante miles de millones de años como resultado de la absorción de la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra y absorbida por la misma superficie y la misma atmósfera.

Los GEI de origen natural son: el vapor de agua, ozono (O₃), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). La Figura 1 permite observar los cambios en las concentraciones de los gases que han sido asociados a las actividades antropogénicas (Albritton *et al.*, 2001)

De acuerdo a Muñoz Ledo (1994) la oxidación de combustibles fósiles suma entre un setenta a un noventa por ciento de las emisiones de CO₂ de origen antropogénico; su emisión depende directamente del combustible consumido, la fracción de carbón del combustible que se oxida y del contenido de carbón del combustible.

¹ El forzamiento radiativo es un cambio en la irradiancia vertical neta y se expresa en Watts por metro cuadrado: Wm⁻².

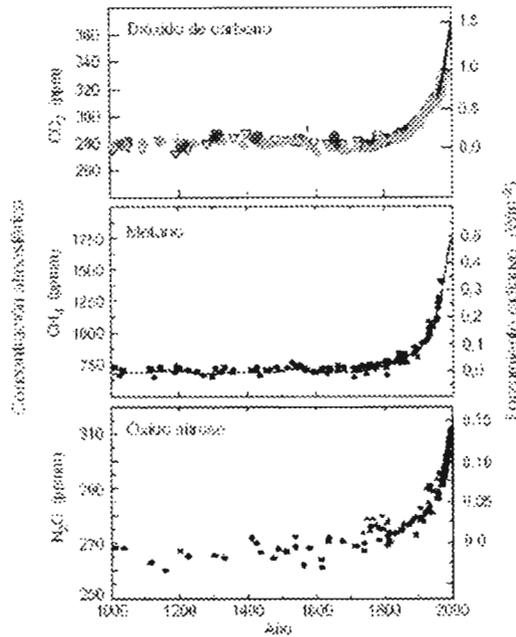


Figura 1. Variación en la concentración mundial de CO₂, CH₄ y N₂O (1000 – 2000).
Fuente: Tercer Informe de Evaluación, 2001 (Albritton *et al.*, 2001).

“Los aerosoles troposféricos en la mayoría de los casos llegan a producir un forzamiento radiativo negativo con tendencia al enfriamiento del clima. Esto puede ser de manera directa, mediante la dispersión de la radiación o de manera indirecta, al actuar como núcleos de condensación para la formación de nubes” (Albritton *et al.*, 2001).

Así, la posibilidad de un calentamiento global establecida en términos de la alta correlación que existe entre las variaciones de CO₂ atmosférico y la temperatura en superficie de la atmósfera, ha llevado a los gobiernos de diversos países (entre los que se encuentra México) y a organizaciones internacionales, a unir esfuerzos para el desarrollo de investigaciones que permitan la realización de inventarios de gases de efecto invernadero. Dichos inventarios consideran fuentes y sumideros, escenarios de emisiones de GEI y escenarios de cambio climático (global, regional o local).

Tales investigaciones podrían servir de base para los estudios de las implicaciones económicas y el análisis de la vulnerabilidad de los países al cambio climático sobre diversas áreas (energía, asentamientos humanos, sequías y agricultura, recursos hidrológicos, zonas costeras, etc.)

En la sinopsis contenida en el Tercer Reporte de Evaluación (TAR, 2001, por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), se menciona que “a la luz de las nuevas pruebas disponibles y teniendo en cuenta la incertidumbre que aún subsisten, es probable que el calentamiento observado en los últimos 50 años sea debido en su mayor parte al aumento de las concentraciones de los GEI” (Albritton *et al.*, 2001).

Es por ello que crece cada vez más el interés por desarrollar estudios que permitan vislumbrar la forma en que podría evolucionar el clima si las emisiones de CO₂ se duplicaran y cuáles serían sus consecuencias.

A la fecha del TAR, todos los escenarios estudiados tendían a describir un planeta en fase de calentamiento y de cambios en el sistema climático, con aumentos en la concentración del vapor de agua, la temperatura, el nivel del mar y en las precipitaciones globales medias durante el siglo XXI.

En algunas de las investigaciones realizadas para México se proyecta que el país podría resultar vulnerable ante un cambio climático, y que podría experimentar un aumento en sus temperaturas y variaciones en el régimen de la precipitación; lo cual traería consigo cambios en el comportamiento de los fenómenos atmosféricos, modificaciones a sus recursos naturales e impactos en las actividades productivas (Gay, 2000).

La herramienta empleada para las simulaciones del cambio del clima planetario por aumentos de las concentraciones de GEI han sido los modelos de circulación general de la atmósfera (MCGs), a pesar de no tener capacidad para simular todos los aspectos del clima a nivel regional y las circulaciones a mesoescala debido a su baja resolución espacial (Magaña, 1995).

Sin embargo, en el TAR se menciona lo siguiente: “los avances dentro de la simulación del clima mundial han permitido aumentar la confianza en la capacidad de simulación de los MCG, con base en los buenos resultados que han mostrado dentro del estudio de las consecuencias que podría tener a nivel regional el cambio climático global”.

Esta tesis tiene como objetivo general generar escenarios de cambio climático para la región centro del estado de Veracruz y pretende contribuir directamente al proyecto titulado “Evaluación Integrada de la Vulnerabilidad Social y Adaptación al Cambio y Variabilidad Climática de los Productores Agropecuarios en México y Argentina” (AIACC-LA29, Gay, 2002).

En el caso de México el proyecto AIACC-LA29 está enfocado al análisis de la vulnerabilidad actual y futura de los agricultores de la región centro de Veracruz (Coatepec y Huatusco) y de la región sur de Tamaulipas (González y Mante), con el objeto de aumentar su capacidad de adaptación ante un eventual cambio climático, y sentar las bases para otros estudios de adaptación o de riesgos y peligros a escala regional y local.

La generación de escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz (18° 31' a 20° 15' N, 95° 30' a 97° 30' W) se realizará mediante la adaptación de los modelos de circulación general del Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL) y del Canadian Climate Center (CCC) a la escala y a las condiciones geográficas y climáticas de la región de estudio. Estos dos modelos han sido utilizados en el “Estudio de País: México” (Gay, 2000).

El documento se compone de la introducción y tres capítulos. En el capítulo uno se proporciona la información físico- geográfica y climática de la región centro de Veracruz y su contenido pretende servir como material de consulta para estudios futuros relacionados con temas de vulnerabilidad. El capítulo dos contiene los escenarios de cambio para la temperatura y precipitación en la región centro de Veracruz, generados a partir de los MCG elegidos, y la descripción detallada de la metodología empleada. En el capítulo tres se presentan los resultados obtenidos y el análisis del posible impacto que se tendría sobre el cultivo de café en la región de estudio ante las condiciones nuevas de temperatura y precipitación, obtenidas a partir de los escenarios de cambio climático.

Escenarios de cambio climático

Este apartado está dedicado a la presentación del conocimiento relacionado con escenarios de cambio climático regional y sus aplicaciones. Se partirá de la visión geográfica del espacio y del modelado físico-matemático existente de la atmósfera y los océanos, para describir a través de escenarios la situación que guardaría el clima futuro en la región centro del estado de Veracruz ante un eventual cambio climático, inducido por un aumento en la concentración en la atmósfera de gases de efecto invernadero.

El espacio -desde la visión geográfica- es un concepto que permite el análisis, la comprensión y representación del espacio social (Ortega, 2000). Relacionar distintos campos de conocimiento con el territorio, el paisaje o lugar de estudio, facilita la comprensión del espacio social², que en nuestro caso –como en muchos otros- se encuentra bajo las influencias de la globalización.

Por otra parte, la unión de estos aspectos ha llegado a perfilar parte del quehacer de diversas ciencias como por ejemplo, las sociales, las naturales y las exactas, ante la problemática ambiental generada por la manera en que la sociedad se ha ido vinculando con la naturaleza para la construcción de su hábitat y logro de su desarrollo.

Algunas de las investigaciones (ver por ejemplo: Gay 2000, Gay *et al.*, 1995, 1996) han sido encaminadas hacia la mitigación del efecto del deterioro ambiental, la preservación del medio ambiente, la prospección e inventario de recursos, la identificación y mapeo de los riesgos naturales, y al estudio de las alteraciones y el cambio climático durante el siglo XX.

Estos aspectos presentan una estrecha relación con la forma en que se combinan los factores: poder, estado, grupos sociales, trabajo y tecnología dentro de la relación sociedad – naturaleza; por lo que pueden ser considerados de orden social.

En lo que respecta al sistema Tierra – atmósfera, en los estudios ambientales se plantea que el ser humano interviene consciente o inconscientemente en su desequilibrio global, en el cual el cambio climático global (CCG) juega un papel importante (García, 1996).

² El espacio social es definido por Ortega (2000), como la representación de la materialidad física que la sociedad genera en los procesos de producción y de relación social.

La construcción de escenarios de cambio climático resulta ser una herramienta básica en la elaboración de estudios de impactos y vulnerabilidad ante el CCG; con ellos se realizan descripciones verosímiles y en su caso simplificadas del estado del clima futuro sobre la base de datos del clima actual observado; las proyecciones climáticas son generadas mediante el uso de diversos modelos, dentro de los cuales se encuentran los estadísticos, de balance de energía o de Circulación General (Albritton *et al.*, 2001).

La generación de escenarios regionales, permite el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante posibles peligros y riesgos que enfrentaría la sociedad de darse el cambio climático si en ellos, además de los cambios estimados en los regímenes de temperatura y/o precipitación se consideran otros aspectos físicos y geográficos de la región.

Cabe mencionar, que las evaluaciones de vulnerabilidad regional reportadas en 1997 por el Grupo de Trabajo II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (WGII, IPCC, por sus siglas en inglés), se centraron principalmente sobre los ecosistemas, la hidrología y los recursos hídricos, la producción de alimentos y fibras, los ecosistemas costeros, los asentamientos humanos y la salud humana. El reporte contiene los escenarios de 10 regiones, que en conjunto cubren la totalidad de la superficie de la Tierra.

Antecedentes teóricos

De acuerdo a Albritton, *et al.*(2001), dentro de las proyecciones mundiales regionales (contenidos en el TIE) que se han hecho sobre los cambios futuros en la temperatura en base a modelos climáticos atmósfera- océano, se proyecta que:

- Las respuestas de equilibrio de la temperatura del aire superficial de la superficie mundial a una duplicación de la concentración de CO₂, estén comprendidas entre 1.5 y 4.5 ° C (sensibilidad del clima). “Estimación que no ha variado desde el Primer Informe de Evaluación (PIE) del IPCC ni desde el Segundo Informe de Evaluación (SIE)”.
- El aumento en la temperatura del aire en la superficie en el Atlántico Norte y en las regiones circumpolares del Océano Antártico podría ser inferior al promedio mundial;
- “Habrá una menor variación de la temperatura diurna en muchas regiones, y la temperatura mínima durante la noche subirá más que la temperatura máxima durante el día”;
- “Podría haber una reducción general de la variabilidad diaria de la temperatura del aire en la superficie durante el invierno, y un aumento de la variabilidad diaria durante el verano en las zonas de tierra firme del hemisferio norte” de acuerdo a algunos modelos;
- En la medida en que el clima se torne más cálido, podría darse una disminución de la capa de nieve y la extensión del hielo marino en el hemisferio norte;
- “Para fines del siglo XXI (2071 a 2100) el cambio de la temperatura media del aire en la superficie mundial, en relación con el periodo comprendido

entre 1961 y 1990, será de 3.0 ° C como promedio (con un margen de variación de entre 1.3 y 4.5 ° C) en el escenario de referencia A₂³; y

- “Es muy probable que en casi toda la superficie terrestre, el calentamiento sea más rápido que el promedio mundial, sobre todo en las altas latitudes del hemisferio norte durante la estación fría”.

Del análisis que hacen las coincidencias en los resultados de nueve modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO) sobre el calentamiento regional relativo, comparando el calentamiento medio mundial indicado por cada uno de ellos, reportan para la región de Centroamérica (CAM) divergencias tanto para el invierno como para el verano (Fig.1), en cuanto a la magnitud del calentamiento para los escenarios A₂ y B₂⁴ del informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE).

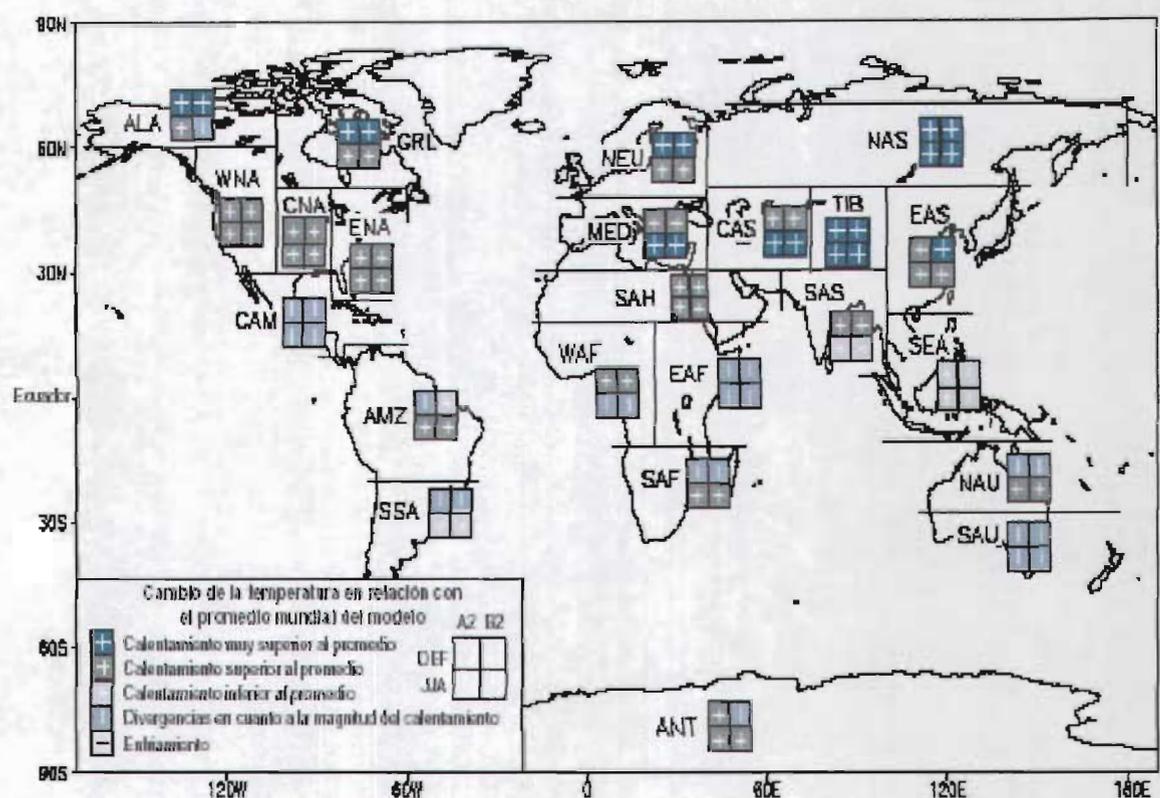


Figura 1. Coincidencias entre nueve modelos en cuanto al calentamiento regional relativo (comparado con el calentamiento medio mundial indicado por cada MCGAO). Figura tomada de Albritton et al., 2001; p. 58

³ El escenario A₂ describe un mundo muy heterogéneo, tiene como características distintivas la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales, el índice de natalidad permite una población en continuo crecimiento, el desarrollo económico se orienta a las regiones y considera cambios lentos en el crecimiento económico y desarrollo tecnológico (Albritton, et al., 2001).

⁴ El escenario B2 describe un mundo con niveles de desarrollo económico intermedio, la población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2 y con un desarrollo tecnológico lento; esta orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social y se centra principalmente en niveles locales y regionales (Albritton et al., 2001)

Las proyecciones de los cambios futuros en las precipitaciones señalan un aumento de los promedios mundiales de vapor de agua, evaporación y precipitación; observándose a escala regional tanto aumentos como disminuciones.

Para la región de Centroamérica (CAM) se proyecta una leve disminución (cambio medio de entre -5 y -20%) en las precipitaciones para el invierno y el verano en el escenario A2; para el escenario B2 las señales son contradictorias para el verano, mientras que para el invierno se proyecta una leve disminución (Figura 2).

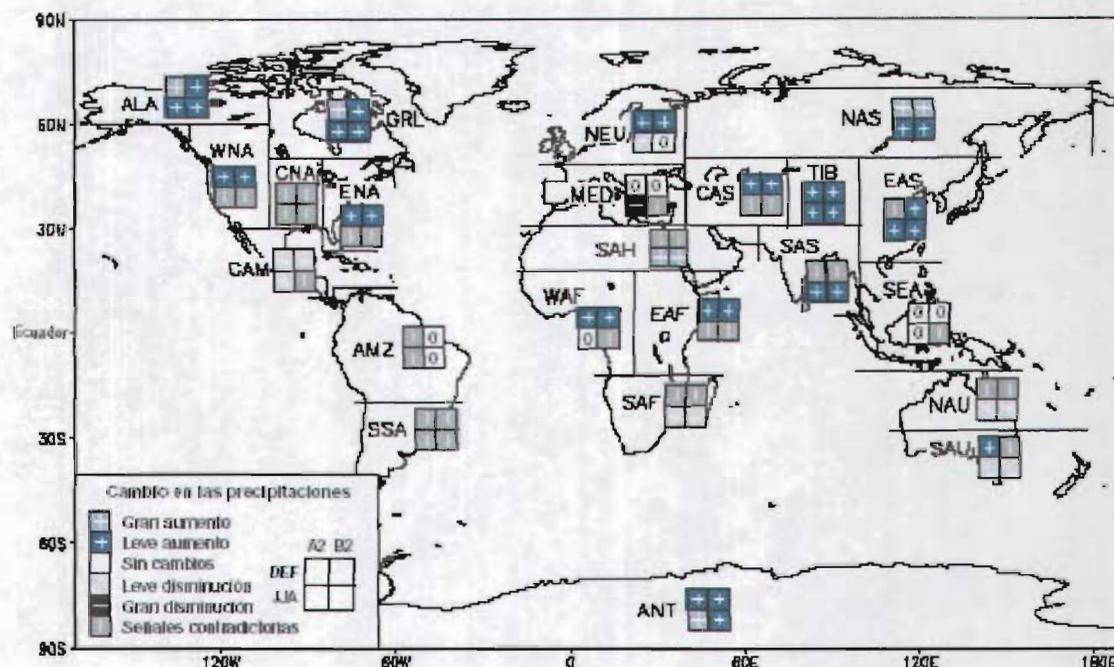


Figura 2. Proyecciones de cambios en la precipitación por regiones a partir de las simulaciones de MCG para los escenarios A2 y B2 del IE-EE. Figura tomada de Albritton (et al., 2001; p. 60).

En la regionalización sobre la vulnerabilidad al cambio climático mundial contenida en el reporte especial del segundo grupo de trabajo (WGII, por sus siglas en inglés) del IPCC, México pertenece a la denominada “Región de América Latina”; esta región comprende todos los países continentales al sur de Estados Unidos, desde México hasta Chile y Argentina, y los mares adyacentes (IPCC, 1997).

Este grupo de expertos proyectan que la región latinoamericana podría ser seriamente afectada de darse un cambio climático considerando el creciente deterioro de su medio ambiente; y que ello podría conducir al acrecentamiento de problemas socioeconómicos, de salud, migración, etc.

Tomando en cuenta los estudios realizados por el IPCC y los escenarios climáticos planteados por investigadores mexicanos, México resulta vulnerable ante un CCG por ser un país en vías de desarrollo. Las investigaciones realizadas en México, pronostican que el

Tomando en cuenta los estudios realizados por el IPCC y los escenarios climáticos planteados por investigadores mexicanos, México resulta vulnerable ante un CCG por ser un país en vías de desarrollo. Las investigaciones realizadas en México, pronostican que el país podría experimentar un aumento en la temperatura y una variación en precipitación (Conde 2003; Magaña *et al.*, 2000).

Concretamente estos dos últimos factores, de acuerdo a los modelos que se han empleado para el estudio de la vulnerabilidad y adaptación ante un CCG, podrían traer como consecuencias una tendencia hacia el aumento de la sequía meteorológica en varias regiones del país (Hernández *et al.*, 2000); una competencia por el uso de los recursos hídricos (Maderrey *et al.*, 2000) debido a su escasez y al aumento de la población; un cambio en un 50% de la cobertura vegetal actual con una marcada afectación de los bosques templados (Villers *et al.*, 2000).

Otros posibles impactos podrían ser: un ascenso del nivel del mar que afectaría las zonas costeras bajas en la cuenca del Golfo de México (Ortiz *et al.*, 2000); una afectación negativa a la agricultura de temporal (Conde *et al.*, 2000, Flores *et al.*, 2000); una afectación a los sectores de energía e industria (Sánchez *et al.*, 2000), repercutiendo todo esto de manera negativa en la población y los asentamientos humanos (Aguilar, 2000).

Dentro de la generación de escenarios climáticos regionales para México, se tienen los antecedentes de los trabajos desarrollados por Conde *et al.*, (1994, 1995, 2003) y por Magaña (1995, 2000).

Conde *et al.*, (1994) construyen los escenarios futuros para 23 estaciones ubicadas dentro de la República Mexicana a partir de las salidas de los modelos de circulación general GFDL-R30 y CCC para condiciones de 2CO₂ atmosférico. Los datos de las salidas se presentan en dos formas, una de éstas es encontrando el punto más cercano en la malla utilizada por el MCG y la otra, con datos obtenidos a partir de la interpolación de los valores de los puntos de malla que rodean a la estación de interés.

En el trabajo que desarrollan Conde *et al.*, (1995) se presentan escenarios climáticos para México para dos escenarios base. En uno consideran los valores de temperatura y precipitación promedio del periodo 1940-1970 de los puntos de una malla de 2.5° x 2.5°, y en el otro la base de datos de Arthur Douglas consistente en promedios de treinta años de temperatura (92 puntos) y precipitación (279 puntos) del territorio mexicano; además realizan la comparación entre los datos del Modelo Termodinámico del Clima con las simulaciones para condiciones de 1 x Co₂ de los modelos GFDL-R30 y CCC.

Magaña (1995) proporciona las bases teórico-metodológicas para la generación de escenarios físicos de cambio climático y muestra un ejemplo de la manera en que se pueden utilizar las relaciones entre variables locales (base de datos de temperatura en superficie, precipitación e índice de aridez de Palmer elaborada por el doctor Arthur Douglas, disponible en <http://hurricane.ncdc.noaa.gov>) y patrones de circulación de gran escala simulados por cuatro MCG. Encuentra por ejemplo, que las lluvias del verano están más asociadas a circulaciones de mesoescala las cuales no siempre son bien simuladas por los modelos climáticos.

El estudio realizado por Magaña *et al.*, (2000) contiene los cambios climáticos regionales para México obtenidos por interpolación de las salidas de los modelos GFDL-R30 y CCC para experimentos numéricos de $1 \times \text{CO}_2$ y $2 \times \text{CO}_2$ y sobre la base de datos climáticos del periodo 1951-1980 del doctor Arthur Douglas. En sus resultados menciona que en la mayoría de las dieciocho regiones de México podrían darse incrementos moderados de temperatura de superficie, y que podrían presentarse modificaciones sustanciales en la precipitación y en la temporada de lluvias.

Dentro de las investigaciones más actuales el trabajo doctoral de C. Conde (2003), construye escenarios de cambio climático anuales para México dentro de una malla de $20^\circ \times 30^\circ$ lat./long., considerando el escenario base 1961-1990. Realiza un análisis de las salidas de los 14 modelos contenidos en el programa de cómputo Magicc/Scengen versión 2.4, considerando los escenarios de emisiones A1 y B2 para los años 2050 y 2100 y los modelos CCC, GFDL-R15, ECHAM4 y HadCM2; debido a que se puede contar con actualizaciones y salidas públicas, y permiten la inclusión de los escenarios de emisiones seleccionados.

Sugiere finalmente que los tres últimos MCG resultan los más adecuados para realizar futuras investigaciones de cambio climático en México; concluye que los escenarios de cambio “apuntan a un incremento en el riesgo climático, ya que los cambios en la temperatura y precipitación proyectados son similares o rebasan condiciones que se han presentado en el pasado durante eventos extremos”; haciendo mención que en particular, el sector agrícola y los recursos hídricos del país podrían encontrarse en riesgo al enfrentar climas posiblemente más secos y calientes en gran parte del territorio mexicano (especialmente durante el verano).

En este trabajo de tesis se han considerado como objetivos particulares: establecer algunos criterios mínimos para la selección de los MCG para generar escenarios de cambio climático regional, comparar las salidas de los modelos para el clima regional actual con el clima observado, y determinar las fluctuaciones del clima en la región de estudio.

Planteamiento del problema

Considerando que los modelos de circulación general empleados para las simulaciones de los cambios del clima presentan las siguientes limitantes:

- La escala espacial “no permite realizar estimaciones de cambios climáticos regionales o locales a través de interpolaciones simples con puntos locales de interés para construir escenarios físicos de cambio climático a nivel regional, ya que algunos de los rasgos característicos como bosques, regiones agrícolas, hidrológicas, topográficas, efectos de montañas y de la distribución mar – tierra, no pueden ser definidos con exactitud” (Magaña, 1994).
- El tamaño de la subrejilla que por lo general abarca de 200 a 400 km impide la representación explícita de, por ejemplo: las circulaciones por forzamiento orográfico, los procesos de las nubes cumulus y de turbulencia en la capa límite.
- Además de que cada MCG puede predecir para una misma escala regional un incremento distinto de precipitación o temperatura (Magaña, 1994);

la generación de escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz, requiere de la adaptación de los modelos de circulación general a la escala y a las condiciones geográficas y climáticas de la región de estudio.

El estado de Veracruz es considerado como uno de los estados que más recursos aporta al desarrollo nacional y dentro de la región centro se localizan tres polos de crecimiento: Veracruz, Xalapa y Córdoba, que se caracterizan, respectivamente, por su actividad portuaria e industrial, por el predominio del sector terciario y por ser una conurbación industrial.

Es por ello que el conocimiento de los impactos que sobre el medio pueda llegar a tener la transformación de los ecosistemas por cambios en el uso del suelo por efecto de un posible cambio climático, es un elemento básico para el desarrollo de la región en forma sustentable.

Magaña (1994) define el clima global como la respuesta del sistema atmosférico a la estructura de gran escala de la superficie de la tierra (distribución tierra – mar, topografía) y al calentamiento diferencial; y el clima regional como el resultado de la interacción entre los detalles globales y regionales; uno en términos del otro, lo que justifica el hecho de que sea posible la simulación adecuada del clima global aún cuando ninguno de los climas regionales sea simulado de manera real.

El pronóstico del cambio climático a nivel regional de acuerdo a las definiciones anteriores requiere del modelamiento de tal interacción y por tanto, de una reducción de escala de las salidas de los MCG.

Magaña (2000) hace mención de tres métodos para el ajuste de la información de los MCG a la escala regional (reducción de escala): interpolación lineal; un modelo estadístico; y un modelo dinámico de mesoescala o de área limitada (Magaña, 2000).

Hipótesis del trabajo

Considerando que los modelos de circulación general simulan las circulaciones de gran escala adecuadamente y que las relaciones entre patrones de circulación de gran escala y las variables no cambian aún bajo efectos de un calentamiento global, es posible generar escenarios de cambio climático con los modelos GFDL-R30 y CCC usados en El Estudio de País: México, adaptando las salidas de los modelos a las dimensiones y condiciones geográficas y climáticas de la zona centro del estado de Veracruz, mediante algún método de reducción de escala.

Finalmente los escenarios que en este trabajo se generen, más el conocimiento que se tiene de la región sobre los riesgos por fenómenos naturales: inundaciones a causa de la ocurrencia de lluvias intensas, paso de tormentas tropicales y huracanes; sequías, heladas y granizadas (Tejeda *et al.*, 1995 y Pereyra *et al.*, 1995), e incendios forestales (Gobierno del Estado de Veracruz, 2000); permitirán por ejemplo, el desarrollo de estrategias de adaptación ante un posible cambio climático en la región.

Capítulo I

1.1 La región centro del estado de Veracruz.

En este capítulo se describe la estructura de la región para tener un panorama de la dinámica que tiene dentro del desarrollo estatal y nacional. La parte histórico-geográfica tiene como fuente el trabajo realizado por el geógrafo francés Marchal *et al.*, (1985) sobre la región centro del estado de Veracruz, para el Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB).

1.1.1 Aspectos históricos

Durante el periodo prehispánico se asentó en la parte norte del territorio veracruzano la cultura huasteca, en la sur la olmeca y en la centro la totonaca, y desde el punto de vista histórico la última adquiere particular importancia por darse en ella el inicio de la conquista territorial por parte de los españoles. La Villa Rica de la Vera- Cruz fundada por Hernán Cortés ha sido considerada como el centro de acción de la conquista (Marchal et al., 1985).

Como resultado de la conquista van surgiendo centros poblacionales coloniales, prosperando principalmente aquellos que servían de comunicación entre los centros poblacionales importantes de la Nueva España y las cercanas a las costas.

Un hecho que marcó el inicio del desarrollo económico de la región fue sin duda la fundación en 1522 del puerto marítimo ahora conocido como Veracruz; esto trajo consigo que las poblaciones cercanas a la costa y las que servían de comunicación hacia la parte centro del territorio mexicano fueran las más favorecidas; de estas poblaciones sobresalen: Veracruz por ser el lugar donde se realizaban movimientos marítimos y Córdoba, Orizaba y Xalapa por el desarrollo del comercio y la agricultura a través de la haciendas, las cuales basaban su actividad en el cultivo de la caña y la ganadería.

En cuanto al cultivo de café, cabe señalar que se introduce a finales del siglo XVII a las poblaciones y alrededores de Xalapa, Córdoba y Orizaba las cuales se convierten con el paso del tiempo en la segunda zona productora de café del país poseedora además de varios beneficios de café (Marchal et al., 1985).

1.1.2 Situación geográfica y localización

La región corresponde a la parte central del estado de Veracruz, la cual se encuentra situado en la parte media oriental de la República; está limitada por los paralelos 19° y 20° de latitud norte (Pereyra et al., 1995). Sin embargo esta delimitación se puede variar de acuerdo al objetivo del estudio; por ejemplo Marchal et al., (1985) proporciona dos definiciones distintas de esta porción del territorio veracruzano, una por regiones económicas y otra por distritos de temporal.

En este trabajo, con el objeto de incluir la zona cafetalera reportada por INEGI en 1980 y de interés para el Proyecto AIACC-LA29, la región centro quedó delimitada por los 18° 30' a 20° 15' de latitud norte y 95° 30' a 97° 30' de longitud oeste (Figura 1.1).

Esta definición permite: a) Ubicar estaciones climatológicas por arriba y abajo de los diecinueve y veinte grados de latitud, para el análisis de las variables climáticas con las que se generará el escenario base, necesario para el estudio de cambio climático; y b) Tener mayor eficiencia del paquete computacional Surfer 7.0, como instrumento para la creación de los mapas de los elementos del clima que apoyarán la descripción climatológica de la región.

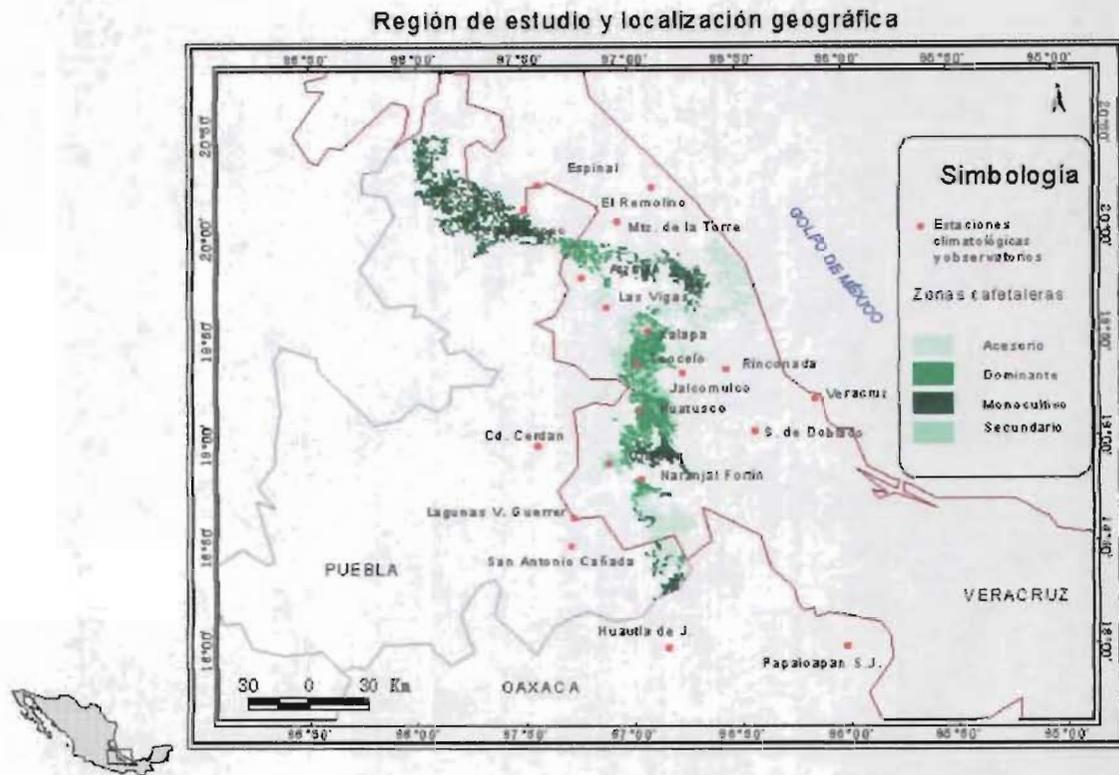


Figura 1.1. Región centro del estado de Veracruz. En 1980 el cultivo de café abarcaba principalmente la zona: Xalapa-Teocelo-Huatusco. Fuentes del mapa: INEGI, Uso de suelo en 1980; CLICOM, CNA, 2000.

La región se encuentra limitada al oeste por la Sierra Madre Oriental, al este por el Golfo de México, y al norte y sur por municipios del estado de Veracruz; comprende además una porción pequeña del estado de Oaxaca y gran parte de estado de Puebla.

1.1.3 Orografía

La Sierra Madre Oriental y el Golfo de México delimitan dos llanuras, la costera del Golfo Norte y la costera del Golfo Sur y parte de ellas se encuentran dentro de la región centro.

A lo largo del transecto oeste-este el paisaje lo constituyen: lomeríos; barrancas como Los Pescados, Chilontla, Coscomatepec y Chocamán, Tatatila, Zomelahuacan (rica en metales preciosos y mármoles) Metlac, Tliapan, Coapan, Tecocac, Miahuatlán y La Carbonera; valles

como los de Orizaba, Acultzingo, Maltrata, Coatepec y Huatusco entre otros más, y médanos o dunas en las proximidades de las costas (Gutiérrez, A., 1995).

En la Figura 1.2 se aprecia la orografía de la región de estudio; los puntos azules indican la ubicación de las estaciones climatológicas y observatorios considerados en el estudio y permite se ubicación respecto a la Sierra Madre Oriental y Golfo de México.

La región contiene los mayores accidentes topográficos del estado, en ella destacan alturas que alcanzan los 2500 msnm, formando las cumbres de Acultzingo, las sierras de Huatusco y Zongolica y los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote. El Pico de Orizaba se ubica al noroeste de Orizaba, tiene una altura de 5 610 msnm y los ramales de la montaña cubren gran parte de las regiones de Córdoba y Huatusco (Marchal *et al.*, 1984).

El Cofre de Perote tiene una altura de 4 300 msnm, “sus cumbres sirven de límite a los municipios de Perote, Ayahululco, Ixhuacán, Xico, Acajete y Las Vigas. Los cerros de Tlatzalan, Paz, Mazozonticpac, Pico Alto, Potrerillo y Comadapa sirven de límite entre los estados de Veracruz y Puebla”; sus ramificaciones orientales se presentan en la región de Coatepec, destacando la sierra de Cosautlán y los cerros de Tres Tortas, Jilotepec, Cetlálpan, Tecomates y San Marcos, y en la región de Xalapa el cerro de Macuiltépetl” (Gutiérrez, 1995).

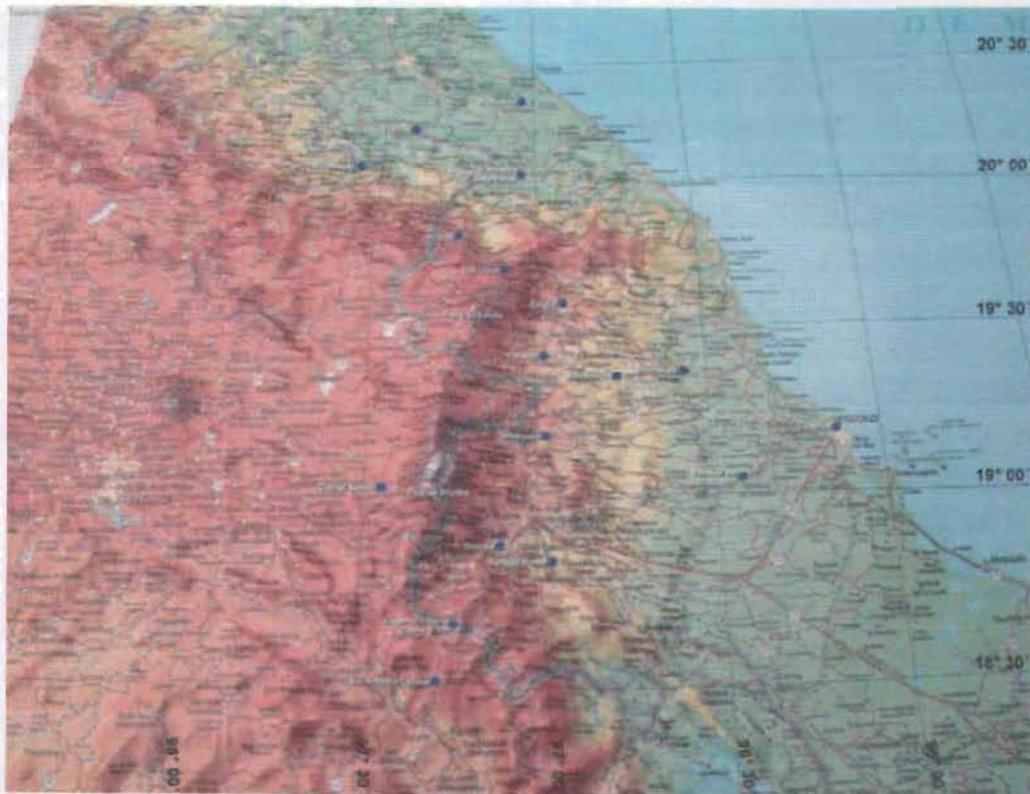


Figura 1.2. Orografía de la región centro. Imagen digital editada.
Fuente: Carta estatal en relieve: 1:100 000, Veracruz, INEGI.

En este estudio, el gradiente altitudinal juega un papel importante en la distribución espacial de la temperatura y precipitación, y en la distribución potencial del cultivo de café.

1.1.4 Hidrología

Los ríos principales de la región pertenecen a la vertiente del Golfo de México y se ubican en regiones hidrológicas R27 “Tuxpan – Nautla” y R28 “Papaloapan” de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Los ríos Cazones, Tecolutla y Nautla se encuentran dentro de la región R27 que se ubica en la porción noreste del estado, los dos primeros presentan un escurrimiento medio anual superior a los 40 m³/seg en su desembocadura.

La región R28 abarca gran parte de la región centro y se caracteriza por tener corrientes en disposición radial y paralelas sujetas a las formas del relieve. Dentro de ella se encuentran los ríos Actopan, La Antigua, Paso de Ovejas, Jamapa, Cotaxtla, Blanco, Camarón y Papaloapan (Gutiérrez, 1995). En la Figura 1.3 se presenta el mapa con los ríos de la región (todos ellos desembocan en el Golfo de México), y en la tabla 1.1 se proporciona información adicional sobre algunos de ellos.

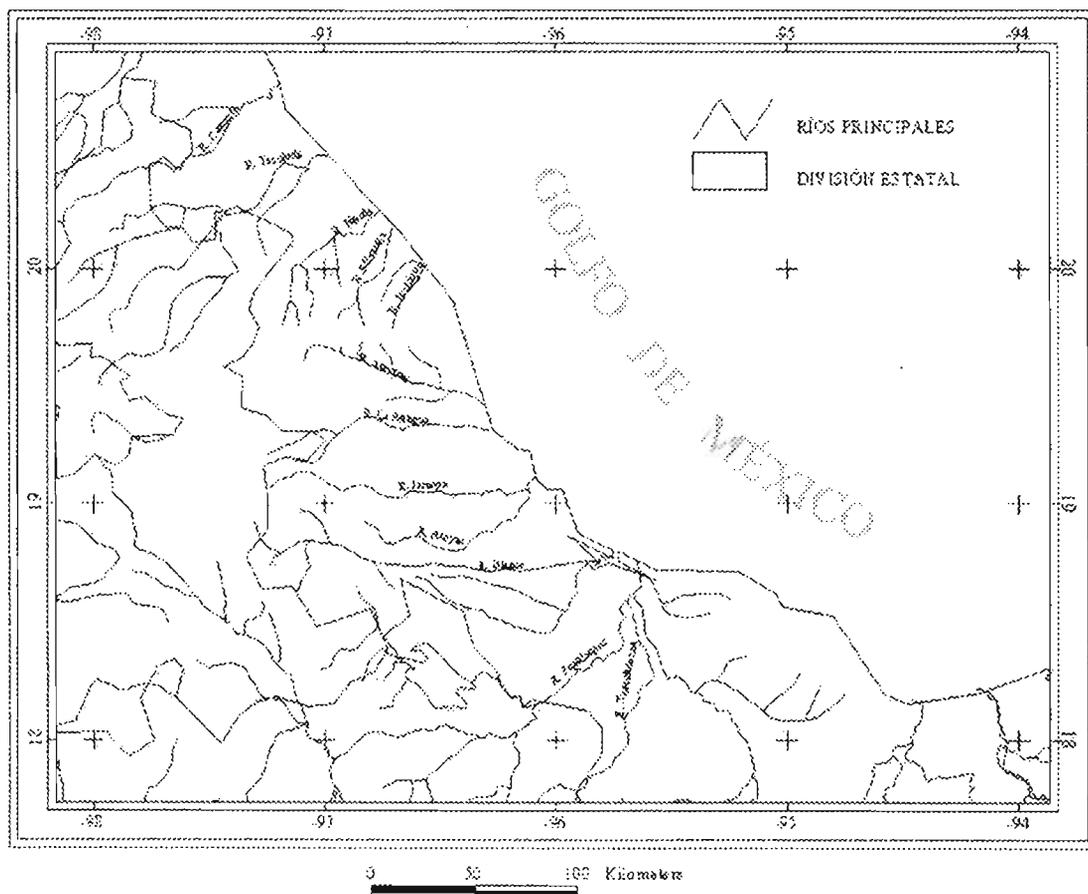


Figura 1.3. Red hidrográfica principal de región centro.

Fuente: Maderey-R. L. E. y Torres-Ruata, C. (1990). "Hidrografía e hidrometría", IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4 000 000. Instituto de Geografía, UNAM.

Tabla 1.1. Origen de algunos ríos de la Figura 1.3, de acuerdo a Gutiérrez (1995).

Río	Origen
Cazones	Nace en la porción montañosa de Hidalgo por los poblados de Pahuatlán del Valle y Tacuilotepec, se prolonga hacia Poza Rica y hasta la planicie costera.
Tecolutla	Nace en la sierra de Puebla y en su trayectoria recibe los nombres de Arroyo Zapata, río Coyuca y río Aculco.
Nautla	Nace en el Cofre de Perote con el nombre de arroyo Borregos.
Jamapa	Nace en las faldas del Pico de Orizaba.

1.1.5 Edafología

El mapa de la Figura 1.4 muestra los diferentes tipos de suelo que se encuentran en la región de estudio. El tipo de suelo corresponde a la clasificación de la FAO y se relaciona con los principales factores limitantes para el uso agrícola. En la Tabla 1.2 se describe la simbología del mapa edafológico.

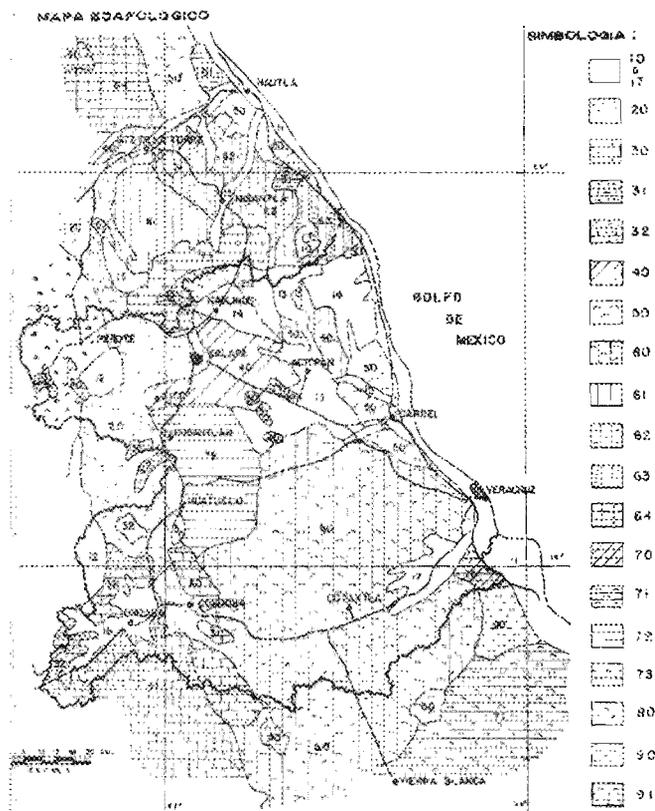


Figura 1.4 Mapa edafológico. Fuente: Mapa edafológico. Marchal et al., (1985).

Capítulo I

Tabla 1.2. Simbología del mapa edafológico.

No. de Unidades	Clasificación FAO	Principales factores limitantes al uso agrícola	No. de Unidades	Clasificación FAO	Principales factores limitantes al uso agrícola
10	Litsoles	Profundidad muy reducida del suelo, pendientes fuertes, rocosidad y pedregosidad	50	Vertisoles pélicos.	Textura arcillosa desde la superficie, drenaje interno lento a muy lento.
11	Regosoles éútricos y calcáricos.	Textura arenosa, dunas, fertilidad reducida.	60	Cambisoles vérticos Feozems háplicos Vertisoles pélicos.	Textura relativamente pesada, drenaje interno lento, pedregosidad.
12	Litsoles y regosoles.	Profundidad muy reducida del suelo, pendientes fuertes, rocosidad y pedregosidad.	61	Cambisoles vérticos Cambisoles calcáricos Rendzinas	Pendientes fuertes a moderadas, presencia de calcáreo, profundidad reducida del suelo.
13	Litsoles Cambisoles éútricos.	Profundidad muy reducida del suelo, rocosidad.	62	Cambisoles vérticos Cambisoles calcáricos.	Pendientes moderadas, presencia del calcáreo, textura relativamente pesada.
14	Litsoles Cambisoles vérticos y éútricos Feozems háplicos.	Profundidad muy reducida del suelo, rocosidad, pendientes moderadas y fuertes.	63	Cambisoles áútricos Feozems háplicos.	
15	Fluvisoles éútricos	Riesgo de inundación.	64	Cambisoles éútricos Vertisoles pélicos Luvisoles crómicos.	Textura relativamente pesada, drenaje interno lento.
16	Fluvisoles calcáricos Andosoles.	Riesgo de inundación.	70	Luvisoles vérticos Vertisoles pélicos.	Textura relativamente pesada, drenaje interno lento.
17	Fluvisoles éútricos Vertisoles pélicos.	Riesgo de inundación.	71	Luvisoles vérticos Vertisoles pélicos Feozems háplicos.	Textura pesada, drenaje lento.
20	Andosoles húmicos y orticos Regosoles y litsoles.	Pendientes fuertes, pH ligeramente ácido, tasa reducida de fósforo asimilable, rocosidad.	72	Luvisoles crómicos Luvisoles vérticos Cambisoles éútricos.	Pendientes moderadas a fuertes, pH ligeramente ácido.
30	Rendzinas	Profundidad muy reducida del suelo, presencia del calcáreo, pendientes fuertes a moderadas.	73	Luvisoles vérticos Cambisoles éútricos	Pendientes moderadas a fuertes.
31	Rendzinas Luvisoles crómicos.	Profundidad muy reducida del suelo, presencia del calcáreo, pendientes fuertes a moderadas	80	Xerosoles háplicos	Textura arenosa, tasa reducida en materia orgánica.
32	Rendzinas Andosoles.	Profundidad muy reducida del suelo, presencia del calcáreo, pendientes fuertes a moderadas.	90	Gleysoles mólicos y vérticos.	Exceso de agua, manto freático cerca de la superficie.
40	Feozems lúvicos Cambisoles éútricos y vérticos.		91	Gleysoles éútricos.	Exceso de agua, manto freático cerca de la superficie.

1.1.6 Vegetación y uso de suelo

En la Figura 1.5 se muestran las diversas coberturas de suelo de la región de estudio, en él se presentan 15 clases agrupadas para simplificar la cobertura.

Centro de Veracruz:
Vegetación y usos del suelo

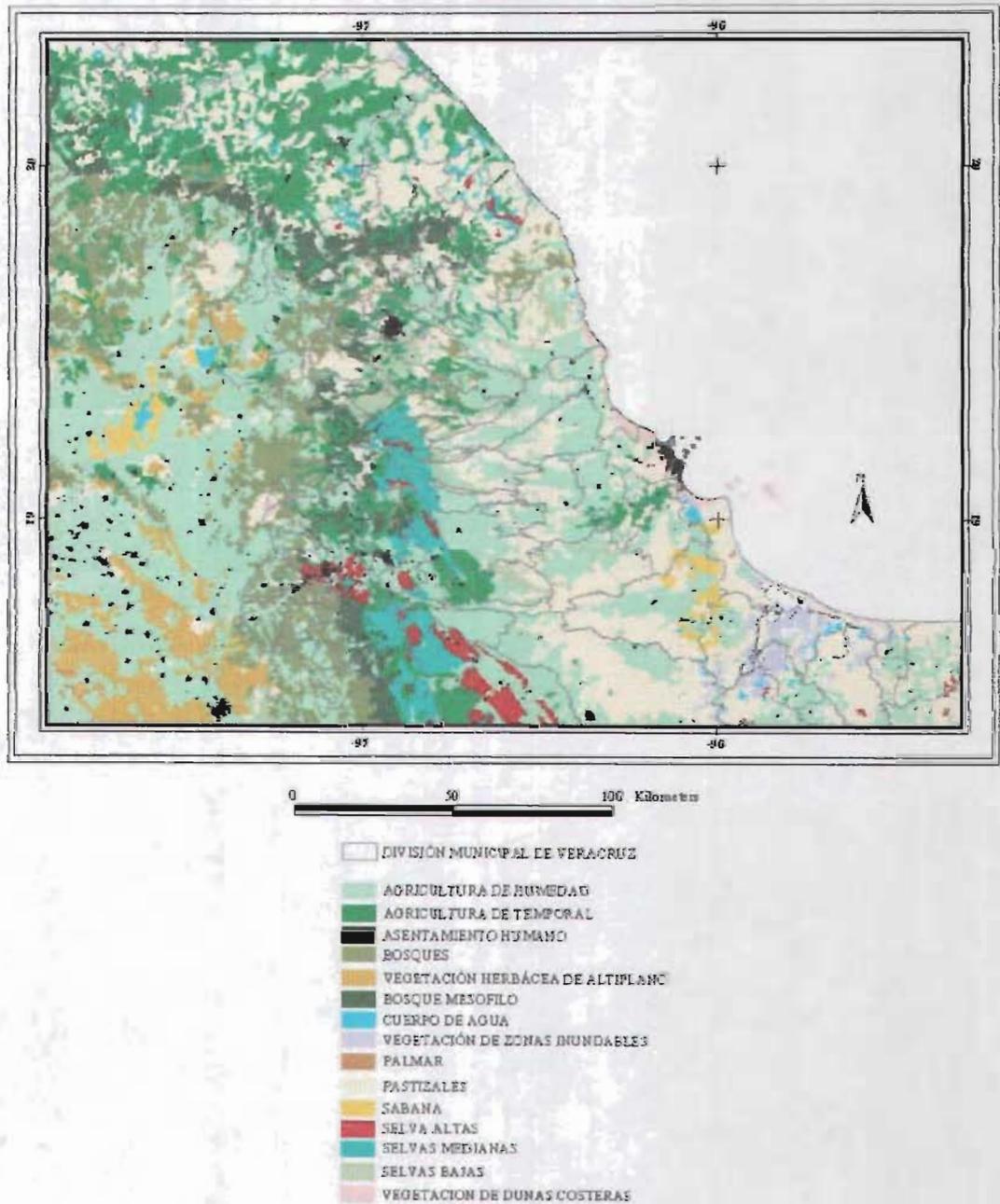


Figura 1.5. Vegetación y uso de suelo en la región centro del estado de Veracruz. Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1999).

1.1.7 Flora

La región de estudio presenta una gran variedad de flora, desde dunas y manglares en sus partes costeras hasta bosques de pinos en sus partes más altas (Figura 1.7)

De acuerdo a Marchal *et al.*, (1985) es posible reconocer hasta 20 pisos altitudinales de vegetación en la región centro de Veracruz, lo que no existe en otros lugares de la República (Tabla 1.3). Esta distribución actualmente podría estar alterada debido a cambios en el uso del suelo y la deforestación.

Tabla 1.3 Pisos de vegetación reconocidos en la región centro del estado de Veracruz

No.	Descripción de piso	No.	Descripción de piso
1	Manglar (lagunas y esteros)	11	Bosque de oyamel o abeto (3000- 3500 msnm);
2	Vegetación de dunas costeras (hierbas y bejucos rastreros, más estrato arbustivo y arbóreo)	12	Pradera garra del león (2600-3000 msnm)
3	Selva baja caducifolia (de las dunas costeras hasta los 900 msnm)	13	Pinar de grandes alturas (3 00- 4000 msnm);
4	Encinar tropical o de baja altitud (50 a 400/600 msnm);	14	Páramo de altura o vegetación alpina (4000-5000 msnm; límite con las nieves perpetuas)
5	Selva riparia o riveraña (microhábitats húmedos con clima semicálido y cálido);	15	Pastizal alpino (Pico de Orizaba solamente)
6	Encinar de mediana altitud (600-1 2000 msnm)	16	Encinar achaparrado (2400- 2800 msnm);
7	Pinar de mediana altitud (1200- 1300 msnm)	17	Bosque de pino-encino seco (2500-2800 msnm);
8	Bosque caducifolio (1300- 1900 msnm)	18	Bosque de enebro o escumifolio (altiplanicie)
9	Encinar, encino ixcalahuate (1600- 1800 msnm);	19	Matorral desértico rosetofilo (altiplanicie);
10	Bosque mixto (2000- 3000 msnm)	20	Matorral de Izote: (Yuca periculosa, cerros calizos)

En el caso particular del café, Marchal *et al.*, (1985) hace mención de las asociaciones que se han encontrado entre el cultivo y tipos de vegetación: cafetal con vegetación secundaria de bosque caducifolio, manglar y vegetación secundaria de selva baja caducifolia; cafetal y encinar y cafetal, pastizal y vegetación secundaria de bosque caducifolio. En la tabla 1.3 los números en negritas corresponden a algunos de los pisos asociados con los cafetales.

Capítulo I

Tabla 1.5 Actividades económicas principales por municipio. Fuente:

Municipio	Agrícola	Forestal		Ganadera	Silvícola	Otros
		Explotación	Producción			
Espinal	Tabaco, cítricos, frijol.	♦		Bovino		Avícola
Zozocolco	Café , frijol, maíz.	♦	Fruto de pimienta			Avícola
Mtz. de la Torre	Cítricos, caña de azúcar, plátano, maíz, chile, frijol, jamaica			Bovino	Maderas preciosas y maderas tropicales	Avícola apícola,
Atzacan	Café , caña de azúcar, , cítricos, maíz, frijol		Fruto de pimienta	Bovina	Maderas preciosas y pino	Avícola
Las Vigas de R.	Manzana, ciruelo, hongos y maíz.	Pino, ciprés, encino y fresno.		Bovino		
Xalapa	Café , maíz, , caña de azúcar.					Avícola, apícola.
Jalcomulco	Café , maíz, mango, plátano, cacahuete.					Avícola, apícola.
Teocelo	Café cereza , plátano, naranja y caña de azúcar.			Bovino		Apícola
Emiliano Zapata	Café , limón, caña de azúcar, frijol, maíz.			Bovino		Apícola, avícola.
Huatusco	Café , caña de azúcar y frijol.					Apícola
Orizaba	Café cereza , chile verde, chayote.					Avícola
Córdoba	Café , caña de azúcar, cereza, maíz.					Avícola
Fortín	Café cereza , caña de azúcar, ajonjolí, chile verde, frijol, maíz.					Avícola
Naranjal	Café cereza , plátano, naranja.					Apícola
Soledad de Doblado	Papaya, maíz, chile verde, mango, tamarindo.			Vacuno		Avícola, apícola.

♦ Sin especificación.

Lo anteriormente expuesto ofrece un panorama general de la diversidad de recursos naturales presentes en la región de estudio y del grado de marginación que presentan algunos de sus municipios, aspectos que permiten vislumbrar que de darse un cambio climático como el proyectado para el país, la región podría sufrir transformaciones que afectarían a su medio ambiente y economía.

1.2 Climatología general de la región centro del estado de Veracruz

Esta sección está dedicada a la generación del escenario actual o base de la región centro del estado de Veracruz a partir de datos diarios del periodo 1961 – 1990 de precipitación y de temperaturas máximas y mínima. Estas bases de datos se obtuvieron de CLICOM de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y de la base DAT 322 versión 1.0 adquirida por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM.

Los datos correspondientes a fenómenos especiales se obtuvieron de las Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) del periodo 1961-1990.

El periodo de registro de datos se seleccionó de acuerdo a las siguientes consideraciones: 1a. Es el periodo base que utilizan los modelos climáticos seleccionados para la generación del cambio futuro, y 2a. Se considera que la serie de datos es representativa de las condiciones climáticas promedio de la región de estudio ya que durante este periodo (30 años) se considera que se presentan años con condiciones climáticas variadas. Aún así, hay que considerar que algunos autores consideran que el periodo 1976 – 1999 corresponde al de calentamiento a nivel mundial más reciente (Albritton et al., 2001).

Para generar el escenario actual se consideraron los datos diarios de temperaturas máximas y mínimas (a partir de las cuales se obtuvieron los temperaturas medias) y precipitación del periodo 1961-1990 para cada una de las estaciones contenida en la Tabla 1.6; dicho escenario se utilizó para comparar las salidas de los modelos de circulación general GFDL-R30 y CCC utilizados en este trabajo de tesis.

Los mapas climáticos de temperatura (máxima, mínima, media y anual), de precipitación (acumulada mensual y anual) y de fenómenos especiales (días con tormenta, granizo, niebla y días con precipitación apreciable) se elaboraron con el paquete de cómputo SURFER versión 8.

El mapa de climas que se proporciona en este trabajo se realizó de manera ex profesa para este trabajo, con el objeto de obtener las áreas abarcadas por los tipos de clima predominantes en la región de estudio los cuales son tratados con más detalle en la sección 1.3.4.1. El mapa es una simplificación realizada con el ArcView 3.2 del mapa de CONABIO: "Climas. Clasificación de Köppen, modificado por García"; escala 1:1 000 000. México.

Capítulo I

Tabla 1.6 Estaciones seleccionadas en el estado de Veracruz, Puebla y Oaxaca.

Estaciones	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
Estado de Veracruz			
Espinal, Espinal.	20° 15'	- 97° 25'	111
El Remolino, Papantla.	20° 10'	- 96° 53'	35
Tecuantepec, Zozocolco.	20° 08'	- 97° 29'	250
Martínez de la Torre, Mtz. de la Torre	20° 04'	- 97° 03'	152
Atzalan, Atzalan.	19° 48'	- 97° 13'	1842
Las Vigas de Ramírez, Las Vigas.	19° 39'	- 97° 06'	2400
Xalapa, Xalapa (Observatorio).	19° 32'	- 96° 55'	1427
*Teocelo, Teocelo.	19° 38'	- 96° 97'	1218
Jalcomulco, Jalcomulco.	19° 20'	- 96° 45'	330
Huatusco de Chicuellar.	19° 09'	- 96° 57'	1344
Rinconada, Emiliano Zapata.	19 21'	- 96° 33'	313
Veracruz, Ver. (Observatorio).	19° 12'	- 96° 08'	2
Soledad de Doblado, Soledad de Doblado	19° 03'	- 96° 25'	183
**Orizaba, Orizaba (Observatorio)	18° 52'	- 97° 06'	1284
Naranjal Fortín, Naranjal de F.	18° 49'	- 96° 57'	697
Estado de Oaxaca			
**Huautila de Jiménez.	18° 8'	-96° 50'	1714
**Papalopan S.J. B. Tuxtepec	18° 9'	-96° 50'	22
**San Juan Bautista, Tuxtepec	18° 6'	-96° 7'	19
Estado de Puebla			
** Cd. Cerdán (SMN)	18° 59'	-97° 26'	2278
** Lagunas V. Guerrero	18° 38'	-97° 16'	2500
**San Antonio Cañada (DGE)	18° 30'	-97° 27'	1600

* Los datos de esta serie se tomaron de la base DAT322.

** Datos tomados de la base de las Normales Climatológicas del SMN.

1.2.1 Los sistemas de circulación

Por su ubicación geográfica el estado de Veracruz se encuentra dentro de la región tropical y es afectado a lo largo del año tanto por sistemas tropicales como extratropicales (Rodríguez *et al.*, 1995).

Durante el verano el territorio veracruzano experimenta el paso de las masas de aire tropical, las ondas del este, las depresiones, tormentas tropicales y huracanes; estos sistemas se presentan por lo general a partir de junio y en algunas ocasiones durante la segunda quincena de mayo (Rodríguez *et al.*, 1995).

En el invierno, durante los meses de octubre a mayo se tiene el paso de las masas de aire polar en forma de frentes fríos llamados Nortes y la invasión de aire frío asociado al paso de vaguadas polares. Las incursiones de aire polar tiene un papel importante dentro del balance energético del sistema climático mundial por el intercambio de energía que realizan, el cual compensa el déficit energético anual de latitudes medias. (Tejeda *et al.*, 1989).

En las siguientes secciones de este inciso se proporciona una descripción breve de algunos de los sistemas del verano y del invierno.

1.2.1.1 Ondas del este

La región de estudio se encuentra dentro de la zona de flujo de los vientos alisios, los cuales se establecen generalmente a partir de junio y soplan desde el Golfo de México hacia la parte continental.

Las lluvias orográficas son una manifestación del paso de estos vientos, ya que al chocar con la Sierra Madre Oriental el aire cargado de humedad por su paso a través del océano Atlántico se ve forzado a ascender y precipitar (Tejeda *et al.*, 1989).

En general se puede decir que dentro del flujo de estos vientos se desarrollan sobre las superficies oceánicas del Atlántico, Pacífico e Índico, pequeñas perturbaciones denominadas ondas tropicales, las cuales adoptan la forma de vaguadas abiertas al ecuador de escasa amplitud que se desplazan del este al oeste con una velocidad media de unos 20 km/hr, alcanzando longitudes en promedio de unos 500 km (Gil *et al.*, 1998).

Las ondas del este tiene su mayor frecuencia durante los meses de agosto y septiembre, pueden llegar ha transformarse en perturbaciones tropicales y alcanzar el rango de depresión tropical, tormenta tropical o ciclón tropical y cambiar su trayectoria.

Están acompañadas por un tiempo lluvioso, predominando en el sector de ataque de la onda el tiempo soleado. El paso de la onda es anunciado por nubes con desarrollo vertical y chubascos ocasionales, mientras que en el de la línea de cizalladura las condiciones se tornan en mal tiempo generalizado con fuertes tormentas, cambios en la dirección del viento (de NE a SE) y descensos de temperatura (Gil *et al.*, 1998). De acuerdo a Douglas (1992) el paso de este sistema (10 ondas por cada 45 días) trae consigo una fracción considerable de la lluvia total anual de la región tropical.

En particular, de acuerdo a Tejeda *et al.*,(1989) “cuando las ondas han alcanzado el nivel de depresión o tormenta tropical y llegan a chocar o a pasar cerca del territorio veracruzano, dejan tras de sí cantidades considerables de lluvia en la vertiente del Golfo”; registrándose la máxima ocurrencia en el mes de septiembre.

A manera de ejemplo se presenta la Figura 1.8, la cual muestra la ubicación de los ondas 7 y 8 el día 12 de junio de 2004. Las líneas rojas casi verticales y con flechas, indican la posición de la onda tropical número ocho; las condiciones meteorológicas asociadas a la onda que se extiende desde Guerrero hasta el Océano Pacífico fueron nublados con chubascos, tormentas eléctricas y lluvias moderadas a fuertes en la región Pacífico Sur, centro de la región Golfo y oriente de la región Occidente, de acuerdo al boletín emitido por la Comisión Federal de Electricidad (Fuente: Comisión Federal de Electricidad, Dpto. de Hidrometeorología; disponible en <http://www.cfe.gov.mx> y consultado en junio de 2004).

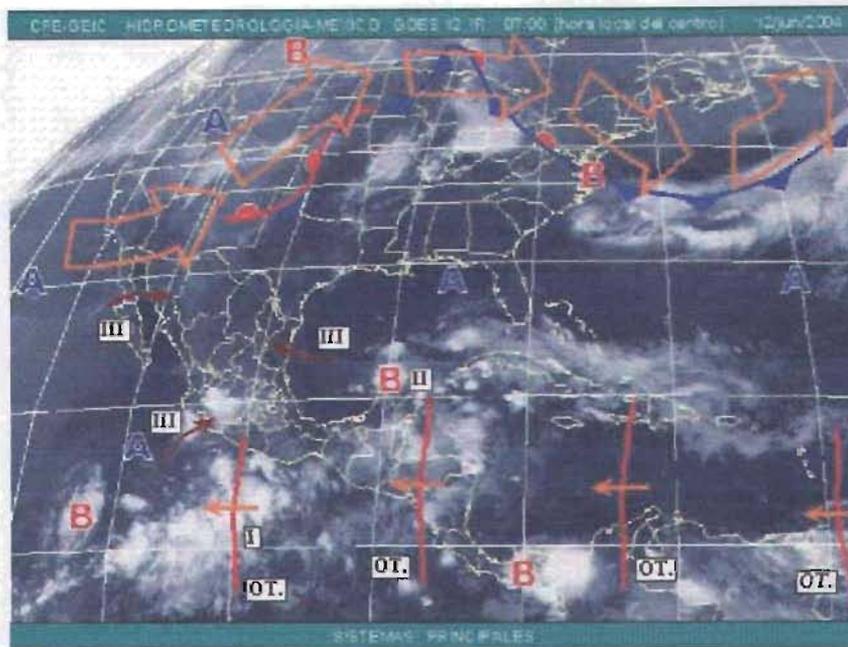


Figura 1.8 Onda tropical que afectó la región de estudio el día 12 de junio de 2004 con nublados, tormentas eléctricas y precipitación de moderada a fuerte. Imagen GOES 12 IR. Fuente: Comisión Federal de Electricidad, Dpto. de Hidrometeorología.

1.2.1.2 Huracanes

La ubicación de la región de estudio dentro de la parte centro del Golfo de México la hace vulnerable al paso de los ciclones tropicales, los cuales se presentan dentro del periodo mayo a noviembre.

Jáuregui *et al.*, (1995) documentan las trayectorias y precipitaciones pluviales provocadas por los huracanes y las tormentas tropicales que afectaron al estado de Veracruz en el periodo 1961 – 1990. Los autores mencionan que algunas de las tormentas tropicales que afectan al estado tienen su origen en la sonda de Campeche y el Golfo de México y que el periodo de mayor incidencia se presenta entre junio y noviembre, periodo en el cual se pueden presentar inundaciones considerables en el territorio veracruzano aún cuando los sistemas no alcancen un buen desarrollo. Las tormentas que se originan en el Atlántico y Mar Caribe son las más intensas que llegan a las costas del estado.

Además encuentran que en general “las tormentas tropicales y ciclones que afectan al sur del Golfo de México son ciclones poco desarrollado que al cruzar la península de Yucatán se debilitan y pueden o no intensificarse al aproximarse a costas veracruzanas y aterrizar como ciclones en etapa de disipación; los que atraviesan sobre la base de la península se debilitan (como el Abbie) o cruzan el centro o norte (como el Diana)”. La Tabla 1.8 contiene información de los sistemas que afectaron la región de estudio durante el periodo 1980 – 2002.

Tabla 1.8 Sistemas ciclónicos que afectaron la región de estudio durante 1980-2002. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional: Historia de ciclones; disponible en <http://smn.gob.mx/ciclones/historia/historia.html> (consultado en junio de 2003).

Año y océano	Nombre, *categoría al impacto, periodo (inicio y fin)	Lugar de entrada a tierra en México.	Estados afectados por vientos y lluvia.	Vientos máximos y lluvia máxima en 24 hrs
1999 Atlántico	DT2 2 al 3 de julio	Cazones, Tuxpan y Veracruz	Veracruz, Tamaulipas, San Luis Potosí e Hidalgo	55 km/hr, 317 mm en Tanzabaca, SLP.
1995 Atlántico	Roxanne Huracán categoría 3 8 al 20 de octubre	Tulum, Quintana Roo; Martínez de la Torre.	Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco y Veracruz	185 km/hr, 297 mm en Martínez de la Torre.
1984 Atlántico	Edouard Tormenta tropical 14 a 15 de septiembre	70 km. al este de Nautla	Veracruz. Entró a tierra entre Alvarado y Antón Lizardo (Luna Bauza, 1994)	65 km/hr.

* “Se refiere a la intensidad al momento del impacto en tierra en México, no a la intensidad del ciclón tropical en mar abierto”.

Dentro de los registros de sistemas ciclónicos del estado de Veracruz se encuentra, además, que en el pasado la región de estudio ha sido afectada significativamente por los sistemas siguientes:

1. Huracán de septiembre de 1888 que azotó a Veracruz y la cuenca alta del Papaloapan,
2. Huracán de 1931 que tocó primero Veracruz y luego la cuenca alta del Papaloapan, Huracán Item del 10 de octubre de 1950 que entró a tierra por Antón Lizardo,
3. Huracán Janet del 22 al 29 de septiembre de 1955, Tormenta tropical Dora (1956), Depresiones tropicales del 13 a 15 de junio y del 27 al 31 de julio de 1961,
4. Tormenta tropical Inga formada el 4 de noviembre de 1961 a unas 90 millas al este de Nautla,
5. Tormenta tropical Hallie del 20 al 21 de septiembre de 1966, Tormenta tropical Bess (1978), y
6. Tormenta tropical Herminia del 20 al 25 de septiembre de 1980.

Fuente: César Luna Bauza (1994)

La Figura 1.9 muestra las trayectorias de las tormentas estudiadas por Zehnder (1993) (mencionado por Jáuregui, 1995) que al aproximarse a unos 200 a 400 km de la costa presentaron una deflexión hacia el suroeste en dirección de las costas veracruzanas. Zehnder observa que algunos vórtices ciclónicos del sur del Golfo de México con trayectorias hacia el norte de los 23° de latitud norte, pueden recurvar hacia el suroeste al aproximarse a tierra debido al efecto topográfico.

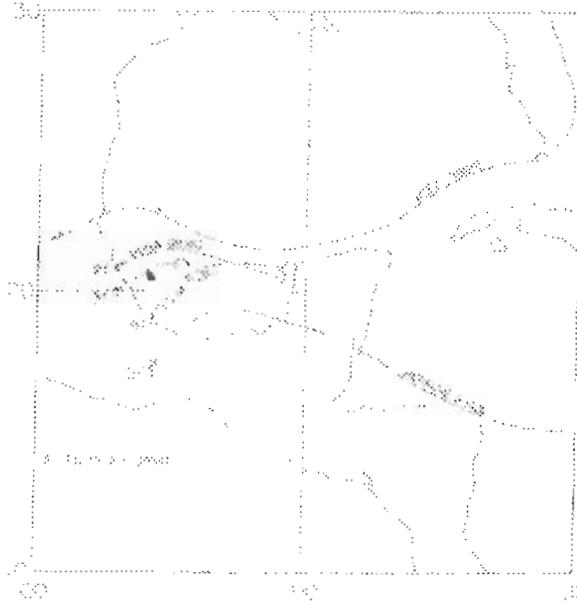


Figura 1.9 Trayectorias que han mostrado una recurvatura hacia el suroeste y que han impactado el territorio veracruzano. Imagen tomada de Jáuregui et al., 1995; p. 91.

La Figura 1.10 muestra la curva envolvente de probabilidad de que un huracán afecte a Veracruz dentro de un radio de 300 km; en ella se observa que “los sistemas ciclónicos que se encuentren frente a Chetumal tendrían una probabilidad de un 80% de penetrar por el arco de 180 millas con centro en Veracruz” (Jáuregui et al., 1995).

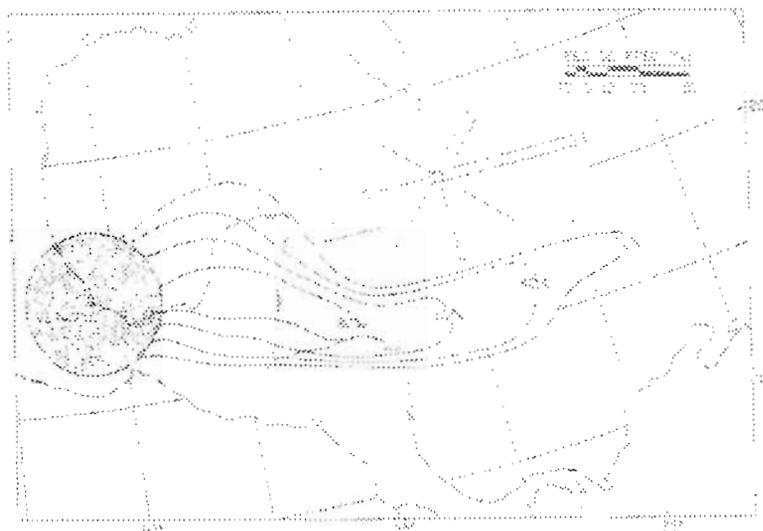


Figura 1.10 Envolvente de probabilidad de afectación de un sistema ciclónico sobre el estado de Veracruz. Imagen tomada de Jáuregui et al., 1995; p. 108.

En cuanto a la relación el fenómeno de El Niño y los ciclones del Golfo de México Jáuregui encuentra a partir de los registros del periodo 1961- 1990, que “los años con Niño (moderado o fuerte) son años de poca actividad ciclónica en el Golfo de México y en todo el Atlántico tropical”.

1.2.1.3 Nortes

La incursión de masas de aire polar durante los meses de octubre a mayo sobre la región de estudio, genera frecuentemente frentes fríos denominados Nortes. Este tipo de sistema es definido por Mosiño (1974) (mencionado por Pereyra *et al.*, 1995), como vientos boreales que soplan violentamente durante el invierno, de dos a tres días continuos sobre la planicie costera del Golfo de México.

Los Nortes afectan a la región de estudio con vientos fuertes cuyas intensidades pueden variar desde los 15 a los 105 km /hr., disminuciones sensibles en la temperatura en superficie y nublados en las cimas de las sierras que se encuentran de cara al Golfo (Tejeda *et al.*, 1989); además pueden generar pérdidas económicas ya que llegan a afectar la navegación, la pesca y a los cultivos.

1.3 Los elementos climáticos

El análisis del comportamiento medio y las fluctuaciones de los elementos climáticos (temperatura, precipitación, radiación, etc.) permiten elaborar la climatología de una determinada región. En esta sección se proporcionan los mapas climáticos generados a partir de los registros climáticos del periodo 1961 –1990 correspondientes a la precipitación media, temperaturas media, máxima y mínima promedio y a los fenómenos especiales, con el objeto de conocer el comportamiento espacial y temporal de estos elementos climáticos dentro de la región de estudio.

1.3.1 Temperatura

Del análisis de la climatología de cada una de las estaciones consideradas en este estudio se encuentra que en la mayoría de las estaciones ubicadas en la zona centro –sur de esta región, los valores más altos de temperatura media se presentan en el mes de mayo antes del inicio de la temporada de lluvias, excepto en Naranjal Fortín y Veracruz, ya que éstos se dan en el mes de junio, cuando inicia la temporada de lluvias.

En la zona norte, donde se ubican las estaciones de El Remolino, Martínez de la Torre y Tecuantepec, los valores mayores de temperatura media y mínima se dan en junio; mientras que las temperaturas medias más bajas en la región de estudio se dan en el mes de enero.

A continuación se proporcionan los mapas de temperatura máxima (Figuras 1.11a-1.11d), mínimas (Figuras 1.12a-1.12d), temperaturas medias (1.13a-1.13d) y de precipitación mensual (Figuras 1.15a-1.15d) correspondientes a los meses representativos del año (enero, abril, julio y octubre) y los mapas de temperatura media para el invierno (Figuras 1.14a) y para el verano (Figura 1.14b) del periodo 1961-1990 generados para la región de estudio.

Capítulo I

En todos los mapas de temperatura (Figuras 1.11 a a 1.14 b) los gradientes más fuertes se ubican en el transecto que une a las estaciones de Martínez de la Torre y Las Vigas de R. y el que une a Las Vigas de R. y Xalapa; situación debida a la disminución de la temperatura con la altitud.

Los gradientes más débiles se presentan en la zona sur de la región de estudio la cual abarca parte de la subprovincia de la llanura costera veracruzana, caracterizada por sistemas de lomeríos hacia el oeste y la llanura costera aluvial hacia el este.

En todos se observa que la isoterma de mayor valor se sitúa en las cercanías de la zona costera y la de menor valor al sotavento de la Sierra Madre Oriental y en las proximidades de Las Vigas de R., la cual resulta ser la estación ubicada a mayor altitud (2400msnm) respecto de las demás estaciones consideradas dentro de la zona centro del estado.

El patrón de isotermas del verano (Figura 14 b) muestra los valores más altos sobre la zona costera (27°C) y los valores más bajos sobre las zonas altas de la región (15°C). En el mapa de invierno (Figura 14a) la isoterma de mayor valor (22 °C) rodea a las estaciones de Rinconada, Soledad de Doblado y Veracruz, y la de menor valor alrededor de la estación de Las Vigas de R. (11 °C).

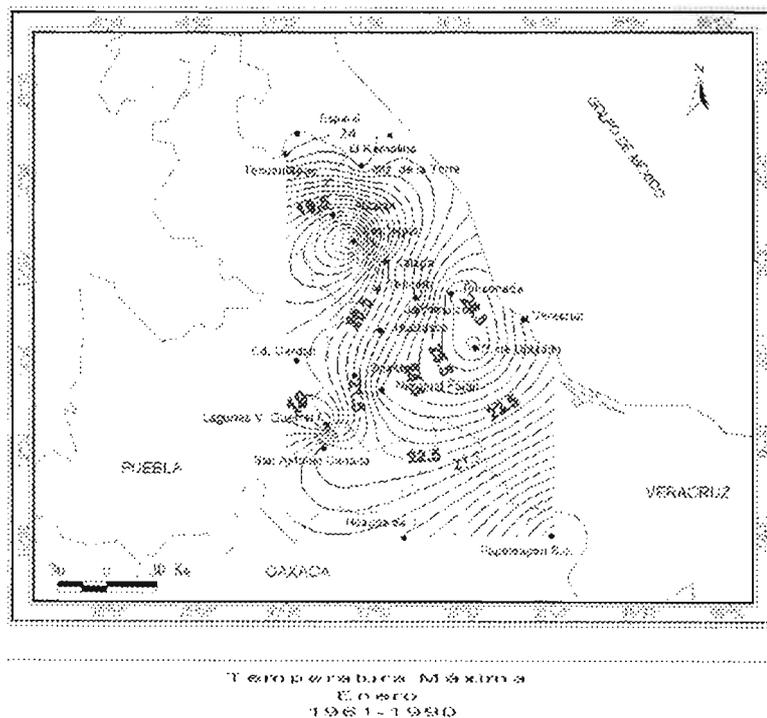


Figura 1.11a Temperatura máxima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990. Mes de enero.

Capítulo I

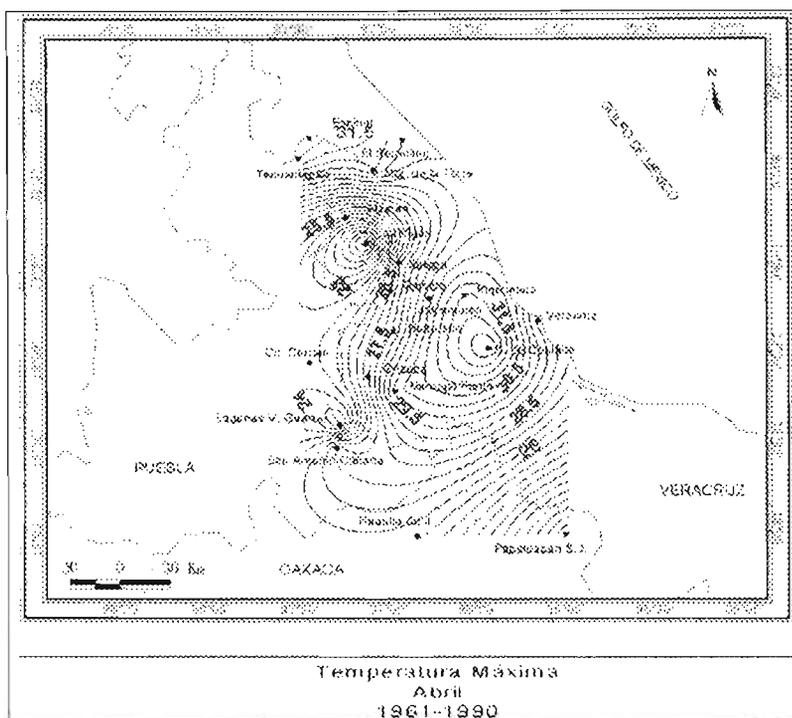


Figura 1.11b Temperatura máxima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de abril.

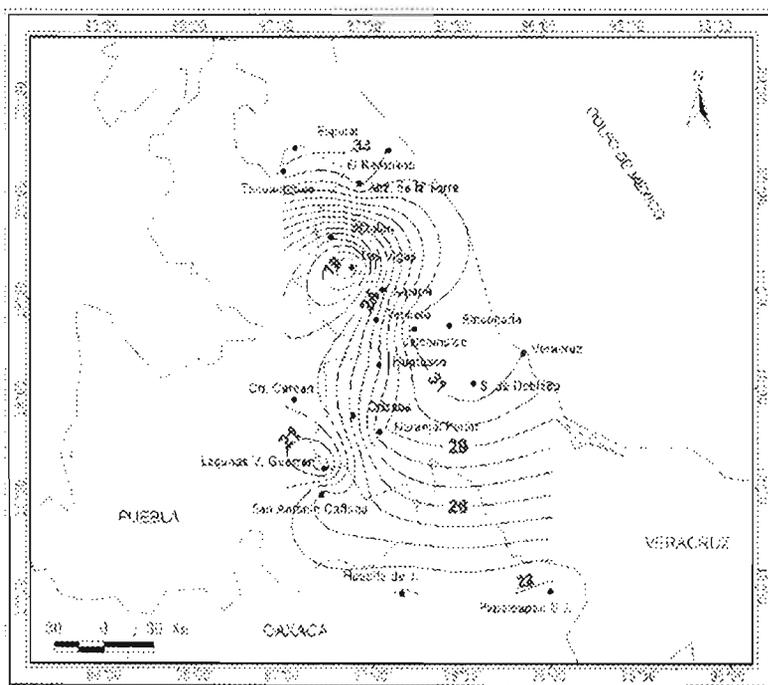
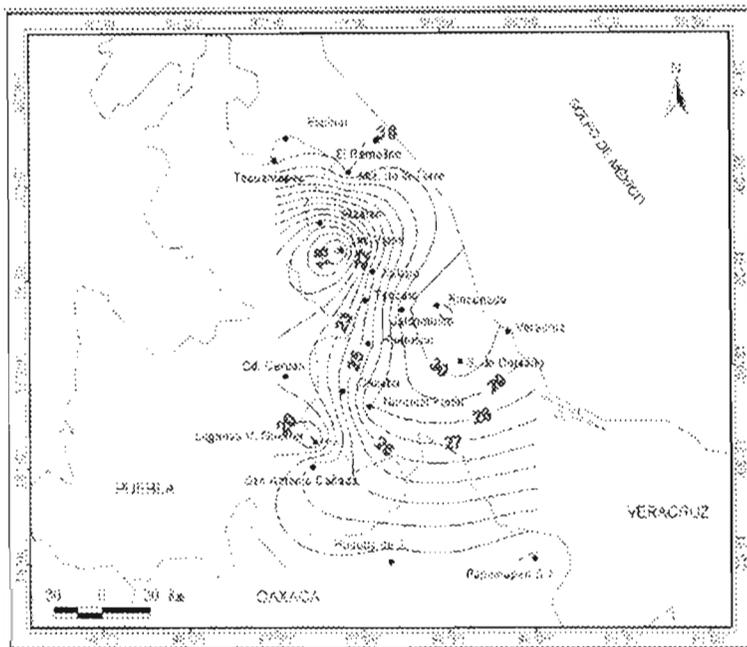
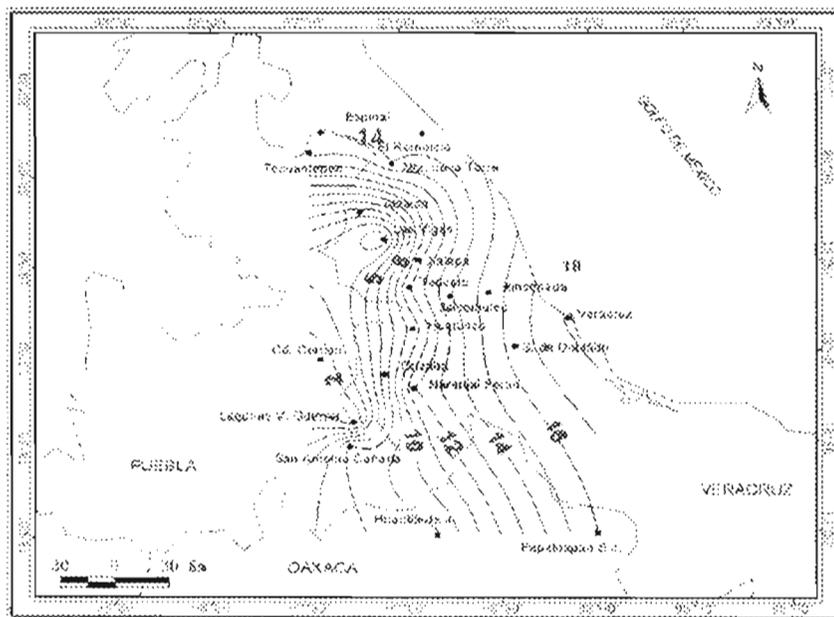


Figura 1.11c Temperatura máxima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de julio.



Temperatura Máxima
Octubre
1961-1990

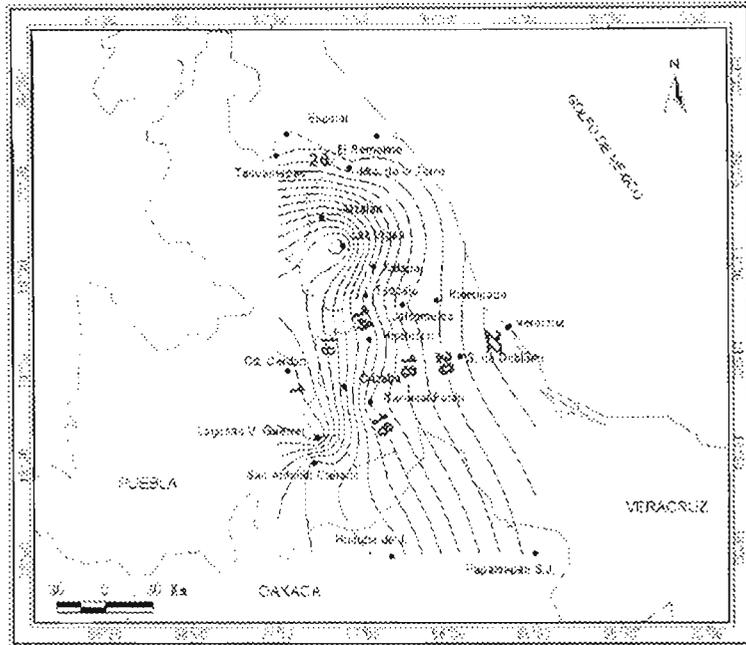
Figura 1.11d Temperatura máxima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de octubre.



Temperatura Mínima
Enero
1961-1990

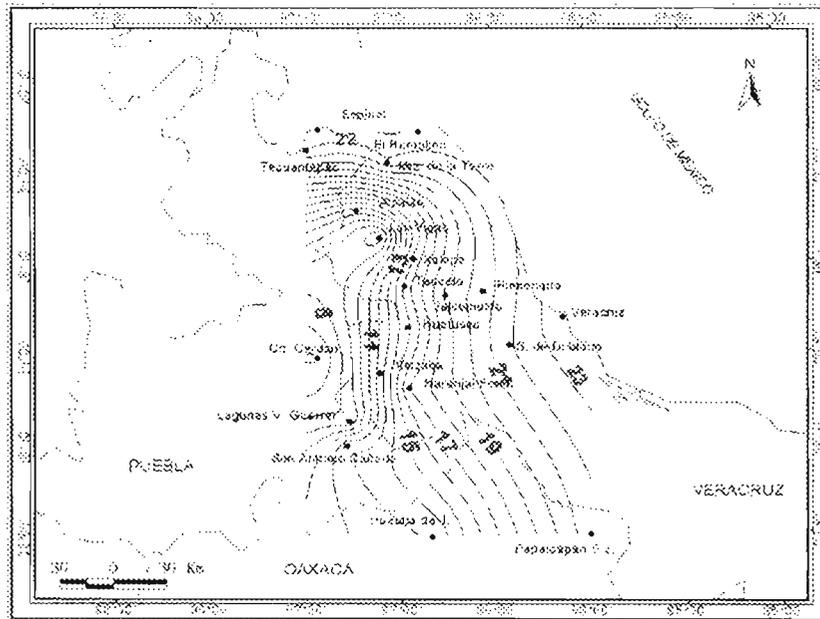
Figura 1.12a Temperatura mínima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de enero.

Capítulo I



Temperatura Mínima
Abril
1961-1990

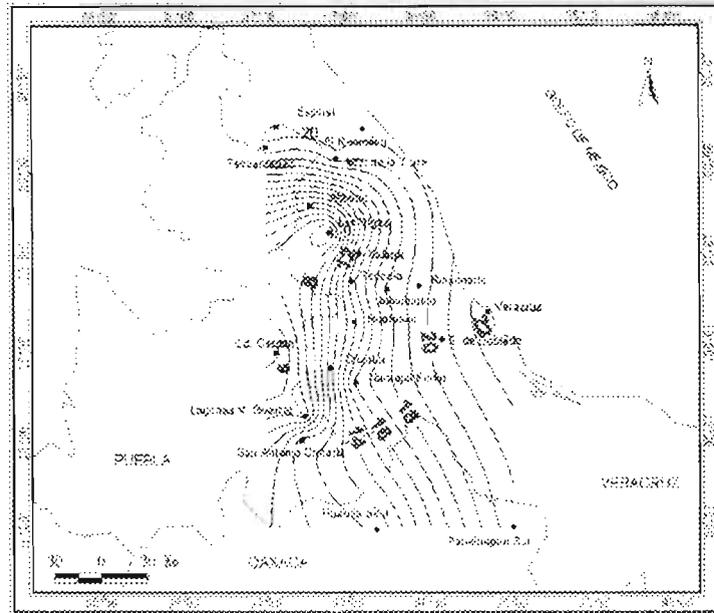
Figura 1.12b Temperatura mínima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de abril.



Temperatura Mínima
Julio
1961-1990

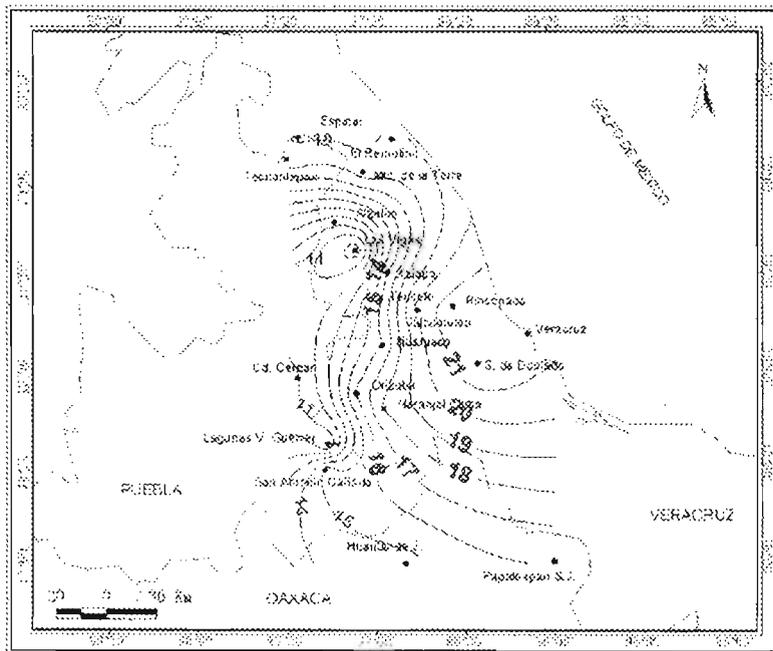
Figura 1.12c Temperatura mínima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de julio.

Capítulo I



Temperatura Mínima
Octubre
1961-1990

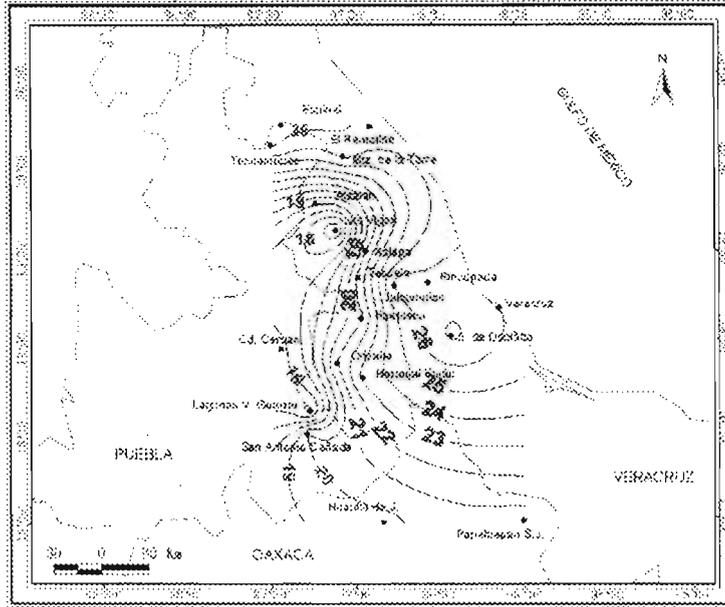
Figura 1.12d Temperatura mínima (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de octubre.



Escenario base 1961-1990
Temperatura media (°C)
Enero

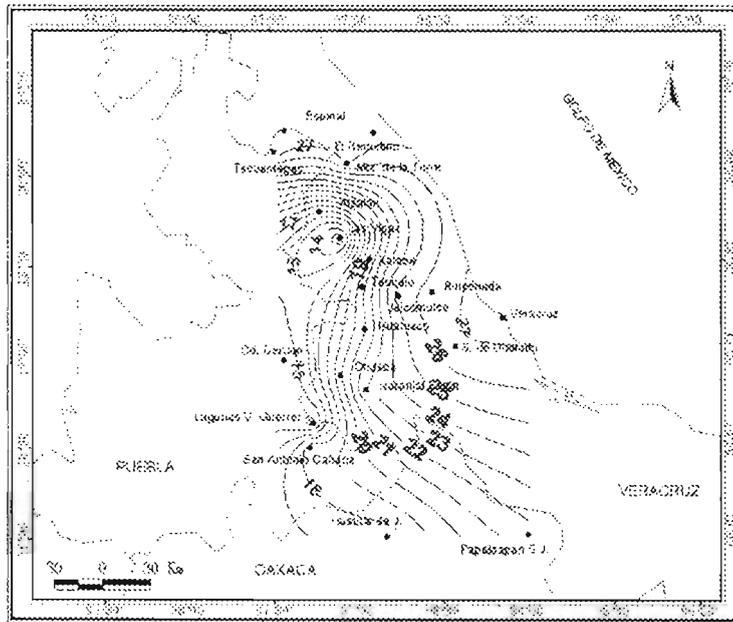
Figura 1.13a Temperatura media (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de enero.

Capítulo I



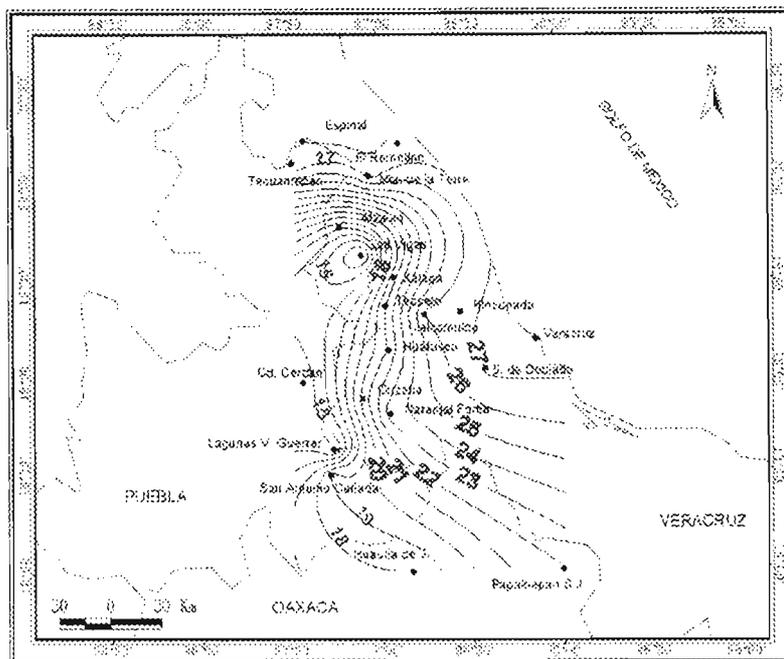
Escenario base 1961-1990
Temperatura media (°C)
Abril

Figura 1.13b Temperatura media (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de abril.



Escenario base 1961-1990
Temperatura media (°C)
Julio

Figura 1.13c Temperatura media (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Mes de julio.



Escenario base 1961-1990
 Temperatura media (°C)
 Verano

Figura 1.14b Temperatura media (°C) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Verano.

1.3.2 Precipitación

El mes de septiembre es el que registra el valor más alto de precipitación en las estaciones de El Remolino, Martínez de la Torre, Tecuantepec, Atzalan, Las Vigas de R. y Jalcomulco; mientras que para las estaciones de Teocelo, Huatusco y Xalapa resulta ser el mes de junio. En las estaciones de Rinconada, Veracruz, Naranjal Fortín, Soledad de Doblado, Espinal y Orizaba el valor más alto ocurre en el mes de julio (ver Tabla 1.9).

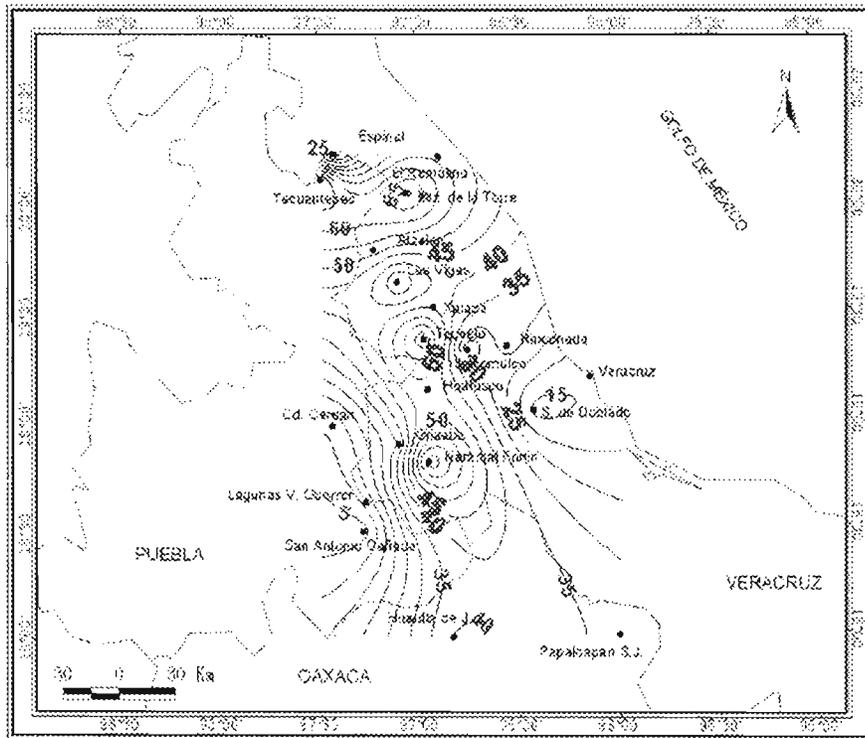
En los mapas correspondientes a los meses de enero (Figura 15 a) y octubre (Figura 15 d) se observan tres áreas de mayor precipitación sobre las estaciones de Teocelo, Naranjal Fortín, Tecuantepec y Veracruz. Las áreas de menor precipitación se encuentran por lo general en las estaciones de Las Vigas, Veracruz y Lagunas Vicente Guerrero, Puebla. Enero es el mes con valores más bajos de precipitación; las isoyetas de menor valor se ubican alrededor de Veracruz y Soledad de Doblado (15 mm) y hacia el sotavento de la gran sierra (5 mm).

Durante el trimestre de verano (Figura 1.16b) el patrón de isoyetas cambia marcadamente, ya que se forman dos especies de lenguas, una en dirección norte – sur hacia Soledad de Doblado (1040 mm) y la otra en dirección sur-oeste con centro de máxima sobre Orizaba y Naranjal Fortín (1160 mm). En la parte norte de la región de estudio la precipitación se incrementa hacia la Sierra Madre Oriental (Tecuantepec 920 mm) y en la zona sur hacia Huautla de J, Oax.

Capítulo I

Durante el invierno (Figura 1.16 a) los mayores valores de la precipitación se encuentran alrededor de Tecuantepec (210 mm), Martínez de la Torre (190 mm), Teocelo (170 mm) y Naranjal Fortín (170 mm); los valores más bajos se encuentran hacia la costa (Veracruz y Soledad de Doblado) y hacia el sotavento.

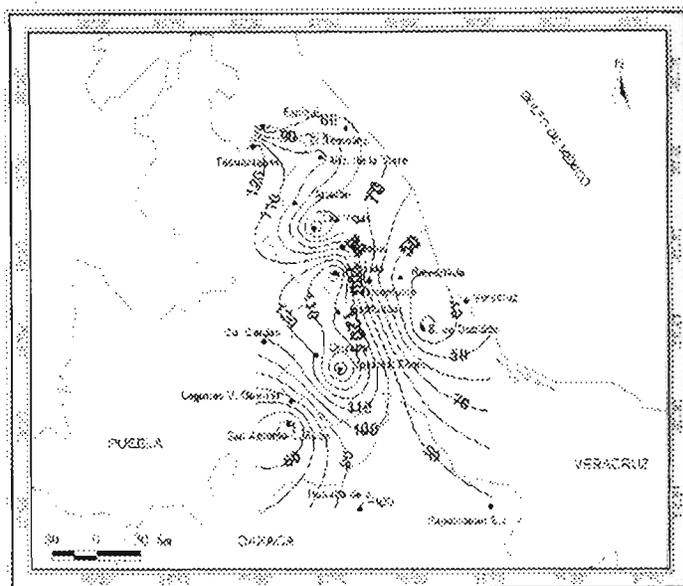
Los mapas de invierno (Figura 16 a) y verano (Figura 1.16b) siguen un patrón espacial de isoyetas similar al de los meses representativos, los valores muestran una disposición de incremento hacia los sitios con altitud mayor a los 600 msnm.



Escenario base 1961-1990
Precipitación (mm)
Enero

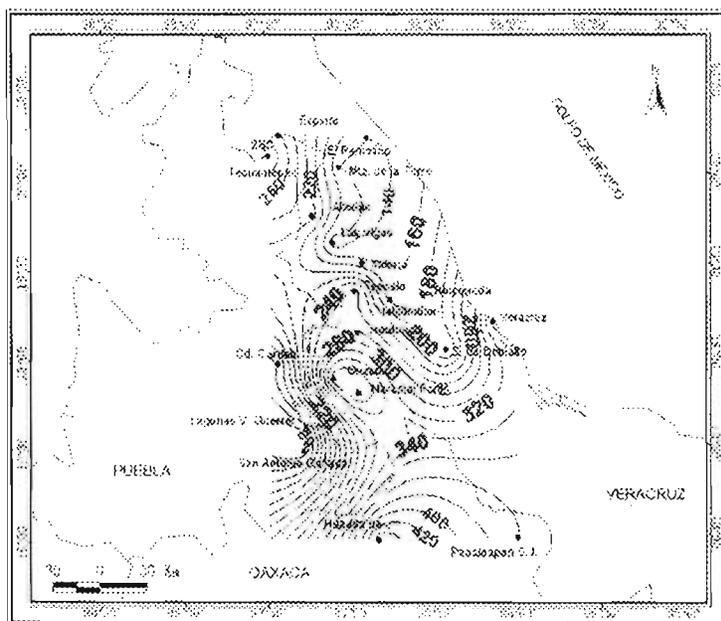
Figura 1.15a Precipitación mensual (mm) en la región centro del estado de Veracruz para los meses representativos de cada estación del año. periodo 1961-1990: Mes de enero.

Capítulo I



Escenario base 1961-1990
Precipitación acumulada (mm)
Abril

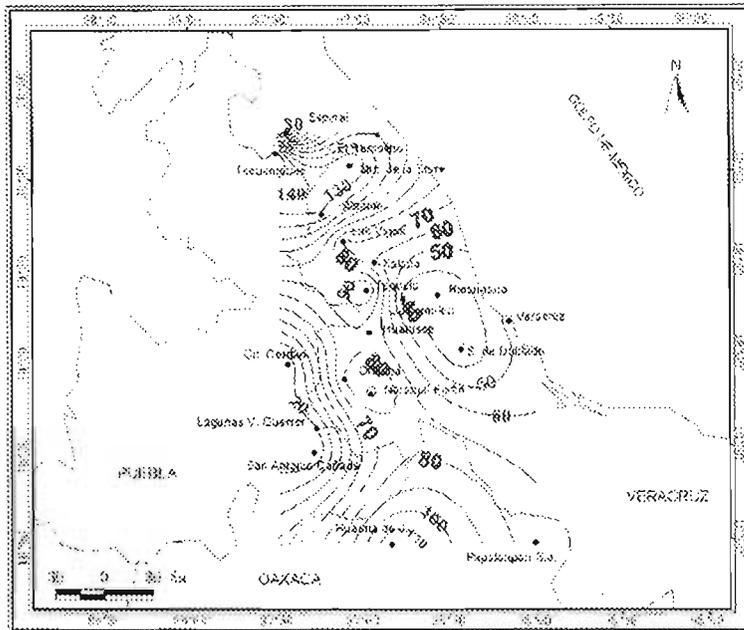
Figura 1.15b Precipitación mensual (mm) en la región centro del estado de Veracruz para los meses representativos de cada estación del año, periodo 1961-1990: Mes de abril.



Escenario base 1960-1990
Precipitación acumulada (mm)
Julio

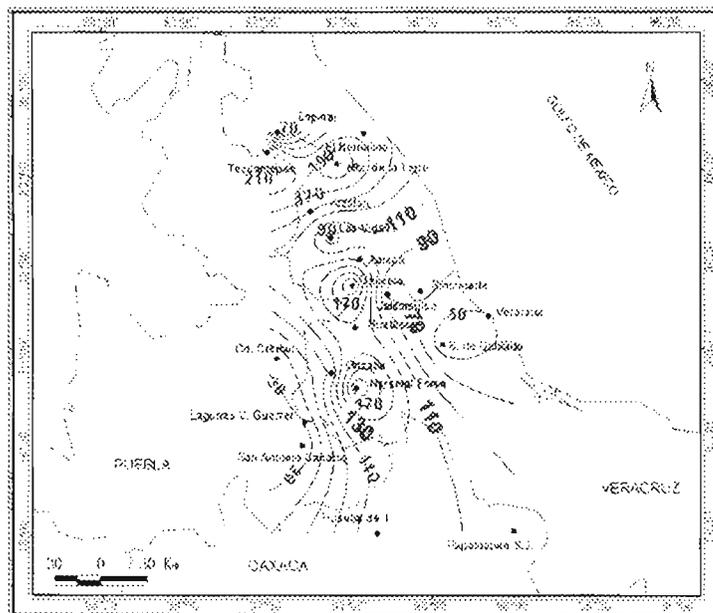
Figura 1.15c Precipitación mensual (mm) en la región centro del estado de Veracruz para los meses representativos de cada estación del año, periodo 1961-1990: Mes de julio.

Capítulo I



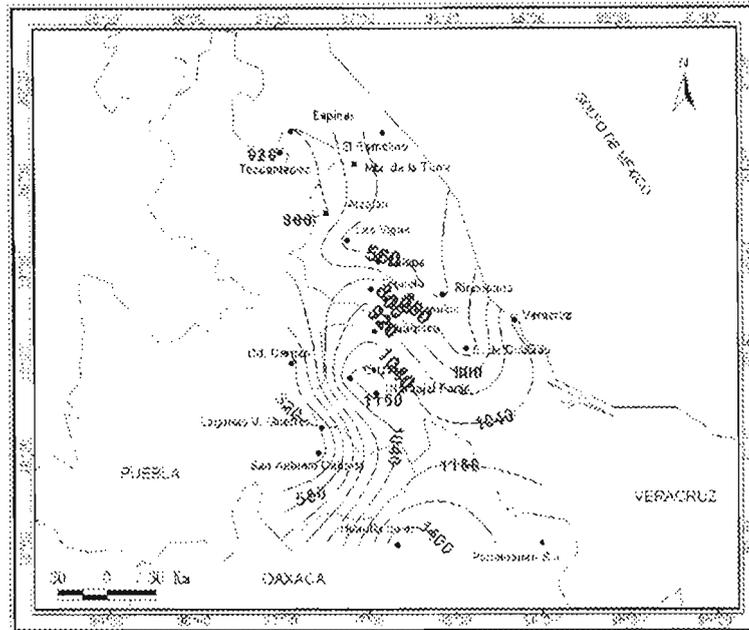
Escenario base 1961-1990
Precipitación acumulada (mm)
Octubre

Figura 1.15d Precipitación mensual (mm) en la región centro del estado de Veracruz para los meses representativos de cada estación del año, periodo 1961-1990: Mes de octubre.



Escenario base 1961-1990
Precipitación acumulada (mm)
Invierno

Figura 1.16a Precipitación media (mm) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Invierno.



Escenario base 1961-1990
Precipitación acumulada (mm)
Verano

Figura 1.16b Precipitación media (mm) en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: Verano.

1.3.2.1 Análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación.

Dentro de la dinámica de las lluvias, la canícula o sequía intraestival ocupa un lugar importante, ya que su presencia indica una disminución en las lluvias durante julio y agosto. Magaña (1999) menciona que este fenómeno en México, parece estar más relacionado con la alberca de agua caliente situada frente a las costas del Pacífico mexicano.

La Figura 1.17 muestra el comportamiento de la precipitación mensual, en donde se observan los máximos descritos anteriormente; en ella se aprecia el fenómeno de la canícula, para cada uno de los sitios considerados en el estudio. En la Tabla 1.9 se enlistan algunos aspectos del comportamiento de la precipitación.

A partir de la climatología de cada uno de los sitios considerados en la región de estudio, se observa que en la mayoría de las estaciones durante el verano se presenta el valor más bajo de precipitación el mes de agosto, excepto en la estación de El Remolino, el cual ocurre en julio.

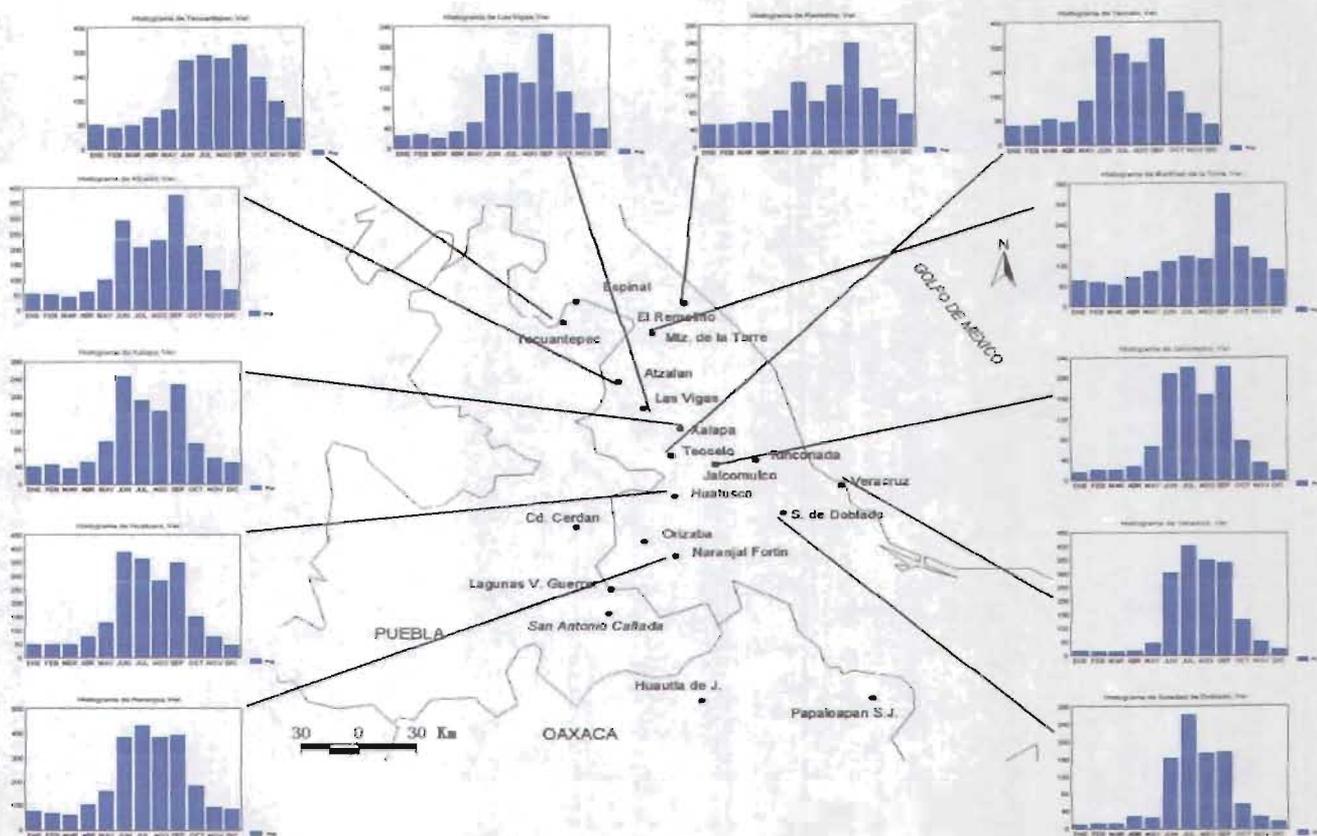


Figura 1.17 Distribución espacial de la precipitación en la región centro de Veracruz. Promedios mensuales (1961-1990).

Para la ciudad de Xalapa, Pereyra *et al.*, (1991) encuentran que las precipitaciones durante el periodo 1920 – 1985, presentaron una disminución de entre un 14.4% a un 11.1% en los años con Niños muy fuertes o muy débiles.

Pereyra (1994) relaciona la variación anómala de la precipitación que se da en el estado de Veracruz con el fenómeno El Niño. Encuentra que durante el evento El Niño disminuye o desaparece la sequía intraestival en la mayor parte del territorio veracruzano, excepto en la región alta del centro, “que incluye las estaciones de Xalapa, Naolinco y Orizaba, donde se incrementa la sequía”. El autor menciona que este tipo de sequía ocurre durante los meses de julio y agosto.

Capítulo I

Tabla 1.9 Algunas características del comportamiento de la precipitación media mensual en la zona de estudio.

Estación	Altitud (msnm)	Periodo con Pcp por arriba de los 100 mm	No. de meses	Mes del periodo con la Pcp más baja (mm)	Mes del periodo con la Pcp más alta (mm)	Presencia de cañícula
Veracruz	2	Jun. - Oct.	5	Oct. 133.5	Jul. 404.4	
El Remolino	35	Jun. - Nov.	6	Jul. 104.4	Sep. 238.2	X
Espinal	111	Jun. - Sep.	4	Jun. 245.1	Jul. 288.3	X
Martínez de la T.	152	May. - Dic.	7	May. 103.0	Sep. 330.2	X
Soledad de D.	183	Jun. - Sep.	4	Ago. 163.1	Jul. 262.2	
Tecantepec	250	Abr. - Dic.	9	Dic. 101.7	Sep. 343.2	X
Rinconada	313	Abr. - Dic.	4	Sep. 148.1	Jul. 188.2	X
Jalcomulco	330	Jun. - Sep.	4	Ago. 167.2	Sep. 221.7	X
Naranjal Fortín	697	Abr. - Oct.	7	Abr. 102.9	Jul. 430.2	X
Teocelo	1218	May. - Nov.	7	Nov. 102.5	Jun. 354.5	X
Huatusco	1344	May. - Oct.	6	May. 128.2	Jun. 386.7	X
Xalapa	1427	May. - Oct.	4	Jul. 166.8	Jun. 246.9	X
Atzalan	1842	May. - Oct.	6	Nov. 128.7	Sep. 373.9	X
Las Vigas de R.	2400	Jun. - Oct.	5	Oct. 111.2	Sep. 224.4	X

1.3.3 Fenómenos especiales

Los mapas correspondientes a los fenómenos especiales se generaron a partir de los datos de las Normales Climatológicas del SMN del periodo 1961-1990 para dos periodos: el de mayo a octubre, identificado como periodo húmedo y el periodo de noviembre a abril, identificado como el periodo seco en la región de estudio.

Los mapas de días con granizo (Figuras 18 a y 18 b) muestran los valores más altos sobre las estaciones de Las Vigas de R., Xalapa y Teocelo en ambos periodos de análisis, sin embargo, este fenómeno se presenta con mayor intensidad durante el periodo húmedo. En ambos mapas la isolínea de valor cero encierra la parte centro de la zona de estudio.

La zonas con el mayor número de días con tormentas eléctricas coinciden con las más lluviosas. Los mapas tanto del periodo húmedo como seco (Fig. 1.19a y 1.19b) muestra las isolíneas de mayor valor sobre la parte alta de la zona de estudio rodeando las estaciones de Xalapa, Teocelo, Huatusco, Orizaba y Naranjal Fortín y sobre la parte baja, rodeando la estación de Veracruz sólo en el periodo de mayo-octubre. Las isolíneas de menor valor se encuentran rodeando la estación de Rinconada y hacia el sotavento de la Sierra Madre Oriental. En el periodo de noviembre a abril representativo del periodo seco, la isolínea de mayor valor (6 días) rodea la estación de Teocelo (ver Figura 1.19 b).

Capítulo I

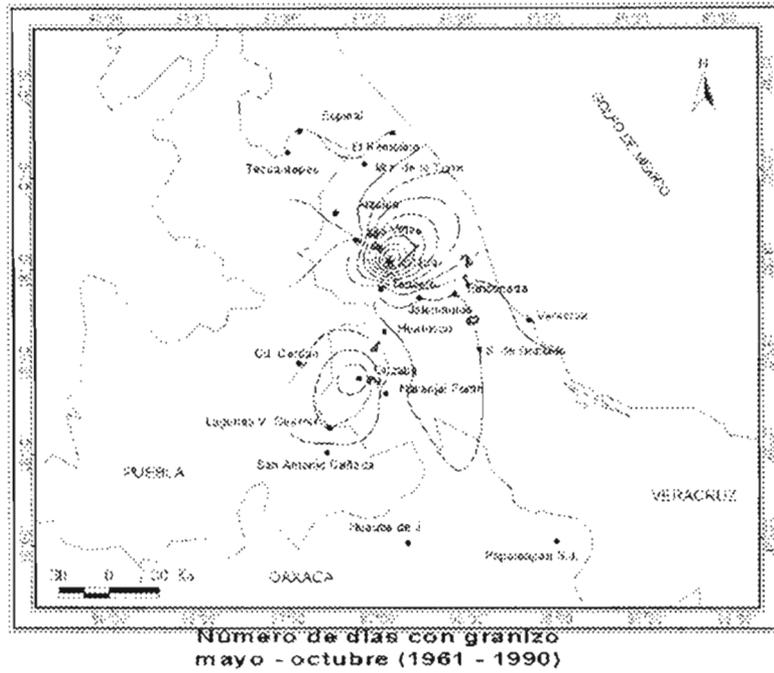


Figura 1.18 a) promedio de días con granizo en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: mayo – octubre (época húmeda)

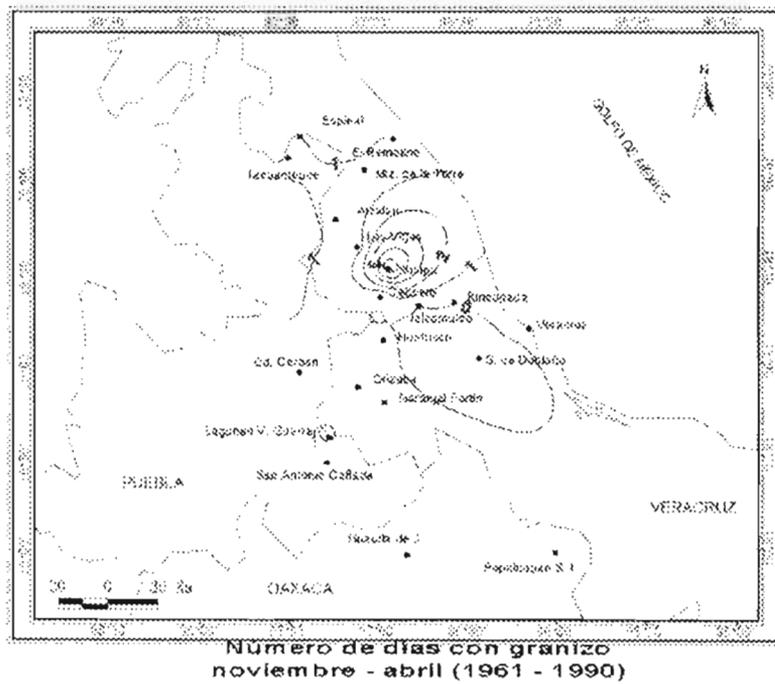


Figura 1.18 b) Promedio de días con granizo en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: noviembre- abril (época seca)

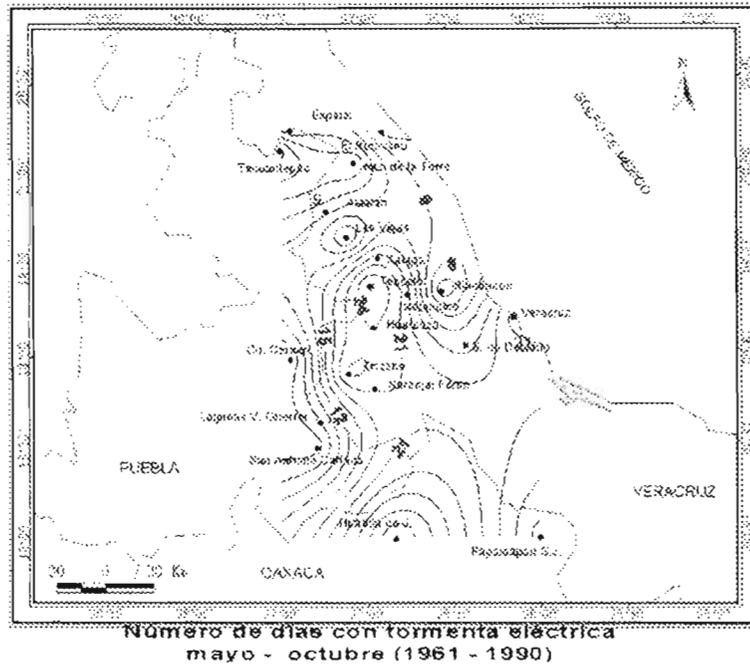


Figura 1.19 a) Promedio de número de días con tormentas eléctricas en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: mayo – octubre (época húmeda)

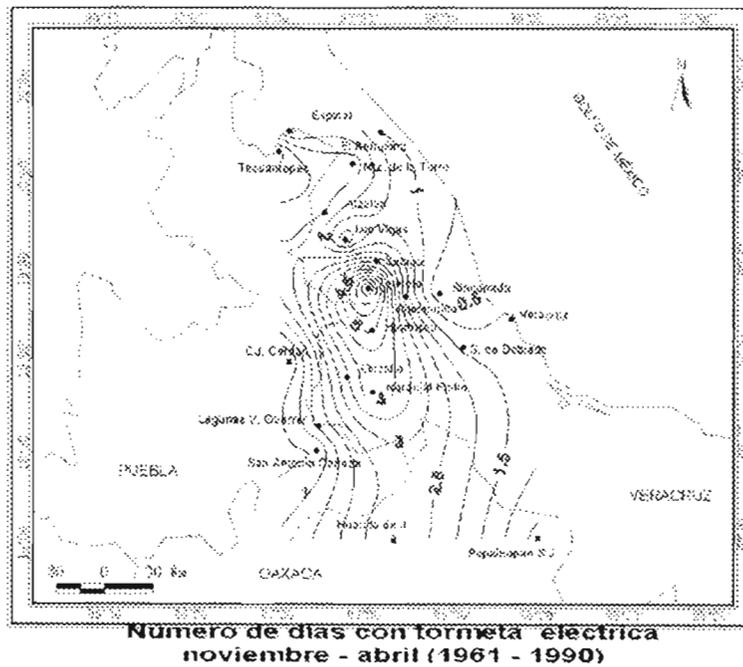


Figura 1.19 b) Promedio de número de días con tormentas eléctricas en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: noviembre- abril (época seca)

Respecto a las nieblas, Pereyra *et al.*, (1995) mencionan que en el estado de Veracruz se presentan en tres zonas principales: “ Las de las cimas montañosa que se presentan todo el año por el ascenso orográfico del aire y su enfriamiento adiabático; las que se ubican a sotavento de la sierra o en la línea costera y que se deben al enfriamiento radiativo en las madrugadas con cielos despejados; y las del norte del estado formadas por la llegada ocasional del borde occidental del anticiclón de la Bermudas – Azores”; los dos últimas tienen sus máximos en el invierno.

Cabe mencionar que las nieblas de radiación se relacionan con situaciones anticiclónicas, de calma atmosférica y cielos despejados ya que dan paso a enfriamientos nocturnos por irradiación, con inversiones térmicas y disminuciones de la capacidad de retención del vapor de agua del aire próximo al suelo, que alcanza el punto de rocío dando lugar a las nieblas.

En la Figura 1.20a se aprecia la ubicación de las estaciones respecto a la Sierra Madre Oriental y línea de costa. En ella se observa que salvo las estaciones de Soledad de Doblado (183 msnm) y Rinconada (313 msnm) que se encuentran en la llanura costera veracruzana, el resto de las estaciones registran días con niebla todo el año.

Del análisis de los histogramas contenidos en la Figura 1.20a, se encuentra que los valores más bajos de días con niebla se ubican al inicio o finales del verano; coincidiendo con los meses de junio y agosto, en el primero por ejemplo, se establecen los vientos alisios y en el segundo se tienen el paso de las ondas del este y la presencia de la canícula.

La figura 1.20b muestra el comportamiento espacial y temporal del promedio de días con niebla durante la época húmeda (may.-ago.) y seca (nov.-abr.) en la región de estudio.



Figura 2.20b Comportamiento espacial y temporal del promedio de días con niebla en el periodo 1961-1990 en la región de estudio. Fuente: Normales Climatológicas 1961-1990 (SMN).

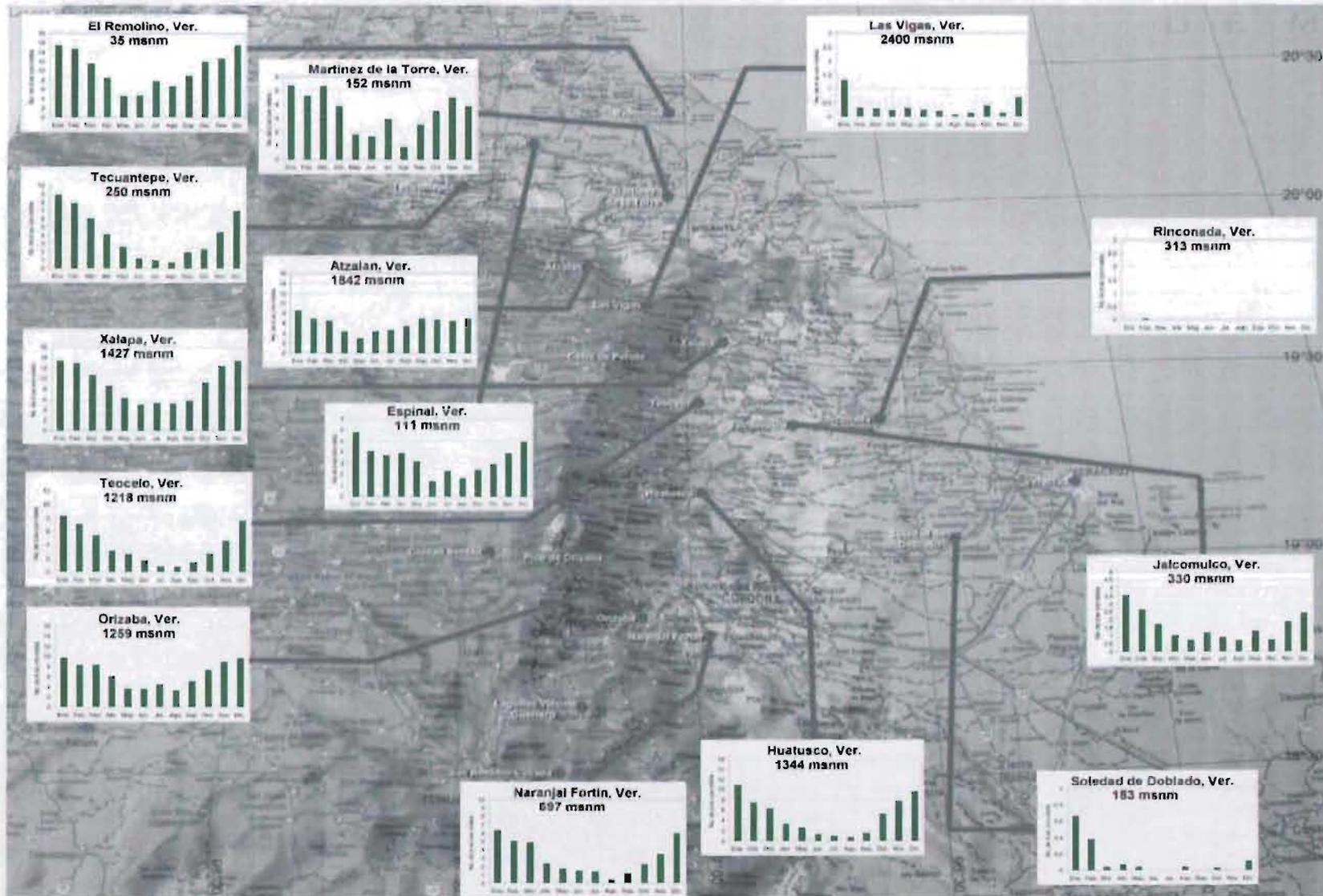


Figura 1.20a Distribución espacial y temporal del número de días con niebla en la región centro de Veracruz. Los gráficos muestran el comportamiento del número de días con niebla durante el periodo 1961-1990. El fenómeno se presenta con mayor intensidad en el invierno Fuente: Normales Climatológicas del SMN, periodo 1961-1990.

Capítulo I

De las Figuras 1.20a como 1.20b, se observa que el mayor número de días con niebla ocurre durante el invierno; estación del año en la cual se tiene las incursiones de las masas de aire polar por la vertiente del Golfo de México. También se aprecia que la estación de Las Vigas de Ramírez (2400 msnm) situada en el flanco oriental de la gran sierra, presenta valores muy bajos de días con niebla a lo largo del todo el año (0.3 días con niebla/año).

En mapa del periodo noviembre – abril (Figura 1.20c), las isolíneas de mayor valor de días con niebla en toda la zona de estudio. Los valores máximos se centran en Xalapa (1427 msnm) y Orizaba (1259 msnm), parte norte de la zona costera sobre la estación de El Remolino (35 msnm) y centro sobre la estación de Veracruz (2 msnm). De acuerdo Fitzjarrald (1986), mencionado por Pereyra *et al.*, (1995), “las nieblas de costa pueden ser reforzadas por el descenso del aire frío de la brisa de montaña, principalmente en el centro del estado y durante el invierno”.

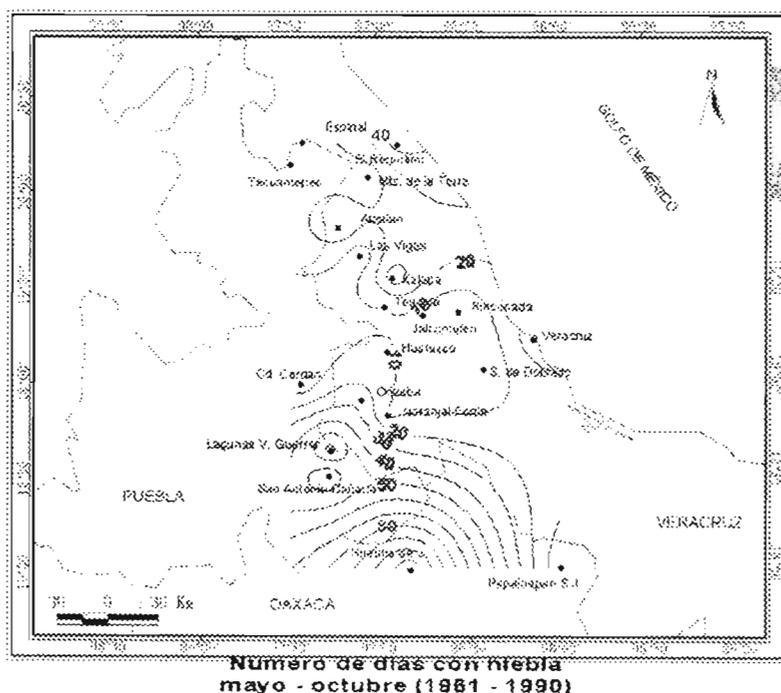


Figura 1.20 b) Promedio de número de días con niebla en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: mayo – octubre (época húmeda).

Capítulo I

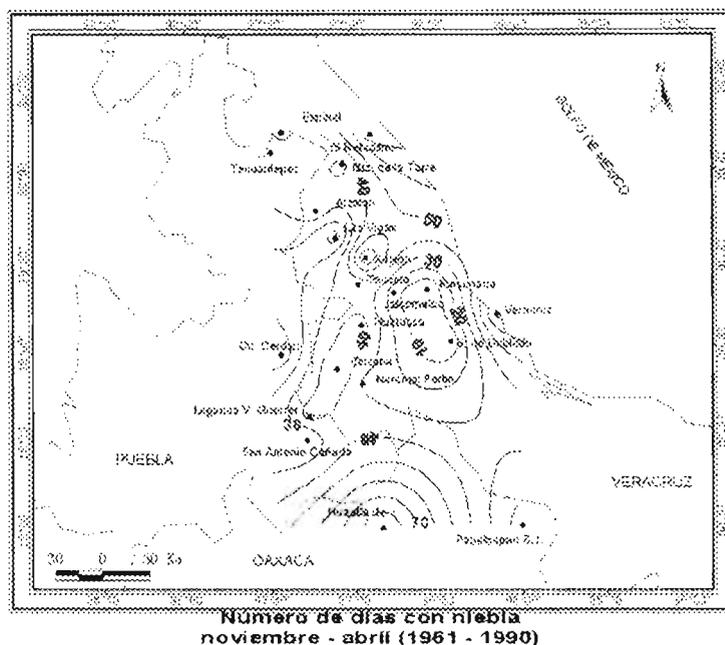


Figura 1.20 d) Promedio de número de días con niebla en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: a) noviembre- abril (época seca)

El mapa del periodo mayo a octubre de número de días con lluvia (Figura 1.21a) muestra un incremento del número de días con lluvia hacia la zona alta de Orizaba y hacia la zona norte y región costera central. Durante el periodo noviembre – abril (Figura 1.21b) los valores mayores se centran sobre Orizaba y Xalapa.

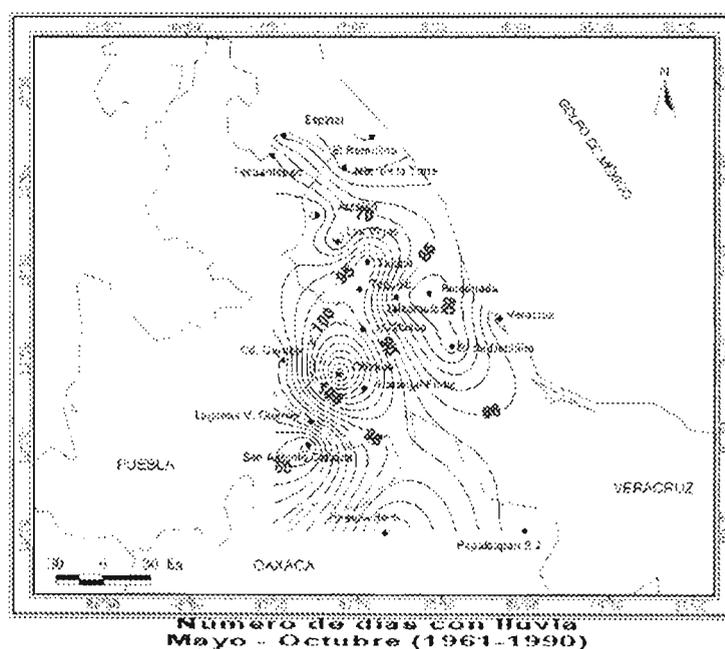


Figura 1.21 a) Promedio de número de días con lluvia en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: mayo – octubre (época húmeda)

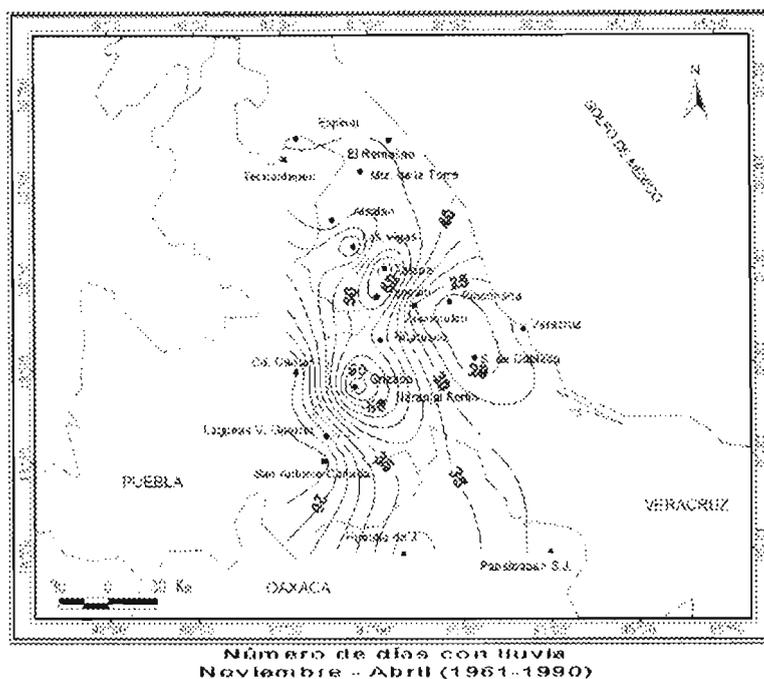


Figura 1.21 b) Promedio de número de días con lluvia en la región centro del estado de Veracruz, periodo 1961-1990: noviembre- abril (época seca)

Los mapas correspondientes a las heladas no se proporcionan debido a que las Normales Climatológicas del periodo 1961-1990 no contiene estos datos; por ello sólo se hace mención de los resultados de algunos de los estudios realizados sobre heladas para el estado de Veracruz en los que se mencionan algunos de los sitios de estudio.

Pereyra et al., (1992) correlacionan los Nortes que ocurren sobre la costa del Golfo de México con los tipos de helada que se presentan en Las Vigas, Ver. y encuentran una relación entre los Nortes fuertes y huracanados con las heladas negras que ocurren en el sitio de estudio, después de dos días del paso del sistema de vientos se tienen registros de temperaturas de hasta -10.5°C sin reporte de escarcha.

Sobre el fenómeno de nevadas, Soto *et al.*, (1989) menciona que se presenta “sólo en las partes más altas del Pico de Orizaba y Cofre de Perote. El primero de manera permanente presenta nieve en su cúspide, el segundo no la tiene en la época veraniega ni en los inviernos benignos”; y de manera ocasional las nevadas se pueden presentar en sitios con altitudes menores a los 3 000 msnm, como en el caso de Las Vigas y Altotonga.

1.3.4 Clima

El clima de una región queda definido por las condiciones más frecuentes de la atmósfera. Cualquier factor que altere la radiación recibida del Sol o la redistribución de energía en el sistema suelo – atmósfera – océano, se convierte en un agente de variación del clima.

Las variables climáticas que se emplean frecuentemente en las clasificaciones de climas son la temperatura y precipitación pluvial. A partir de ellas, se han generado algunos índices, como por ejemplo, el “Índice Anual de Thornthwaite” que proporciona el tipo de humedad (Fernández, 1996) y el “Factor de Pluviosidad de Lang” que aparece en la clasificación climática de Koeppen modificado por García (Soto *et al.*, 1989).

En la Tabla 1.10 se proporciona información sobre los tipos de clima que se encuentran en el territorio veracruzano y el porcentaje del área abarcada por cada uno de ellos (Soto *et al.*, 1989).

Tabla 1.10 Porcentaje del área ocupada por los climas presentes en el estado de Veracruz.

Tipo de clima	%
Fríos	0.04
Secos	0.20
Templados	4.74
Cálido	86.00
Semicálidos	9.10

Los factores que modifican su clima aparte de la latitud y altitud, son de acuerdo a Soto *et al.* (1989):

- El efecto de barrera climática que ejerce la Sierra Madre Oriental,
- La presencia del Cofre de Perote y del Pico de Orizaba, con sus efectos sobre la variedad de las condiciones climáticas de la zona,
- La saliente hacia el Golfo de México de la Sierra Madre Oriental, actúa como una barrera contra los Nortes para las zonas ubicadas al sur de ésta.
- La influencia oceánica de la corriente cálida del Golfo de México,
- Los alisios, los huracanes y otras perturbaciones.

Actualmente el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero y de aerosoles atmosféricos, se ha convertido en objeto de estudio, por sus efectos sobre el balance de radiación del sistema superficie – atmósfera.

1.3.4.1 Los climas de la región centro del estado de Veracruz

La Figura 1.22 muestra la distribución de los climas para la región de estudio. El mapa es una simplificación (realizada por los autores) del mapa de climas de CONABIO ("Climas. Clasificación de Köppen, modificado por García"; escala 1:1 000 000. México.)

El mapa se elaboró utilizando el SIG Arc View 3.2 y la agrupación de la información del mapa de CONABIO por grandes clases climáticas. El sistema de clasificación de climas considerado utiliza el Índice de Lang (mm/°C), el cual se obtiene de la división de la precipitación total anual entre la temperatura media anual.

De la Figura 1.22 se observa que la región de estudio puede ser dividida en tres grandes zonas de este a oeste: 1. La zona de climas de tipo cálidos, 2. La zona de climas de tipo semicálidos y 3. La zona de climas de tipo templados. Las tres zonas abarcan los subtipos húmedo y subhúmedo.

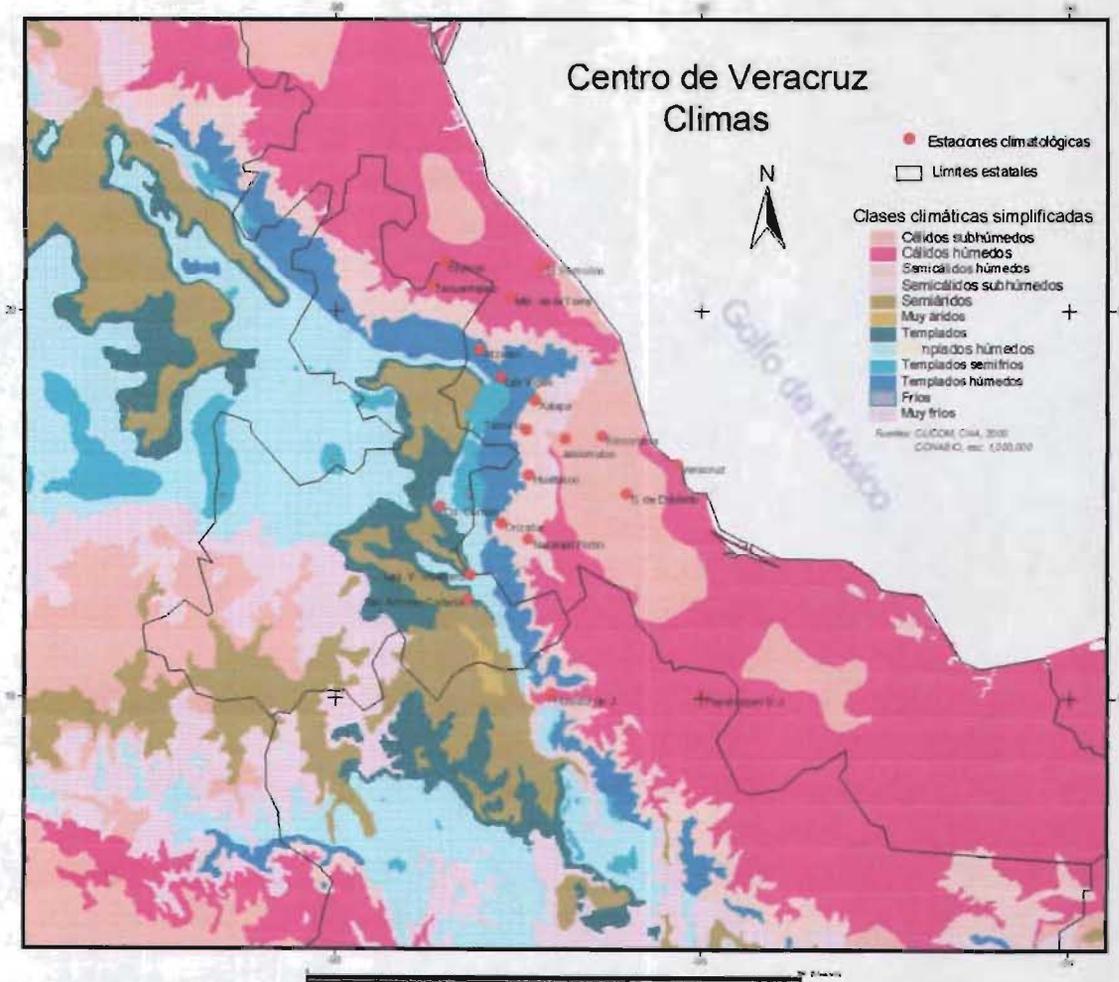


Figura 1.22 Mapa de climas de la región centro del estado de Veracruz; elaborado por Beatriz E. Palma Grayeb. Fuente: CLICOM, CNA 2000; CONABIO. escala 1 000 000.

1.3.5 Tendencias

El análisis del clima mediante series de tiempo en la región centro del estado de Veracruz, ha sido ya documentada por Hernández (2001) y Ojeda *et. al.* (1993) (mencionado por Hernández, 2001). Hernández realiza un análisis exploratorio de las tendencias climáticas para Veracruz y Las Vigas a partir de series de datos diarios para el periodo 1949 –1999, mientras que Ojeda utiliza series de datos mensuales del periodo 1923 – 1988 para Jalapa, Veracruz y Las Vigas.

En este trabajo de tesis se obtuvieron las ecuaciones de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas y de la precipitación, a partir de los datos diarios del periodo 1961 –1990 de las bases disponibles, el uso del paquete de cómputo Excel y el graficador de tendencias del paquete.

Se parte del supuesto de que, como primera aproximación la tendencia en estas variables puede ser caracterizada mediante un ajuste lineal de la serie de datos climáticos. El llenado de los faltantes de la series de temperaturas máximas y mínimas, se realizó con el método de correlación mediante el ajuste de una recta de regresión entre dos estaciones; las series de precipitación no requirieron de llenado. La Tabla 1.11 proporciona las ecuaciones de tendencia obtenidas.

De la Tabla 1.11 se observa que en la región de estudio se presentan tres tipos de clima y cuatro subtipos dentro de la clasificación de Koeppen modificado por García (desde los cálidos húmedos a los templados húmedos).

Considerando la agrupación de los datos de la tabla anterior por subtipos de clima húmedo y subhúmedo, se encuentra que la región puede ser dividida en zona norte y zona centro-sur. La primera agrupa estaciones ubicadas entre los 20° 10' y 19° 39' de latitud norte y la segunda a las estaciones entre los 19° 32' y 18° 49' latitud norte. En la Tabla 1.12 se resumen las tendencias más frecuentes de las variables analizadas.

Tabla 1.12 Tendencia general por variable, clima y zona.

Total de estaciones/Tipo de Clima	Zona de estudio			
	Norte		Centro-Sur	
	3 Cálidos húmedos	2 Templados húmedos	4 Cálidos subhúmedos	4 Semicálidos subhúmedos
T máxima	-	+	-	+
T mínima	-	-----	-----	+
Precipitación	+	+	+	-

(----- : No hay una tendencia definida)

Del análisis de los datos de la Tabla 1.11 se concluye que los lugares ubicados entre 20° 10' y 19° 39' de latitud norte con climas cálidos húmedos tienden a la disminución de las temperaturas máxima y mínima y al aumento de precipitación, y los lugares de climas templados húmedos tienden al aumento de temperatura máxima y precipitación.

Tabla 1.11 Tendencias de las variables climáticas de la región de estudio.

Estación	Altitud	Clima	Temperatura Máxima	r ²	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{año}}$	Temperatura Mínima	r ²	$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{año}}$	Precipitación	r ²	$\frac{\text{mm}}{\text{año}}$
Veracruz	2	Cálido subhúmedo	$y = -0.000004x + 28.49$	6.8×10^{-3}	-0.001	$y = -0.00003x + 22.85$	1.8×10^{-3}	-0.011	$y = 0.00004x + 3.70$	7×10^{-5}	0.015
* El Remolino	35	Cálido húmedo	$y = 0.000004x + 28.77$	9×10^{-4}	0.0015	$y = 0.00003x + 18.98$	7.8×10^{-4}	0.011	$y = -0.00001x + 3.73$	3×10^{-6}	-0.004
*Martínez de la Torre	152	Cálido húmedo	$y = -0.00004x + 30.53$	7×10^{-4}	-0.015	$y = -0.00007x + 20.81$	2.2×10^{-3}	-0.026	$y = 0.00017x - 0.13$	1.2×10^{-3}	0.062
Soledad de Doblado	183	Cálido subhúmedo	$y = 0.00003x + 30.23$	9×10^{-3}	0.011	$y = 0.00005x + 18.71$	2.5×10^{-3}	0.018	$y = 0.00003x + 1.87$	1×10^{-4}	0.011
*Tecuantepec	250	Cálido húmedo	$y = -0.00016x + 34.56$	1.5×10^{-2}	-0.058	$y = -0.00005x + 20.17$	1.1×10^{-3}	-0.018	$y = 0.00004x + 4.97$	7×10^{-5}	0.015
Rinconada	313	Cálido subhúmedo	$y = -0.00018x + 35.45$	3.7×10^{-2}	-0.066	$y = .0003x + 12.22$	8.9×10^{-2}	0.110	$y = -0.00008x + 4.87$	6×10^{-4}	-0.029
Jalcomulco	330	Cálido subhúmedo	$y = -0.000004x + 31.08$	2.5×10^{-3}	-0.001	$y = -0.00010x + 20.37$	7×10^{-3}	-0.037	$y = 0.000003x + 2.99$	8×10^{-7}	0.001
Naranjal Fortín	697	Semicálido subhúmedo	$y = -0.00006x + 29.65$	1.8×10^{-3}	-0.022	$y = 0.00006x + 13.91$	6.6×10^{-3}	0.022	$y = -0.00007x + 8.93$	2×10^{-4}	-0.026
Teocelo	1218	Semicálido subhúmedo	$y = 0.00004x + 23.69$	7×10^{-4}	0.015	$y = 0.0001x + 10.76$	2×10^{-2}	0.037	$y = -0.00007x + 7.54$	3×10^{-4}	-0.026
Huatusco de Chicuellar	1344	Semicálido subhúmedo	$y = 0.00012x + 22.55$	6.8×10^{-3}	0.044	$y = -0.00013x + 16.96$	3×10^{-2}	-0.047	$y = -0.00001x + 5.84$	6×10^{-6}	-0.004
Xalapa	1427	Semicálido subhúmedo	$y = 0.00012x + 21.74$	6.7×10^{-3}	0.044	$y = 0.00003x + 13.07$	9.8×10^{-3}	0.011	$y = 0.00002x + 3.34$	2×10^{-5}	0.007
*Atzalán	1842	Templado húmedo	$y = 0.00008x + 19.44$	2.4×10^{-3}	0.029	$y = 0.00007x + 8.044$	7.8×10^{-3}	0.025	$y = 0.0002x - 0.13$	1.2×10^{-3}	0.073
*Las Vigas de Ramírez	2400	Templado húmedo	$y = 0.0004x + 5.44$	1.5×10^{-1}	0.146	$y = -0.0003x + 14.33$	1.6×10^{-1}	-0.110	$y = 0.00001x + 2.64$	7×10^{-5}	0.004

r² Coeficiente de determinación.

*Estaciones de la zona norte.

Los sitios ubicados entre 19° 32' y 18° 49' de latitud norte con climas semicálidos subhúmedos tienden al aumento de las temperaturas máxima y mínima y a la disminución de la precipitación; mientras que los de climas cálidos subhúmedos tienden a la disminución de la temperatura máxima y al aumento de la precipitación; por lo que de acuerdo a Villers *et al.*, (2000) si el aumento en la temperaturas es tal que sobrepasa el rango de temperatura de los climas semicálidos la vegetación estaría expuesta a condiciones de estrés y se verían por ejemplo afectados los bosques mesófilos y templados; mientras que en el segundo la vegetación podría encontrarse expuesta a condiciones más frías y húmedas.

De lo anteriormente expuesto y a partir de los mapas de los elementos del clima y fenómenos especiales aquí presentados, se puede apreciar la relación que guardan éstos con los factores climáticos permanentes (latitud, orografía y distribución de tierras y aguas) presentes en la región de estudio.

Las temperaturas más altas se encuentran en las estaciones de Veracruz, Rinconada y Soledad de Doblado, las cuales se ubican en las cercanías de la zona costera de la región y presentan además los valores bajos de precipitación. Las temperaturas más bajas se observan en la estación de Las Vigas de Ramírez y en la zona occidental de la región que abarca parte del estado de Puebla.

Los valores más altos de precipitación muestran una disposición de incremento hacia los sitios con altitud mayor a los 600 msnm y hacia la parte occidental de la región de estudio. En la parte norte de la región la precipitación se incrementa hacia la Sierra Madre Oriental (Tecuatepec 920 mm) y en la zona sur hacia la estación de Huautla de Jiménez Oax. Los mapas de invierno y verano (Figuras 1.16 a y 1.16b) siguen un patrón espacial de isoyetas similar al de los meses representativos, los valores muestran una disposición de incremento hacia los sitios con altitud mayor a los 600 msnm.

Los fenómenos especiales granizo y número de días con lluvia muestran los valores más altos sobre las estaciones de Las Vigas de R., Xalapa y Teocelo en ambos periodos de análisis y la isolínea de valor cero encierra los sitios bajos, ubicados en la porción central de la zona de estudio. El mapa de tormentas eléctricas correspondiente al periodo mayo – octubre (Figura 1.19a) presenta los valores más altos y se sitúan en las estaciones de Veracruz, Teocelo, Huatusco y Xalapa; periodo en que se tiene la afluencia de las masas de aire húmedas y cálidas veraniegas, las cuales dan lugar a la formación de nubes de gran desarrollo vertical al barlovento de la Sierra Madre Oriental.

Las nieblas muestran por un lado estrecha relación con la orografía de la región y por otro con los sistemas locales (brisa marina y brisa terral) y la posición de sistemas anticiclónicos. Los valores más altos se encuentran a barlovento de la Sierra Madre Oriental y en las cercanías de la estación de El Remolino situada cerca de la zona costera en la parte norte de la región. Como se mencionó anteriormente, estas nieblas están asociadas con la elevación del aire húmedo por efecto orográfico o con la advección de aire más frío y fresco asociado con las invasiones de aire polar.

Capítulo I

El análisis de las series de datos diarios de temperaturas máximas y mínimas muestran una tendencia hacia la disminución en las estaciones ubicadas en la parte norte con climas cálidos húmedos (Tecuantepec, El Remolino, Martínez de la Torre), y hacia el aumento en los lugares con climas semicálidos húmedos de la parte centro – sur (Naranjal Fortín, Teocelo, Huatusco de Chicuellar y Xalapa). La tendencia en la precipitación muestra una comportamiento contrario al de la temperatura (Tabla 3.3).

Cabe mencionar que el uso de este sistema de clasificación de climas tiene sus ventajas en cuanto a que utiliza la información de temperaturas y precipitación promedio anual y permite por tanto, el uso de las salidas de los MCG de temperatura y precipitación para generar escenarios de cambio; sin embargo, tiene como desventaja que define los climas por grandes rangos de temperatura media anual, de manera que los incrementos proyectados por los MCG podrían no implicar un cambio en cuanto al tipo de clima; además no se considera la acción humana sobre el cambio de uso de suelo y crecimiento poblacional, factores que podrían tener relación con algunas de las tendencias mostradas en la Tabla 1.11.

Sin embargo, el análisis anterior es relevante para la evaluación de los posibles escenarios de cambio climático futuro, ya que algunos de esos escenarios apuntan a que las tendencias citadas prevalezcan o se agudicen. También pueden fundamentar investigaciones futuras relacionadas con el cambio de la variabilidad climática en condiciones de cambio climático.

2. Escenarios generados a partir de los modelos de circulación general CCC y GFDL-R30.

2.1 Los modelos climáticos

El estudio del clima requiere de considerarse tanto la interacción que hay entre los componentes del sistema climático (SC) (océanos, capas de hielo-nieve, continentes y ionosfera), como con los sistemas de circulación general y “ los procesos como el transporte y conservación de energía, de materia (gases y agua), y de momento” (Conde, 2003).

Por lo que la tarea de simular el clima resulta ser un trabajo complicado. Si consideramos que los componentes del SC están sujetos a los cambios que ocurran en el planeta Tierra, entonces el SC resulta ser un sistema inestable; por tanto, se le considera por como un sistema caótico, acoplado y con interacciones no lineales entre sus componentes.

Además puede presentar oscilaciones respecto a ciertos estados de equilibrio. La sensibilidad a pequeñas perturbaciones en las condiciones iniciales modifican su evolución, por lo que se hace difícil, la estimación del pronóstico climático (en escalas de un mes a una estación) o pronóstico de largo plazo con exactitud (Albritton *et al.*, 2001).

En la actualidad el pronóstico meteorológico o de corto plazo se realiza de manera más confiable, dado el avance que se tiene en el uso de radares, satélites meteorológicos y, en materia del pronóstico numérico del estado del tiempo.

Sobre el modelado del clima el Segundo Informe de Evaluación (SIE) del IPCC (Harvey *et al.*, 1997), menciona que “para la realización de pronósticos fiables que tengan en cuenta tanto las incertidumbres en las condiciones iniciales como las debidas a los modelos, se debe repetir la predicción muchas veces a partir de distintos estados de perturbación inicial para distintos modelos climáticos”: Es por ello que los resultados de tales predicciones, son dados en términos de las estimaciones o de la probabilidad de la forma en que evolucionaría el clima en un futuro a diversas escalas de tiempo: estacional, interanual o interdecadal.

Por otra parte, la simulación del clima se puede realizar tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Los procesos climáticos pueden ser representados en términos matemáticos mediante la aplicación de leyes físicas (ver Anexo I).
- Dada la complejidad del sistema climático resulta necesario emplear modelos numéricos para la estimación cuantitativa de los cambios climáticos futuros.
- Las componentes principales del SC deben ser representados mediante submodelos que consideren los procesos internos propios de cada uno, así como los que permiten su enlace con los demás componentes.
- La variabilidad natural del sistema climático y su respuesta a las perturbaciones, están determinadas por los procesos que rigen el sistema climático.
- Los modelos climáticos contienen los componentes del SC necesarios para simular el clima y son empleados dentro de la elaboración de proyecciones de cambios climáticos

ante distintos escenarios futuros de cambios en la concentración de CO₂ y de aerosoles para prever lo que podría ocurrir en un futuro.

2.1.1 Características generales de los modelos climáticos.

A partir del número de los componentes del SC que son modelados se establece el grado de complejidad del modelo y al mismo tiempo se le ubica, dentro de una jerarquía de acuerdo al número de dimensiones espaciales que contiene, el grado de detalle con que representa los procesos físicos, químicos y biológicos y, al grado de utilización de parametrizaciones empíricas.

De acuerdo al SIE (Harvey *et al.*, 1997) las diferencias más importantes que distinguen a los modelos de una jerarquía determinada son:

1. La cantidad de dimensiones espaciales del modelo. Hay modelos que utilizan una rejilla tridimensional (longitud, latitud, altura) o en una o dos dimensiones (latitud – altura) para representar las variables atmosféricas que varían continuamente en el espacio.
2. La resolución espacial. Está determinada por el espaciamiento entre los puntos de la rejilla horizontal utilizada para representar los valores correspondientes a las variables atmosféricas consideradas por el modelo, pudiendo abarcar varios cientos de kilómetros respecto a la superficie terrestre.
3. Las parametrizaciones. Estas pueden ser consideradas como modelos simples de procesos que en algunos casos no se deducen directamente de estudios de física atmosférica, sino de relaciones estadísticas
4. Los costos computacionales de la ejecución del modelo. Corresponde al tiempo que el equipo de cómputo requiere para efectuar los cálculos.

2.1.2 Tipos de modelos

Los modelos climáticos simples son los modelos simplificados empleados en la elaboración de las previsiones de los cambios de temperatura media mundial y el nivel del mar en respuesta a los escenarios de emisiones y concentraciones de CO₂.

Contienen módulos para calcular: la concentración de gases de efecto invernadero conforme a las emisiones futuras, el forzamiento radiativo resultante de las concentraciones de GEI y las emisiones de gases precursores de aerosoles calculadas, la respuesta de la temperatura media al forzamiento radiativo calculado, y la subida del nivel del mar ocasionada por la expansión térmica del agua marina y la respuesta de glaciares y capas de hielo.”

En la actualidad se emplean los escenarios socioeconómicos agrupados en el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SERES, por sus siglas en inglés; IPCC, WGIII, 2001), los cuales han sido construidos a partir de considerar distintas posibilidades de desarrollo global para los próximos 100 años.

Estos escenarios se encuentran agrupados en dos grandes familias: los escenarios ‘A’ y los escenarios ‘B’; los primeros “describen un mundo futuro con alto crecimiento económico”,

y los segundos “describen un mundo futuro con un crecimiento más moderado” (Conde, 2003).

Los modelos complejos contienen a los modelos de circulación general atmosféricos y oceánicos (MCGAO). Estos modelos contienen acoplados los componentes atmosféricos y oceánicos mediante modelos más simples (ver Anexo II) y en ellos se resuelven seis ecuaciones básicas: la ecuación hidrostática, dos ecuaciones para el movimiento horizontal y las ecuaciones termodinámicas de vapor de agua y continuidad de masa, necesarias para la descripción de la evolución a gran escala del impulso, el calor y la humedad para la atmósfera y el océano.

“Las ecuaciones se resuelven por lo general para cada periodo de media hora y emplean parametrizaciones para incluir los procesos físicos relacionados con las nubes y la convección oceánica”. La componente vertical del viento (w) se obtiene de manera diagnóstica de la convergencia de las componentes horizontales del viento (u, v), la suposición de equilibrio hidrostático atmosférico y el uso de coordenadas σ (Sellers *et al.*, 1987). En el Anexo III se presenta el diagrama de flujo de un MCG.

Las variables básicas del modelo son: la presión de superficie, las componentes horizontales del viento, temperatura, humedad y altura geopotencial; el grado de cambio está gobernado por las ecuaciones dependientes del tiempo (IPCC, 2001). En la componente dinámica los modelos incluyen los esquemas numéricos de los transportes atmosféricos de masa, energía y momento, y en la componente física los procesos físicos se modelan a través de subrutinas que consideran esquemas de radiación, capa límite, parametrización de la superficie, convección y precipitación a gran escala (Sellers *et al.*, 1987)

En el Anexo IV se proporciona un resumen de los tipos principales de modelos de clima atmosféricos y oceánicos a partir de la descripción contenida en el SIE (Harvey *et al.*, 1997).

2.2 Criterios de selección de los modelos

La aplicación de los modelos climáticos dentro del análisis de políticas de prevención sobre las posibles repercusiones que podría traer consigo el cambio climático, sobre la economías y ecosistemas naturales de los Estados Unidos de Norteamérica, condujo a las agencias responsables del Programa de Investigación U.S. sobre Cambio Global (USGCRP) a organizar en 1998 el Comité para el U.S. Nacional de Evaluación de los U.S. (USNA).

Este organismo durante el periodo 1998–2000 se abocó a la evaluación de las consecuencias potenciales medioambientales y sociales de la variabilidad climática y el cambio climático. Las evaluaciones sobre la vulnerabilidad al cambio climático se basaron en la proyección de las condiciones climáticas hacia el siglo XXI y en la selección y validez de los modelos climáticos para estudios de vulnerabilidad. Para tales evaluaciones fue desarrollado un conjunto de requerimientos necesarios para las simulaciones de los modelos climáticos (Mac Cracken *et al.*, 2003); concluyendo que en la medida de lo posible las simulaciones del modelo deberían:

Capítulo 2

- i. “Incluir representaciones claras de los procesos y retroalimentaciones del mezclado de la atmósfera, océanos y superficie terrestre (los modelos que tenían representaciones limitadas de los océanos no fueron incluidos).
- ii. Representar la evolución del clima como mínimo en el periodo 1900 a 2001, sobre la base de escenarios de emisiones bien documentados que incluyan la influencia de aerosoles de sulfato y GEI.
- iii. Tener la mayor resolución espacial y temporal posible, por lo general tan fina o mejor que 5° latitud, longitud.
- iv. Incluir el ciclo diario de radiación solar de modo que se puedan realizar estimaciones de los cambios en las temperaturas máximas y mínimas para usarlas en estudios de impactos en ecosistemas.
- v. Ser capaces de representar aspectos representativos de la variabilidad climática, tales como el ENSO.
- vi. Completar sus simulaciones en tiempo para la verificación de la calidad de la salida e interpolar a escalas más finas temporales y espaciales necesarias para estudios de impacto.
- vii. Usar modelos bien documentados
- viii. Ser propuestos por el centro responsable para uso en el desarrollo del TIE del IPCC (McCarthy *et al.* 2001);
- ix. Mostrar capacidad para conectar sus resultados con estudios de modelado regional de mayor resolución; y
- x. Proporcionar un arreglo comprensible de sus resultados disponibles en la Internet”.

Estas conclusiones describen lo que idealmente se espera en los estudios de cambio climático, no sólo para los Estados Unidos de Norteamérica sino también para otros países.

2.3 Confiabilidad de las simulaciones

Sobre este aspecto en el TIE (Albritton *et al.*, 2001) se menciona que “los modelos acoplados han evolucionado y mejorado considerablemente desde el SIE”; “con ellos es posible hacer simulaciones creíbles del clima por lo menos a escala subcontinental y en escalas temporales que van desde lo estacional a lo decenal”

Por otra parte, se reporta que “el aumento en la capacidad de estos modelos para reproducir las tendencias de aumento de la temperatura del aire en la superficie, durante el siglo XX como consecuencia de la mayor concentración de Gases de efecto invernadero y aerosoles de sulfato”, ha acrecentado la confianza sobre su capacidad para proyectar el clima futuro.

En el caso de la respuesta del clima regional a los aumentos de gases de efecto invernadero es necesario tomar en cuenta que dependerá de manera implícita de los cambios generales del clima a escala mundial, los cuales impactan sobre las variaciones en los procesos de retroalimentación como los producidos por las cubiertas de nieve y hielo marino y las nubes, así como en los vientos atmosféricos y las corrientes marinas.

Aún cuando ha habido avances en las simulaciones, estos modelos aún no pueden simular todos los aspectos del clima; sin embargo en el TIE se reporta que ha habido mejoras en cuanto a la simulación de las nubes y la humedad, por ejemplo.

En este trabajo se hace mención de tres reportes de investigación en los que se aborda el tema la capacidad de los MCG para simulaciones del clima futuro. Dentro de los resultados de los estudios compilados por el USNA se encuentran que:

1. Después de comparar las salidas de varios modelos de los centros de modelaje de los Estados Unidos, los modelos HadCM2 del Centro Hadley y el CGCM1 del Centro Canadiense podían ser usados en los estudios de vulnerabilidad para su región
2. Mitchell y Karoly (2001) encuentran que los dos modelos simulan razonablemente el registro histórico multidecadal de temperatura global en superficie a través del siglo XX debido a que en los Estados Unidos "el calentamiento observado se estimó haber sido de 0.3-0.8 °K, mientras que el calentamiento simulado para el mismo periodo por los modelos HadCM2 y CGCM1 fue de 0.4 y 1.05° K respectivamente", y
3. sobre la reproducción de la media anual y ciclo anual de precipitación a través de Norte América, B. Santer (2002) coincide, después de comparar la capacidad de 17 modelos climáticos que el modelo de Centro Hadley es el que mejor simula la dos variables en el periodo 1979-88 (Mac Cracken *et al.*, 2003).

De lo anteriormente expuesto se puede apreciar que a partir de estas investigaciones el modelo CCC ha sido seleccionado por el USNA para ser aplicado en estudios de vulnerabilidad, mientras que el modelo GFDL cumple con varias de las recomendaciones establecidas por este comité para la selección de MCG para estudios de vulnerabilidad.

2.4 Modelos seleccionados para este estudio.

En este trabajo se hace uso de las salidas de los modelos de circulación general CCC y GFDL-R30 para generar los escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz, México.

Estos modelos han sido empleados en gran parte de los trabajos desarrollados dentro del Estudio de País México por Conde *et al.* (1994), (Conde *et al.*; Magaña, Mendoza, *et al.*, Flores, *et al.*; Ferrer, *et al.*; y Jáuregui, *et al.*) en 1995 y en otras investigaciones: Magaña *et al.* (2000) y Conde (2003), para generar escenarios físicos regionales para la República Mexicana.

2.4.1 Características generales de los modelos seleccionados

El modelo CCC GCMII (T32 L10) surge en 1990. Es considerado como una versión dentro de la segunda generación del primer modelo desarrollado experimentalmente en 1989, en el Centro Canadiense para la Modelación y Análisis Climático del Servicio Atmosférico Ambiental de la Universidad de Victoria en British Columbia, Canadá (CCC, 2003).

El modelo GFDL-R30 se realizó en 1986 en los Estados Unidos de América en el Laboratorio de Geofísica de Dinámica de Fluidos localizado en Princeton, New Jersey. La designación R30 se debe a que tiene una resolución espectral tipo romboidal truncado en el número de onda 30. Las cuatro componentes mayores del modelo son un MCG espectral

Capítulo 2

atmosférico, un MCG oceánico y dos modelos relativamente simples de hielo marino y de procesos de superficie terrestre.

En el modelo se supone que hay una mezcla uniforme de CO₂ a través de la atmósfera (GFDL, 2003) y es usado para la generación de escenarios de calentamiento global, el análisis de sensibilidad y variabilidad climática y para el estudio del cambio climático para los siglos XX y XXI. En la Tabla 2.1 se algunas características generales de los dos modelos seleccionados.

Tabla 2.1. Características de los MCG seleccionados.

Características	Modelo	
	CCC	GFDL-R30
	De acuerdo a Magaña (2002) los dos MCGs son atmosféricos; por tanto, "el océano y la atmósfera no interactúan dentro del experimento".	
Representación horizontal	Espectral con transformación a rejilla Gaussiana ⁶ para cálculos de cantidades no lineales y algunas físicas (CCC, 2003).	Espectral. Los campos de las variables son representados por una serie truncada de armónicos esféricos (GFDL, 2003).
Resolución horizontal	Triangular espectral 32 (T32), equivalente a 3.75 x 3.75 grados de latitud (CCC, 2003).	Romboidal con truncación en el número de onda 30 (R30), equivalente a 2.25 latitud x 3.75 longitud (GFDL, 2003).
Resolución vertical	10 niveles (Magaña, 2000)	14 (Magaña, 2000)
Definición de malla	96 x 48 puntos (Magaña, 2000)	96 x 80 puntos (Magaña, 2000)
Incremento de temperatura arrojado bajo condiciones de calentamiento global	3.5 °C	4 °C
Tiempo de prevalencia de las condiciones de 1CO ₂ o 2CO ₂ supuestas en las salidas de los MCGs.	10 a 15 años (Magaña, 2000)	10 a 15 años (Magaña, 2000)

Sobre la truncación en los modelos espectrales Sellers *et al.*, (1990) menciona los siguientes:

- El número de ondas del truncamiento está relacionado con la resolución del modelo.
- Los modelos climáticos utilizan 15 a 30 ondas para la representación de cada variable con la altitud y nivel vertical.
- El número de truncamiento indica el número de ondas zonales que posee el modelo
- El truncamiento tiene como efecto la suavización de la orografía real (a mayor número de onda mayor aproximación a la línea de orografía real).

⁶ En este tipo de rejilla se consideran los procesos dentro de una formación de puntos red, denominados los puntos de intersección de Gauss: el número de puntos de intersección está relacionado con el tiempo de cálculo. (Sellers *et al.*, 1990: Pp 148)

2.4.2 Salidas de los modelos CCC y GFDL-R30

El programa para obtener el cambio de la temperatura mensual y el cambio en la precipitación mensual para cada una de las estaciones meteorológicas consideradas en la región de estudio, fue proporcionado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (adquirido durante el estudio de País del U.S. Country Studies Program). Para la generación de los escenarios de cambio climático se empleó la opción de interpolación de datos de los cuatro puntos de la malla más cercanos en ambos modelos climáticos.

El programa proporciona las salidas para condiciones actuales (1CO₂) o de una duplicación en la concentración de CO₂ atmosférico, la información es proporcionada dentro de un arreglo de filas y columnas como el mostrado en la Tabla 2.2. El ejemplo numérico corresponde a la salida del modelo GFDL R30 para el Observatorio de Veracruz, Ver., ubicado en los 19° 12' de latitud y 96° 08' de longitud, a 2msnm. El modelo CCC ofrece una salida similar.

Tabla 2.2 Salidas del modelo GFDL-R30

VALUES at -96.1 19.2 from GFD3									
Veracruz, Ver.									
MONTH	TEMPERATURE (°C)			PRECIPITATION (mm/DAY)			SOLAR (W/M ²)		
	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9
	1xCO2	2xCO2	Diff	1xCO2	2xCO2	Ratio	1xCO2	2xCO2	Ratio
1	17.7	19.8	2.16	2.8	4.3	1.56	162	140	0.86
2	18.2	21.1	2.97	3.3	2.7	0.82	179	204	1.14
3	19	21.7	2.77	3.1	3.8	1.22	225	219	0.97
4	21.3	23.7	2.47	3.9	3.9	1.01	244	241	0.99
5	21.4	23.6	2.26	7.5	7.9	1.06	204	203	1
6	20.6	23.2	2.62	13.2	18.3	1.38	151	142	0.94
7	20.4	23.2	2.74	16	17.4	1.09	135	148	1.09
8	20.7	23.5	2.72	16	21.5	1.34	133	137	1.03
9	20.5	23.4	2.85	11.3	15.5	1.37	118	123	1.04
10	19.2	21.9	2.71	6.5	7.3	1.12	110	126	1.15
11	17.8	20.5	2.69	3.5	4	1.15	124	127	1.02
12	17.2	20.1	2.91	3.3	3.9	1.17	143	136	0.96

La columna 4 (Col.3 – Col.2) proporciona los valores de la anomalía de temperatura para cada mes; la columna 7 (Col.6/Col.5) proporcionan la razón de cambio de la precipitación, y la columna 10 (Col. 9 / Col. 8) las anomalías de radiación para condiciones de 2CO₂.

2.5 Escenarios generados a partir de los modelos CCC y GFDL-R30.

Para la generación de escenarios físicos regionales para México de aplicación a estudios de vulnerabilidad, se tienen como referencia los métodos empleado por Conde *et al.*, (2000) en el estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal ante un

eventual cambio climático y Magaña *et al.*, (2000) para la evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático para México

Otra referencia actual sería el trabajo doctoral de C. Conde (2003) en el que realiza una revisión de los métodos aplicados para la realización de estudios de cambio climático. En él propone escenarios de cambio climático para la República Mexicana a partir de la interpolación simple de los MCG, empleando los escenarios de emisiones del IPCC.

Los primeros trabajos antes mencionados coinciden en aplicar los métodos por incrementos de temperatura (+ 2°C y + 4°C) y precipitación (10% y 20%) y por modelación utilizando las salidas de los modelos de circulación general GFDL-R30 y CCC. Magaña utiliza el primer y segundo método para el análisis del cambio climático regional y la determinación del grado de vulnerabilidad de cada una de las dieciocho regiones climáticas definidas por Arthur Douglas, mientras que Conde emplea el método de incrementos de temperatura de dos y cuatro grados centígrados, una modificación de la precipitación de un veinte por ciento, una combinación de estos incrementos y también el método de modelación utilizando los MCG antes mencionados.

Sobre el método por incrementos, Magaña menciona que es utilizado como una prueba de sensibilidad al calentamiento global bajo cambios uniformes en las condiciones climáticas, mediante la aplicación de incrementos arbitrarios de temperatura y precipitación. En cuanto al método de modelación, emplea la interpolación de los datos de los cuatro puntos de malla más cercanos para generar los escenarios de cambio climático a partir de las salidas de los MCG, correspondientes a experimentos de duplicación en la concentración de CO₂.

En este trabajo se hará uso del método por modelación utilizado por estos dos investigadores en sus trabajos, pero aplicando a las salidas de los modelos una reducción de la escala para adecuarlas a las condiciones climáticas y geográficas de la región de estudio; para lo cual se propone una metodología que permite ajustar esas salidas (y adicionarlas) a las condiciones de la región de estudio.

Los mapas de variación de temperatura y precipitación ante una duplicación de CO₂ se obtendrán de la interpolación de los valores correspondientes a la variación de la temperatura y razón de cambio de la precipitación obtenidos por los modelos para cada una de las estaciones meteorológicas consideradas. Los mapas correspondientes a estas variables se generaron con el paquete de cómputo Surfer 7.0.

2.5.1 La reducción de escala (downscaling)

El método de reducción de escala permite acoplar las salidas de los MCG de gran escala con modelos de escala regional para estimar a nivel local los cambios en las variables climáticas.

Unas de las dificultades con que se han encontrado los investigadores al tratar de acoplar modelos numéricos está relacionada con las diferencias en resolución entre los modelos; por tanto es importante conocer la manera en que se han definido los tipos de escala que se manejan dentro del modelado del clima.

Von Storch, *et al.*, (1993) definen dos tipos de escala para ser aplicadas a los MCG: una escala mínima definida como la distancia entre dos puntos vecinos de la rejilla del MCG (en la mayoría de los modelos es de 500 km), y otra denominada la escala útil la cual es mayor a N distancias entre puntos de la rejilla, la cual de acuerdo a Grotch y MacCracken (1991) es para valores de N mayores o iguales a 8.

A partir de esta clasificación la gran escala se aplicaría a escalas mayores que la escala útil y la escala regional a las escalas menores que la útil; ésta última podría abarcar de 2000 a menos de 4000 km.

De acuerdo a Wilby *et al.*, (1998), dentro de la metodología desarrollada para la reducción de escala se encuentran los métodos de regresión empírica, los de red artificial neuronal, los patrones de tiempo, la aplicación de índices de flujo de aire, los generadores estocásticos de tiempo y los modelos de área limitada.

2.5.1.1 Reducción de escala de los modelos CCC y GFDL-R30 para el centro del estado de Veracruz.

En este trabajo se propone una técnica basada en la aplicación de herramientas estadísticas para “reducir la escala” de las salidas de los modelos de circulación general CCM y GFDL.

La técnica permiten adecuar las temperaturas (T_1) y precipitaciones (Pcp_1) obtenidas en las salidas de los MCG para condiciones de $1CO_2$ atmosférico a la escala de la región centro del estado de Veracruz.

Primero se encuentran mediante regresiones los modelos estadísticos que permiten corregir a T_1 y Pcp_1 a partir de correlacionar los valores normales de temperatura y precipitación con la altura, latitud, longitud y la temperatura (o precipitación) de cada MCG considerado, y posteriormente se estiman los factores de corrección para el incremento en la temperatura y la razón de cambio de la precipitación proporcionado por el modelo GFDL30 y CCCM para condiciones de $2CO_2$.

2.5.1.2 Datos

Las regresiones se obtuvieron a partir de correlacionar los datos correspondientes a la altitud, latitud y longitud con los datos promedio mensual de temperatura o precipitación, de 65 estaciones climatológicas y tres observatorios meteorológicos ubicados en la zona de estudio (ver Tabla 2.3). Los datos de las variables atmosféricas corresponden a las Normales Climatológicas proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional para el periodo 1961 – 1990.

Capítulo 2

Tabla 2.3 Estaciones que se encuentran dentro de región de estudio (cuadrante: 18° 30' a 20° 15' latitud norte y 95° 30' a 97° 30' longitud oeste)

No. Prog.	No. de Estación	Estación	Latitud (Grados y minutos)	Longitud (Grados y minutos)	Altura (msnm)
1	30192	Veracruz	19.20	96.13	2
2	30191	Vega de la Torre	20.03	96.63	10
3	30153	Rafael Mtz. de la Torre	20.18	96.90	12
4	30222	Santa Ana Alto Lucero	19.85	96.52	12
5	30126	Paso del Cedro Actopan	19.53	96.37	15
6	30094	Los Capulines Cotaxtla	18.87	96.33	18
7	30050	El Faisan Paso de Ovejas	19.30	96.37	20
8	30199	Zempoala Ursulo Galvan	19.50	96.50	25
9	30193	Jose Cardel La Antigua	19.38	96.38	29
10	30055	El Remolino Papantla	20.17	96.88	35
11	30101	Manlio Fabio Altamirano	19.15	96.33	44
12	30158	Santa Rosa Actopan	19.45	96.45	68
13	30112	Mozomboa Actopan	19.50	96.45	70
14	30165	Tamarindo Puente Nacional	19.38	96.48	80
15	30137	Puente Nacional	19.33	96.40	110
16	30058	Espinal Espinal	20.25	97.42	111
17	30079	Joloapan Papantla	20.23	97.27	125
18	30068	Los Idolos Actopan	19.40	96.53	143
19	30132	Poza Rica de Hidalgo	20.55	97.47	150
20	30060	Fanal de Nautla	20.07	97.05	151
21	30102	Martínez de la Torre	20.07	97.05	152
22	30021	Carrizal E. Zapata	19.33	96.50	174
23	30163	Soledad de Doblado	19.05	96.42	183
24	30106	Melchor Ocampo	20.33	97.53	200
25	30154	Santa Ana Chumatlan	20.25	97.58	210
26	30173	Tecuan-tepec	20.15	97.52	250
27	30003	Actopan Actopan	19.50	96.62	311
28	30141	Rinconada E. Zapata	19.35	96.55	313
29	30076	Jacomulco Jacomulco	19.33	96.75	330
30	30002	Acazonica Paso de Ovejas	19.22	96.58	410
31	30108	Misantla, Misantla	19.93	96.83	410
32	30195	Emiliano Zapata	19.48	96.78	425
33	30145	San Alejo Paso del Macho	18.93	96.77	495
34	30155	Santa Aruta Atoyac	18.93	96.80	585
35	30047	El Coyol Comapa	19.12	96.70	610
36	30219	Puente Enrique Tonapa	19.93	97.20	650
37	30115	Naranjal Fortín	18.82	96.95	697
38	30007	Almolonga Naolinco	19.58	96.80	710
39	30151	San Miguelito Cordoba	18.87	96.88	817
40	30010	Amatitla Axocuapan	19.22	96.58	905
41	30015	Bella Esperanza Coatepec	19.43	96.87	975
42	30061	Fortín de las Flores	18.90	97.00	1016

Capítulo 2

43	30267	La Concepcion Jilotepec	19.60	96.88	1130
44	30179	Teocelo Teocelo	19.38	96.97	1218
45	30164	Sumidero Orizaba	18.87	97.07	1227
46	30026	Coatepec Coatepec	19.45	96.95	1252
47	Obs.	Orizaba Orizaba	19.85	97.10	1259
48	30066	Huatusco de Chicuellar	19.15	96.95	1344
49	30089	Las Minas Las Minas	19.68	97.13	1365
50	30187	Totutla Totutla	19.23	96.95	1426
51	30228	Jalapa Enriquez Jalapa	19.53	96.92	1427
52	30032	Coscomatepec Bravo	19.07	97.03	1588
53	30114	Naolinco de Victoria	19.65	96.87	1605
54	30012	Atzacan Atzacan	19.80	97.22	1842
55	30052	Elotepec Huatusco	19.20	97.03	1860
56	30008	Altotonga Altotonga	19.75	97.25	1899
57	30074	Jalacingo Jalacingo	19.82	97.32	1944
58	30040	Chiconquiaco	19.77	96.87	2070
60	30198	Zalayeta Perote	19.42	97.35	2300
61	30186	Totalco Perote	19.58	97.33	2330
62	30128	Perote Perote	19.58	97.27	2394
63	30211	Las Vigas Las Vigas	19.65	97.10	2400
64	30085	Tembladera Xico	19.52	97.10	2727
65	30097	Los Pescados Perote	19.63	97.13	2938

Nota: Las estaciones en negritas son las utilizadas para generar los escenarios de cambio climáticos.

La nomenclatura correspondiente a las variables empleadas en el estudio se proporcionan en la Tabla 2.4

Tabla 2.4. Variables y nomenclatura

Variable	Nomenclatura
Temperatura observada (°C) en el periodo 1961-1990.	T_0
Precipitación observada (mm) en el periodo 1961-1990.	Pcp_0
Temperatura (°C) corregida a partir de los datos observados y las salidas de temperatura de los MCGs para condiciones de $1CO_2$.	$T_{0,1}$ corregida
Precipitación (mm) corregida a partir de los datos observados y las salidas de precipitación de los MCGs para condiciones de $1CO_2$.	$Pcp_{0,1}$ corregida
Altitud (msnm)	Z
Latitud (decimales)	Lat.
Longitud (decimales)	Lon.
Temperatura (°C) correspondiente a las salidas de los MCGs para condiciones de $1CO_2$.	T_1
Precipitación (mm) correspondiente a las salidas de los MCGs para condiciones de $1CO_2$.	Pcp_1

2.5.1.3 Análisis de la variabilidad espacial de las temperaturas y precipitaciones obtenidas de las salidas de los MCG

Considerando que el relieve es uno de los factores que regulan la distribución espacial de la temperatura y precipitación en la región, en las Figuras 2.1 y 2.2 se puede apreciar la distribución de estas variables climáticas en función del relieve para las 65 estaciones consideradas (Tabla 2.3).

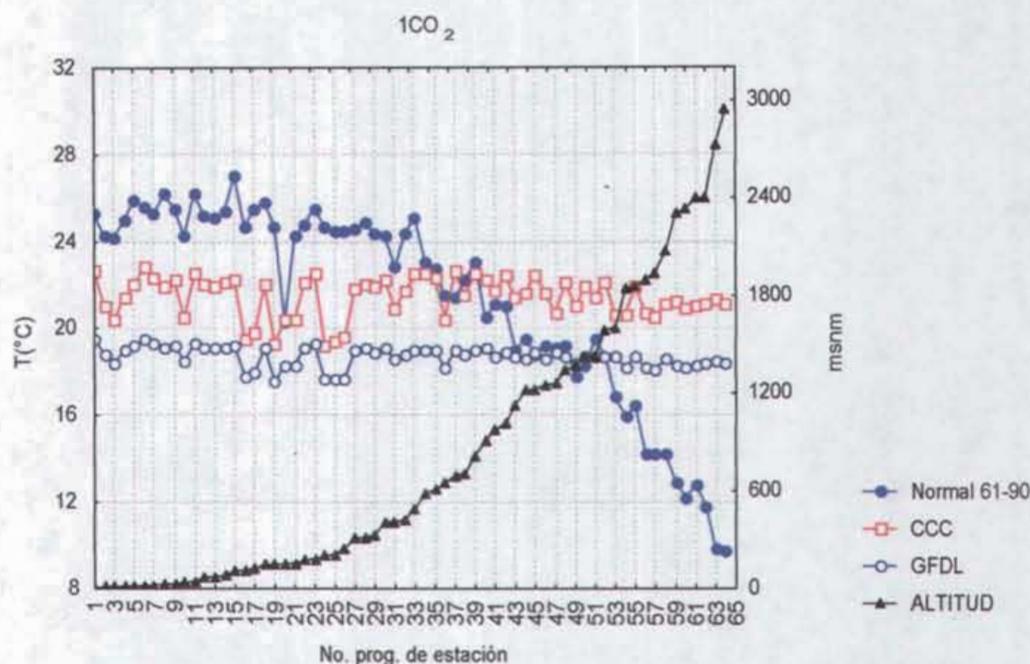


Figura 2.1. Altitud vs. Temperaturas anuales observadas en el periodo 1961-1990 y las salidas de los MCG. Región centro del estado de Veracruz.

En la Figura 2.1 se aprecia la disminución de las temperaturas normales con la altura en la mayoría de las estaciones consideradas; en general el aumento altitudinal es un factor determinante en la disminución de las temperaturas.

En el caso de las estaciones de San Rafael Martínez de la Torre, El Remolino, Espinal y Fanal de Nautla, ubicadas todas en la parte norte de la región de estudio, parece haber otro factor o factores que determinan la acentuada disminución de la temperatura en estas estaciones, hay que recordar que la región de estudio es afectada por el paso de los Nortes.

En cuanto a la respuesta de los modelos GFDL-R30 y CCC para simular las temperaturas en función del relieve, se observa lo siguiente:

1. Ambos modelos simulan cercanamente la distribución de la temperatura hasta casi los 610 msnm.
2. El modelo GFDL-R30 sigue más de cerca el comportamiento de la curva de temperatura normal hasta la altitud antes mencionada que el CCC; mientras que el CCC lo hace hasta los 410 msnm.

3. El modelo CCC muestra muy poca variación de la temperatura con el incremento en la altura, la curva correspondiente tiende a una lineal a partir de los 311 msnm.
4. En todos los casos las curvas correspondientes a las temperaturas generadas por los modelos GFDL-R30 y CCC para condiciones de 1CO₂ atmosféricos, se encuentran por abajo de la correspondiente a la temperatura normal (observada).
5. Ambos MCG simulan inadecuadamente las temperaturas de las estaciones ubicadas entre los 1000 y 2400 msnm.

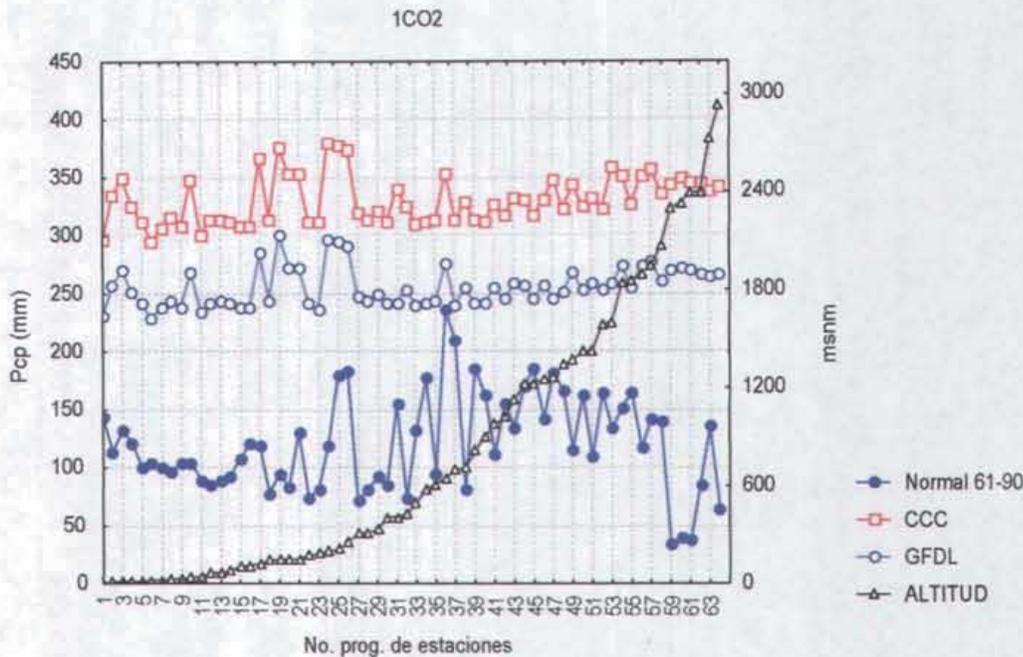


Figura 2.2 Altitud vs. Precipitaciones anuales observadas en el periodo 1961-1990 y las salidas de los MCG. Región centro del estado de Veracruz.

De la Figura 2.2 se observa que en la región de estudio se presenta un ascenso altitudinal suave hasta los 1200 msnm y gradientes pluviométricos negativos muy marcados a lo largo de todo el transecto altitudinal; esto último debido quizá a la orientación de los valles y el efecto Föhn inducido por la orografía de la región.

Respecto a las salidas de los modelos GFDL-R30 y CCC se observa lo siguiente:

1. Las salidas del modelo GFDL-R30 desde los 1944 msnm (Jalacingo) muestra grandes deficiencias ya que no logra simular la disminución de la precipitación con el aumento de la altura, en particular en las estaciones que se encuentran a sotavento del Cofre de Perote (Zalayeta, Totalco y Perote).
2. A partir de los 700 msnm ambos modelos además de sobrestimar los valores de precipitación suavizan los gradientes de precipitación.
3. El modelo CCC es el que menos simula la distribución de la precipitación en la zona de estudio.

Del análisis de cada una de las gráficas de la temperatura normal contra las temperaturas generadas por los modelos T₁CCC y T₁GFDL de las 65 estaciones (ver Figuras

Capítulo 2

1.5.1-1.5.30 del Anexo V) se encontró que podían agruparse por intervalos de altitud de acuerdo al comportamiento observado. Los intervalos se muestran en la tabla 2.5 y los ejemplos gráficos de cada una de las condiciones observadas se proporcionan en las Figuras 2.3 a 2.5.

Tabla 2.5 Intervalos seleccionados para el análisis de correlación entre las variables observadas y las correspondientes a los MCGs.

Condiciones observadas en las gráficas	Considerando las 67 estaciones	Considerando las 15 estaciones iniciales de estudio
	Intervalos de altitud (msnm)	Intervalos de altitud (msnm)
1. Los valores normales se encuentran por arriba de los generados por los modelos CCM y GFDL	0 - 500	0 - 330 0-350
2. Los valores normales se encuentran entre los generados por el CCM y el GFDL	585 - 1588 501-1600	697 - 1344 351-1350
3. Los valores normales se encuentran por debajo de los generados por los modelos CCM y GFDL	1605 -2938 1601-3000	1427 - 2400 1351-2400

Ejemplos gráficos:

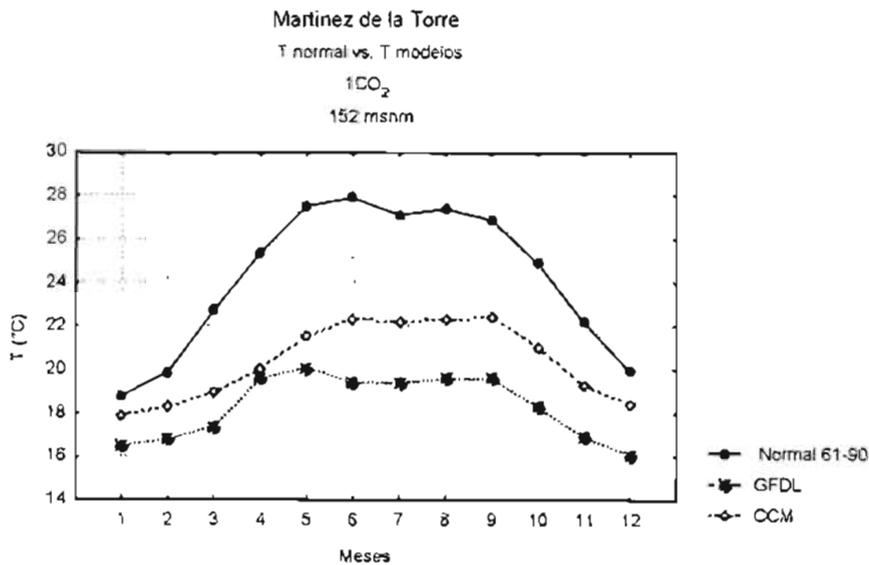


Figura 2.3 Caso 1: Los valores normales se encuentran por arriba de los generados por los modelos CCM y GFDL.

Capítulo 2

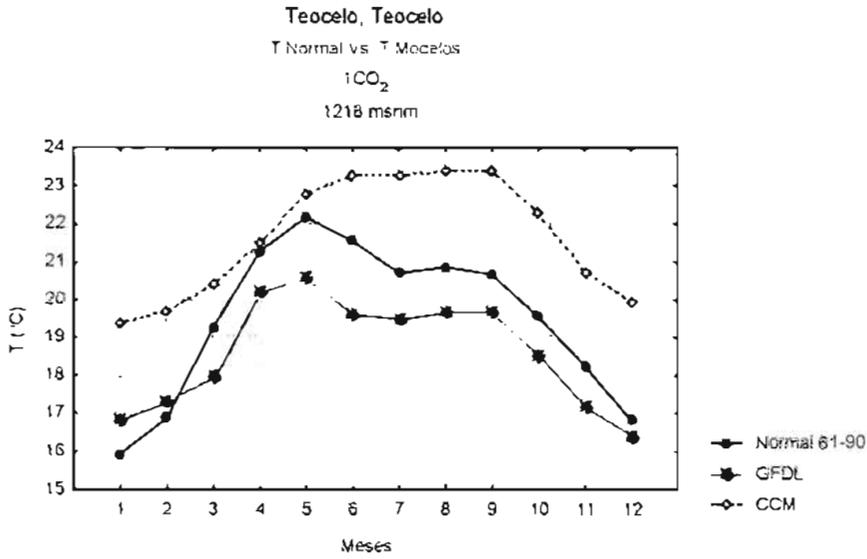


Figura 2.4. Caso 2: Los valores normales se encuentran entre los generados por el CCM y el GFDL

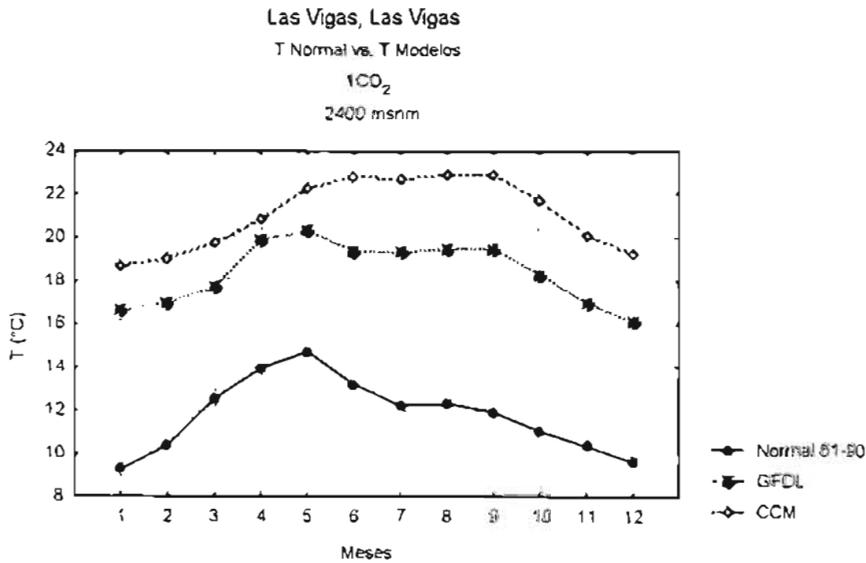


Figura 2.5. Caso 3: Los valores normales se encuentran por abajo de los generados por los modelos CCM y GFDL.

A partir de los resultados anteriores en este trabajo se plantea la hipótesis de que las salidas de los modelos pueden ser corregidas considerando fundamentalmente a la altitud como el factor determinante. En la siguiente sección se describe la metodología estadística que empleada para conocer el grado de correlación entre las variables climáticas y físicas.

2.5.2 Correlaciones

Mediante la matriz de correlación que proporciona el paquete de cómputo Statistica versión 3.0 de Stat-Soft, 1999, se obtuvo el nivel de relación entre las variables climáticas y la altitud para cada uno de los MCG, tomando como variables dependientes T_0 y Pcp_0 y como variables independientes Z , T_1 y Pcp_1 . Los coeficientes de correlación obtenidos se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Coeficientes de correlación por intervalo de análisis.

Considerando las 67 estaciones		Pcp Observada y modelos						Temperatura observada y modelos					
No. Casos	Alturas	CCM			GFDL			GFDL			CCM		
		r	r ² (%)	ESR	r	r ² (%)	ESR	r	r ² (%)	ESR	r	r ² (%)	ESR
34	0 - 495	0.55	29.7	80.44	0.83	69.77	52.7	0.75	56.76	2.12	0.66	44.16	2.41
20	585 - 1588	0.62	38.86	97.8	0.83	69.02	69.61	0.94	87.74	0.94	0.89	78.50	1.26
13	1605 - 2938	0.59	35.60	78.1	0.71	51.61	67.66	0.87	76.40	1.39	0.80	63.24	1.74
792	0 - 2938	0.55	30.25	89.63	0.78	60.84	67.39	0.94	88.55	1.78	0.92	84.97	2.04
Considerando las 14 estaciones iniciales de estudio													
7	0 - 330	0.81	66.03	59.50	0.55	30.32	85.22	0.88	77.29	1.37	0.79	63.55	1.74
4	697 - 1344	0.92	85.78	51.04	0.68	46.58	98.94	0.95	91.05	0.71	0.93	86.55	0.87
3	1427 - 2400	0.77	59.51	57.62	0.70	50.05	64.00	0.98	96.72	0.69	0.95	90.08	1.20

Simbología: r coeficiente de correlación; r² coeficiente de determinación y ESR error de estimación.

Las ecuaciones de regresión y las matrices de correlación encontradas se encuentran anexas al documento. También se analizaron otros intervalos secundarios considerando todas las estaciones con el fin de ver si existía la posibilidad de encontrar intervalos con coeficientes de correlación más altos, sin mejorar los resultados anteriores.

2.5.2.1 Resultados y conclusiones del análisis de regresión lineal simple

Los coeficientes de correlación correspondientes al intervalo 0 - 2938 (todas las estaciones) permiten considerar únicamente dos modelos de regresión, uno para la temperatura y otro para la precipitación aplicables a toda la región de estudio para ambos modelos de circulación general. De la Tabla 2.6 se aprecia que en general los coeficientes de correlación más altos corresponden al modelo GFDL, por lo que este modelo parece ser más adecuado que el CCC, para generar mediante ecuaciones de regresión simple las condiciones de temperatura y precipitación del escenario físico real.

Para la estimación de los factores de corrección para el incremento en la temperatura y la razón de cambio de la precipitación, se propone un método para "reducir la escala" que permite, definir y calcular un factor de corrección para las salidas de cada MCG: lo que permite generar escenarios climáticos con el método de modelación, adecuados a las condiciones climáticas propias de la región centro del estado de Veracruz.

2.5.3 Técnica para reducir la escala.

A partir de considerar que la relación entre las variable dependientes (T_0 , P_0) y las variables independientes o explicativas (Z , $Lat.$, $Lon.$; T_1 o Pcp_1) es de tipo lineal y aditiva, se obtiene mediante el método de regresión lineal o multilíneal un modelo de regresión más adecuado para la estimación de la temperatura ($T_{0,1}$) o precipitación ($Pcp_{0,1}$) en la región de estudio.

En primer lugar se incluyen en los modelos las variables que contribuyan más a la explicación de la variable dependiente y muestren independencia entre sí; las matrices de correlación y las ecuaciones de regresión se obtuvieron con el paquete de cómputo Statistica versión 3.0 y el módulo regresión no lineal.

2.5.3.1 Modelo CCC

2.5.3.1.1 Temperatura

El Tabla 2.7 proporciona los valores de los coeficientes de correlación entre las variables descritas en la tabla 2.4 para el periodo 1961-1990.

Tabla 2.7 Matriz de correlación (significancia a $p < .05$) para las variables

N=792					
	T_0	Z	Lon.	T_1 CCC	Lat.
T_0	1				
Z	-0.85	1.00			
Lon.	-0.48	0.49	1.00		
T_1 CCC	0.39	-0.04	-0.37	1.00	
Lat.	0.05	-0.11	0.48	-0.48	1.00

De la Tabla 2.7 se observa que la variable Z (altitud, -0.85) es la que tiene mayor relación con la variable dependiente (T_0) y que las variables Lon. (-0.48) y TICCM (0.39) la tienen en menor grado. Las variables que presentan una cierta dependencia entre ellas son: Lat. y Lon. (0.50), Lon. y Z (0.49).

El orden de inclusión de las variables seleccionadas se presenta en la Tabla 2.8, la latitud se dejó fuera porque se observó que no aportaría un incremento importante a la explicación de la variable.

Tabla 2.8 Variables y modelos lineales considerados.

Modelo	Variables introducidas	Modelo
1	Z y TICCM	$T_{0,1\text{ corregida}} = a_1 + b_1 T_1 \text{CCC} + c_1 Z$
2	Z, TICCC y Lon.	$T_{0,1\text{ corregida}} = a_1 + b_1 \text{TICCC} + c_1 Z + b_2 \text{Lon.}$

Capítulo 2

La Tabla 2.8 muestra los coeficientes de determinación (r y r^2 corregido) y el error de estimación (ESR) encontrados para cada modelo generado.

Tabla 2.9 Resumen de los modelos para la T_0 y el MCG-CCCM

Modelo CCM	r	r^2 (%)	ESR (°C)
$T_{0,1 \text{ corregida}} = 2.11731223 + 1.09908067 T_{1 \text{ Modelo}} - 0.005362446 Z$	0.954	90.972	1.53
$T_{0 \text{ corregida}} = -146.277 + 1.144691 T_{1 \text{ Modelo}} - 0.005670 Z + 1.521844 Lon$	0.925	85.607	1.996

De los datos de la Tabla 2.9 se encuentra que el modelo 1 resulta adecuado para la corrección de T_0 corregida; en la Figura 2.6 se presenta el gráfico de valores observados vs. valores estimados.

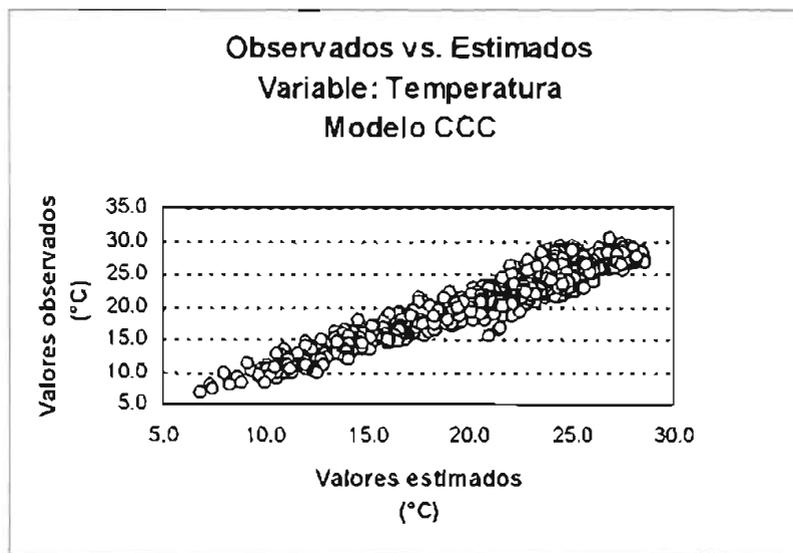


Figura 2.6 T_0 vs. $T_{0,1 \text{ corregida}}$ CCC. Región centro del estado de Veracruz

2.5.3.1.2 Precipitación

La precipitación es una variable difícil de modelar (en comparación con la temperatura) en términos de regresiones lineales; sin embargo aquí se propone la misma metodología empleada para la temperatura, por consistencia.

La matriz de correlación entre las variables (tabla 2.4) se muestra en la Tabla 2.10 para el periodo 1961-1990; de ella se observa que la variable con mayor coeficiente de correlación con la variable dependiente (Pcp_0) es $Pcp_1 \text{ CCC}$ (0.55) y la variable que tiene el menor coeficiente de correlación es Lon (0.10), el resto de las variables no se tomaron en cuenta debido a que no aportarían un incremento importante a la explicación de Pcp_0 .

Tabla 2.10 Matriz de correlación (significancia a $p < .05$)

N=792					
	Pcp ₀	Z	Lat.	Lo.	PcpCCC
Pcp ₀	1				
Z	0.01	1			
Lat	-0.04	-0.11	1		
Lon.	0.10	0.49	0.48	1	
PcpCCC	0.55	0.06	0.17	0.18	1

El orden de inclusión de las variables se muestra en la Tabla 2.11 y en la Tabla 2.12 los coeficientes de determinación (r y r^2) y el error de estimación (ESR) encontrados.

Tabla 2.11 Variables y modelos lineales considerados.

Modelo	Variables introducidas	Método
1	PcpCCC, Lon.	$Pcp_{0,1} = a_2 + b_2 Pcp_{1CCC} + B_3 Lon$
2	PcpCCC	$Pcp_{0,1} = a_2 + b_2 Pcp_{1CCC}$

Tabla 2.12 Resumen del modelo para la Pcp₀ y el MCG-CCCM

Modelo CCM	r	r ² (%)	ESR (mm/mes)
$P_{0,correctada} = 174.183255 + 0.62181829 P1Modelo - 2.6788208 Lon.$	0.544	29.61	89.48
$P_{0,correctada} = -84.7340089 + 0.62001761 P1Modelo$	0.544	29.61	89.49

De los datos de la Tabla 2.12 se encuentra que el modelo 2 resulta adecuado para la estimación de Pcp_{0,1 correctada}. En la Figura 2.7 se muestra la gráfica correspondiente a los valores observados y estimados con el modelo seleccionado.

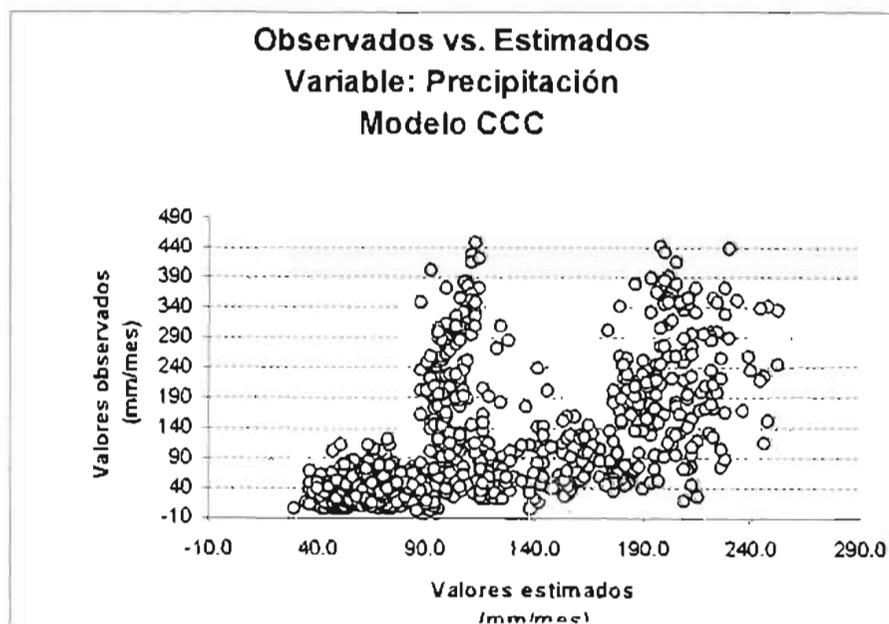


Figura 2.7. P_0 vs. $P_{0\text{corregida}}$ CCC. Región centro del estado de Veracruz.

2.5.3.2 Modelo GFDL-R30

2.5.3.2.1 Temperatura

Siguiendo un desarrollo similar al del punto 2.5.3.1.1 se obtuvieron los coeficientes de correlación para el caso de las temperaturas pronosticadas por el modelo. En la Tabla 2.13 se proporcionan la matriz de correlación entre las variables (Tabla 2.4) para el periodo 1961-1990, y en las Tablas 2.14 y 2.15 los estadísticos correspondientes a los modelos obtenidos.

Tabla 2.13 Matriz de correlación (significancia a $p < 0.5$)

N=792)					
	TO	Z	LON	TIGFDL	LAT
TO	1				
Z	-0.85	1.00			
LON	-0.48	0.49	1.00		
TIGFDL	0.49	-0.10	-0.29	1.00	
LAT	0.05	-0.11	0.48	-0.23	1.00

Nuevamente las variables latitud y longitud se dejaron fuera por considerarse que no aportaría un incremento de explicación importante de la variable T_0 .

En la Tabla 2.14 se presenta el orden de inclusión de las variables y en la Tabla 2.15 se proporcionan los coeficientes de determinación (r y r^2 corregido) y el error de estimación (ESR).

Tabla 2.14 Variables y modelos lineales considerados.

Modelo	Variables introducidas	Método
1	Z y TIGFDL	$T_{0,1\text{corregida}} = a_1 + b_1 TIGFDL + c_1 Z$
2	Z, TIGFDL y Lon.	$T_{0,1\text{corregida}} = a_1 + b_1 TIGFDL + c_1 Z + b_3 Lon.$

Tabla 2.15 Resumen de los modelos para la T_0 y el MCG-GFDL

Modelo GFDL	r	r^2 (%)	ESR (°C)
$T_{0,1\text{corregida}} = -1.61213757 - 0.00521126 Z + 1.45558299 TIGFDL$	0.966	93.37	1.32
$T_{0,1\text{corregida}} = -71.964 - 0.005351 Z + 0.719068 Lon. + 1.487651 TIGFDL$	0.942	88.71	1.77

De los datos de la Tabla 2.15 se encuentra que el modelo 1 es el más adecuado para la obtención de la $T_{0.1}$ corregida; en la Figura 2.8 se presenta el gráfico de valores observados vs. valores estimados.

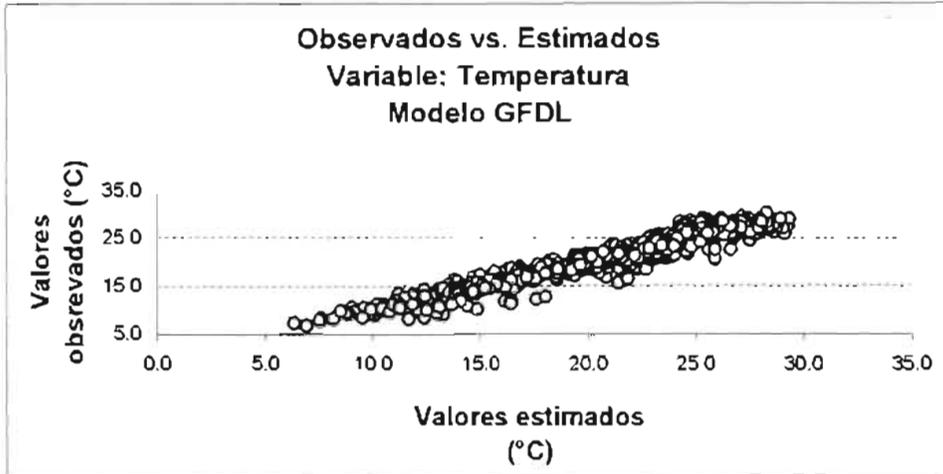


Figura 2.8. T_0 vs. $T_{0.1}$ corregida GFDL. Región centro del estado de Veracruz.

2.5.3.2.2 Precipitación

La matriz de correlación entre variables (Tabla 2.4) para el periodo 1961-1990 se proporciona en la tabla 2.16, de ella se obtiene que sólo la variable PcpGFDL es la que presentan mayor grado de relación con Pcp.

Tabla 2.16 Matriz de correlación (significancia a $p < .05$)

N=792					
	Pcp	Z	LAT.	LON.	PcpGFDL
Pcp	1				
Z	0.01	1			
LAT_	-0.04	-0.11	1		
LON_	0.10	0.49	0.48	1	
Pcp GFDL	0.78	0.03	0.07	0.08	1

Como existe una relación implícita entre la longitud, latitud y altitud, la primera será considerada en el análisis de regresión, a pesar de mostrar un bajo coeficiente de correlación (0.10) con la variable dependiente (Pcp).

En la Tabla 2.17 se presenta el orden de inclusión de las variables y en la Tabla 2.18 se proporcionan los coeficientes de determinación (r y r^2 corregido) y el error de estimación (ESR).

Tabla 2.17 Variables y modelos lineales considerados.

Modelo	Variables introducidas	Método
1	PcpcGFDL, Lon.	$Pcp_0 = a_2 + b_2 Pcp_1 CCC + b_3 Lon.$
2	PcpGFDL	$Pcp_0 = a_2 + b_2 Pcp_1 CCC$

Tabla 2.18 Resumen del modelo para la Pcp_0 y el MCG-GFDL

Modelo GFDL	r	r ² (%)	ESR (mm/mes)
$P_{0,1 \text{ corregida}} = -53.7158 + 8.51237134 P1 \text{ Modelo} + 0.49371596 Lon$	0.73	59.78	67.64
$P_{0,1 \text{ corregida}} = -5.90038386 + 0.49376547 P1 \text{ Modelo}$	0.77	59.77	67.65

De los datos de la Tabla 2.18 se encuentra que el modelo 2 es adecuado para la obtención de la $P_{0 \text{ corregida}}$. En la Figura 2.9 se muestra la gráfica correspondiente a los datos observados y estimados.

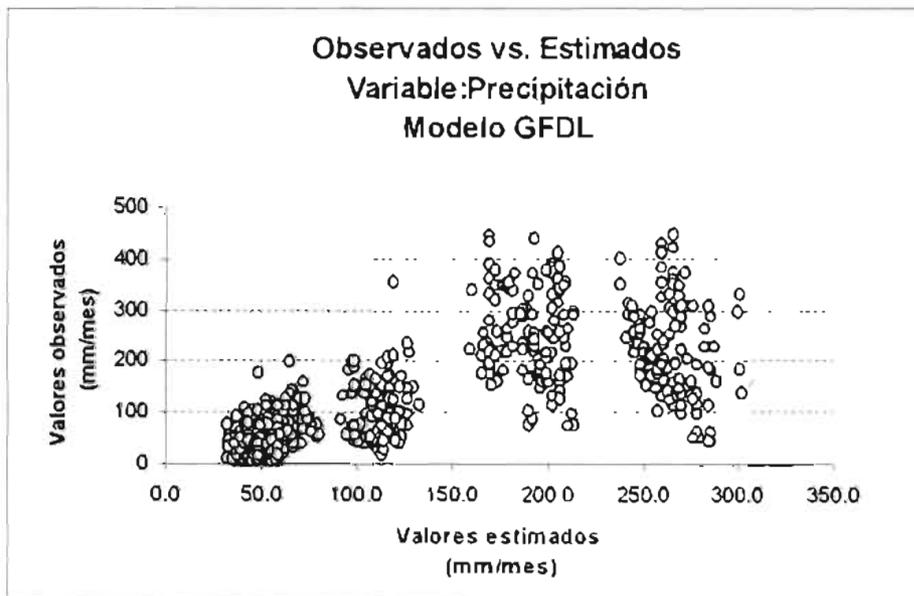


Figura 2.9 Pcp_0 vs. $Pcp_{0,1 \text{ corregida}}$ GFDL. Región centro de Veracruz.

En las Figuras 2.10 a 2.15 se muestran los gráficos que permiten comparar las curvas correspondientes a las salidas de los modelos con los valores observados (Normal 61-90) y estimados (C_0) mediante las ecuaciones de regresión propuestas para cada MCG.

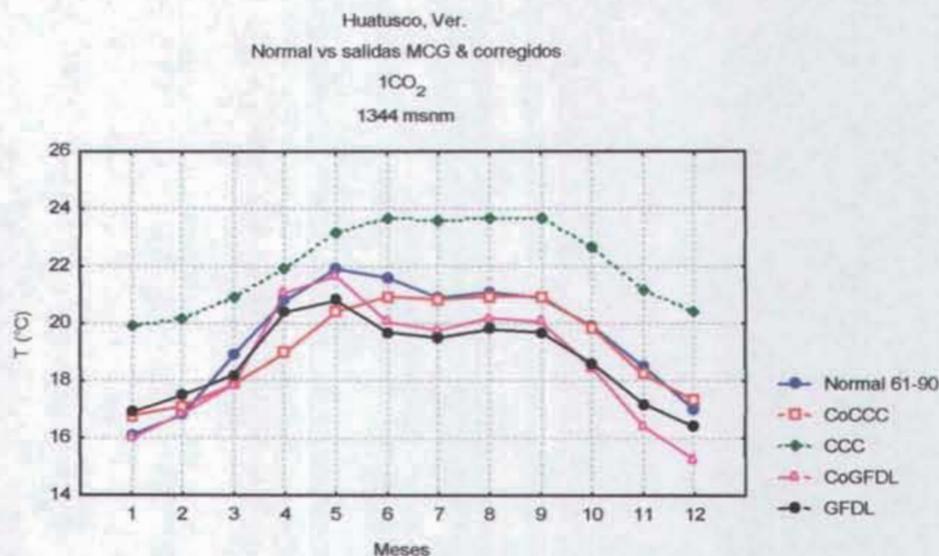


Figura 2.10. Comparación entre la temperatura normal mensual del periodo 1961-1990 con las simulaciones de los modelos corregidos (Co) de acuerdo a la reducción de escala propuesta para condiciones de 1CO₂. Estación de Huatusco, Ver.

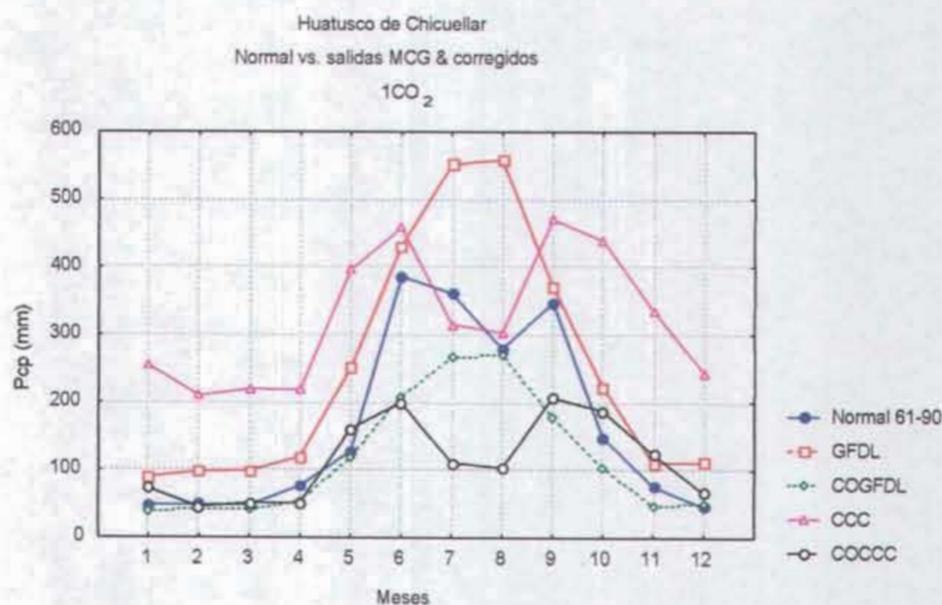


Figura 2.11. Comparación entre la precipitación normal mensual del periodo 1961-1990 y las simulaciones de los modelos corregidos (Co) de acuerdo a la reducción de escala propuesta para condiciones de 1CO₂. Estación de Huatusco, Ver.

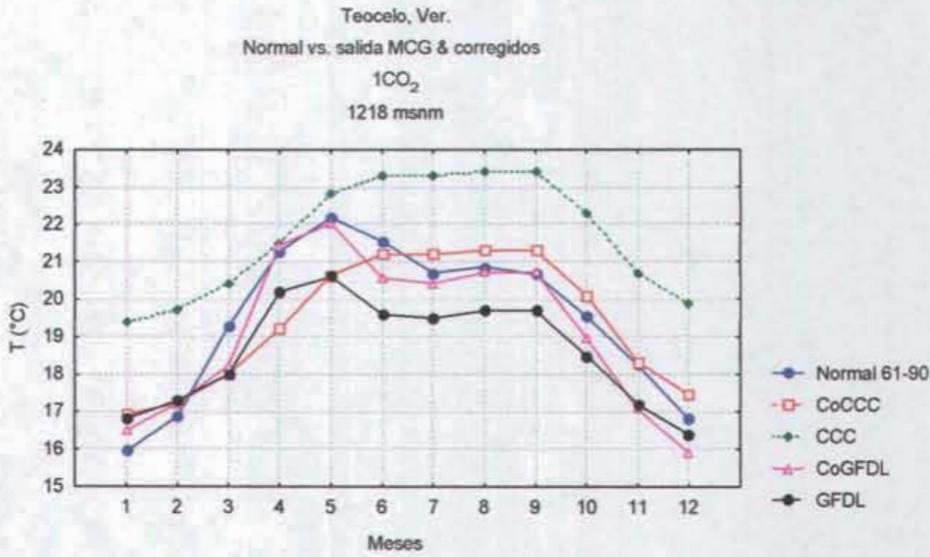


Figura 2.12. Comparación entre la temperatura normal mensual del periodo 1961-1990 con las simulaciones de los modelos corregidas (Co) de acuerdo a la reducción de escala propuesta para condiciones de 1CO₂. Estación Teocelo, Ver.

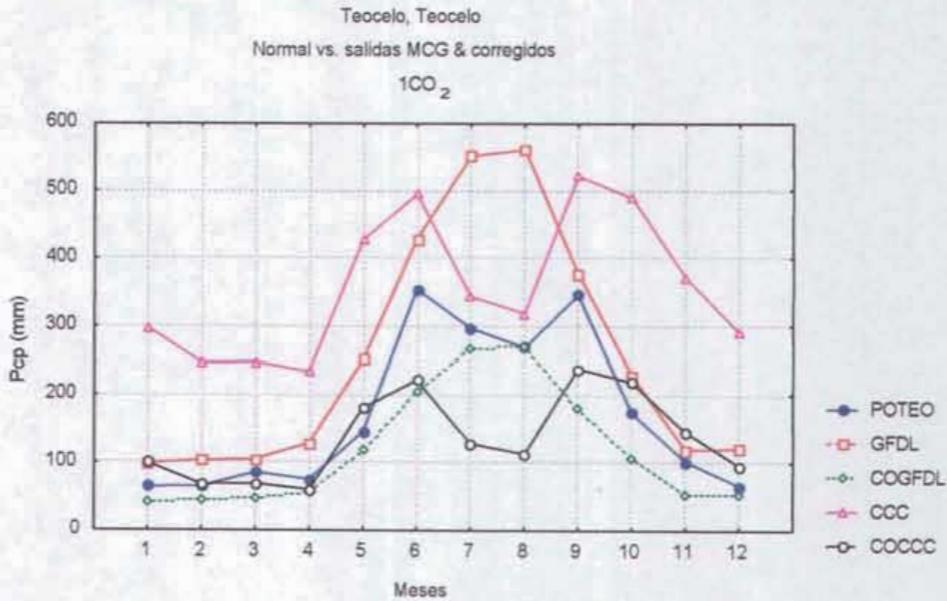


Figura 2.13. Comparación entre la precipitación normal mensual del periodo 1961-1990 y las simulaciones de los modelos corregidas (Co) de acuerdo a la reducción de escala propuesta para condiciones de 1CO₂. Estación Teocelo, Ver.

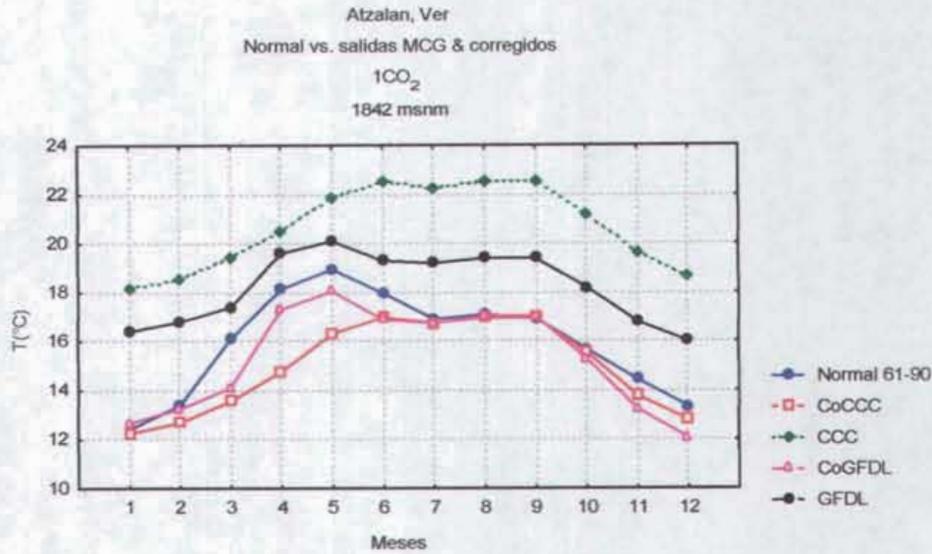


Figura 2.14. Comparación entre la temperatura normal mensual del periodo 1961-1990 con las simulaciones de los modelos corregidas (Co) de acuerdo a la reducción de escala propuesta para condiciones de $1CO_2$. Estación Atzalan, Ver.

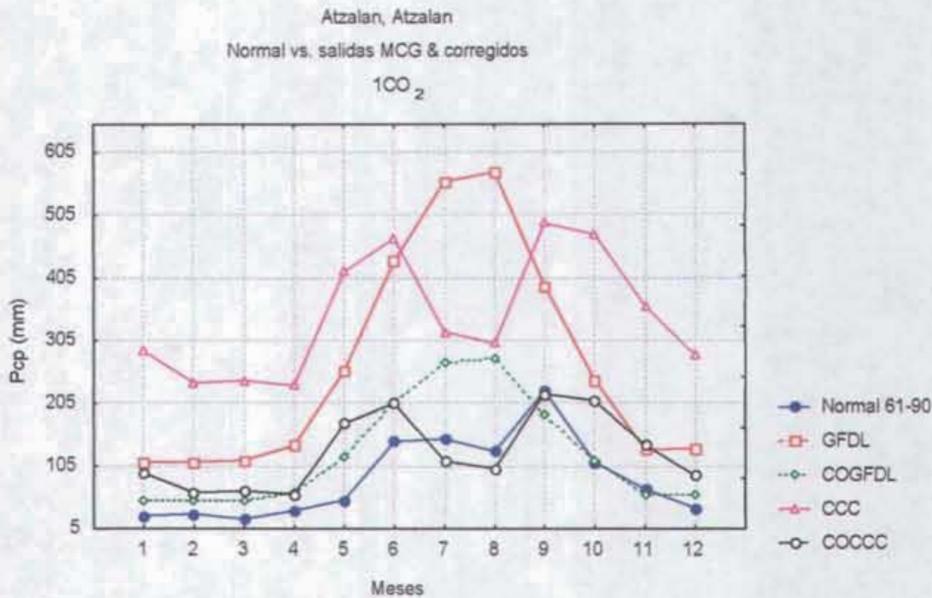


Figura 2.15. Comparación entre la precipitación normal mensual del periodo 1961-1990 y las simulaciones de los modelos corregidas (Co) de acuerdo a la reducción de escala propuesta para condiciones de $1CO_2$. Estación Las Vigas, Ver.

En las figuras 2.10 a 2.15 puede apreciarse que el método propuesto permite ajustar de manera significativa los valores dados por las salidas de los MCG. E puede concluir que la técnica de “bajar la escala” propuesta permite proponer con más confianza escenarios de cambio climático para la región de estudio. Así, se aplicará el mismo método para condiciones de una duplicación de bióxido de carbono ($2CO_2$) en la siguiente sección.

2.6 Metodología para encontrar los factores de corrección para 2CO₂

2.6.1 Obtención del factor de corrección para el incremento de las temperaturas (°C)

La metodología que se propone en este trabajo para la reducción de escala de las salidas de los modelos de circulación general CCC y GFDL-R30, parte de las consideraciones siguientes:

- Es claro que no hay manera de comparar los valores de T_2 y Pcp_2 (en condiciones de 2CO₂) proporcionados por los MCGs, con valores observados en los sitios de estudio seleccionados puesto que éstos no existen, a diferencia de lo que ocurre en el caso de 1CO₂;
- Por otra parte, con base en la experiencia del caso de 1CO₂, en la que se vio una discrepancia entre los datos observados y los proporcionados por los MCGs, resulta natural esperar que también se presentará una discrepancia para el caso de 2CO₂, así, las salidas de 2CO₂ de los MCGs se tendrán que corregir para que sean más aproximadas a una posible realidad futura.

Ante esto, con miras de obtener una corrección para las salidas de 2CO₂ la metodología que se plantea se basa en suponer que las anomalías de dichas salidas son análogas a las correspondientes a 1CO₂, con lo cual se obtendría un método de reducción de escala para 2CO₂ semejante al utilizado en el caso de 1CO₂; a saber, utilizar un ajuste lineal análogo al obtenido para el caso de 1CO₂.

Como en todos los casos en que se usan los métodos de “bajar la escala”, se tiene que dar como cierta la hipótesis de que las relaciones que encontramos para las condiciones actuales (o escenario base) prevalecerán en el futuro (Giorgi, *et al.*, 2001 citado por Conde, 2003).

Las condiciones normales y de cambio climático en las variables se identificarán de la manera siguiente:

- 0 = condiciones medias normales,
- 1 = condiciones de 1CO₂ atmosférico,
- 2 = condiciones de 2CO₂ atmosférico, y
- Z = altura (msnm)

A partir de la ecuación de regresión (i) obtenidas para $T_{0,1 \text{ corregido}}$:

$$T_{0,1 \text{ corregido}} = a_1 + b_1 T_{1 \text{ modeloMCG}} + c_1 Z \quad (i)$$

la ecuación que se utilizará para ajustar las salidas correspondientes de los MCGs para las condiciones de 2CO₂ sería entonces:

$$T_{0,2 \text{ corregido}} = a_1 + b_1 T_{2 \text{ modeloMCG}} + c_1 Z \quad (ii)$$

con a_1 , b_1 y c_1 los mismos coeficientes que en (i).

De acuerdo a los MCGs el incremento en la temperatura debido a condiciones de cambio climático está dado por:

$$\Delta T = T_{2 \text{ modeloMCG}} - T_{1 \text{ modeloMCG}} \quad (\text{iii})$$

por lo que el $\Delta T_{\text{corregido}}$ quedaria expresado como:

$$\Delta T_{\text{corregido}} = T_{0,2 \text{ corregido}} - T_{0,1 \text{ corregido}} \quad (\text{iv})$$

sustituyendo (i) y (ii) en (iv) se tiene

$$\Delta T_{\text{corregido}} = a_1 + b_1 T_{2 \text{ modeloMCG}} + c_1 Z - (a_1 + b_1 T_{1 \text{ modeloMCG}} + c_1 Z)$$

$$\Delta T_{\text{corregido}} = b_1 (T_{2 \text{ modeloMCG}} - T_{1 \text{ modeloMCG}})$$

y por (iii)

$$\Delta T_{\text{corregido}} = b_1 \Delta T \quad (\text{v})$$

con b_1 el coeficiente de regresión parcial del modelo 2 (Tablas 2.9 y 2.14) correspondiente al MCG considerado. En la Tabla 2.18 se proporcionan los valores de b_1 estimados para la zona centro del estado de Veracruz, para cada uno de los MCGs.

Tabla 2.18. Valores del coeficiente de regresión parcial b_1 para la temperatura.

Modelo de Circulación General	
CCM	GFDL
1.09908067	1.45558299

2.6.2 Obtención del factor de corrección para el incremento en la precipitación (mm/mes)

Para el caso de la precipitación, siguiendo un desarrollo similar al realizado para la temperatura, se obtendrá el factor de corrección (b_2) para el incremento en la precipitación a partir de las salidas de los MCGs para las condiciones normales y de duplicación de dióxido de carbono.

En este caso,

$$P_{0,1 \text{ corregido}} = a_2 + b_2 P_{cp1 \text{ modeloMCG}} \quad (\text{v})$$

$$P_{0,2 \text{ corregido}} = a_2 + b_2 P_{cp2 \text{ modeloMCG}} \quad (\text{vi})$$

con a_2 y b_2 coeficientes de la regresión.

Y por lo tanto,

$$\Delta P_{cp} = P_{cp2 \text{ modeloMCG}} - b_2 P_{cp1 \text{ modeloMCG}} \quad (\text{vii})$$

por lo que el $\Delta P_{cp\text{correctado}}$ quedaría expresado como:

$$\Delta P_{cp\text{correctado}} = P_{0,2\text{correctado}} - P_{0,1\text{correctado}} \quad (\text{viii})$$

sustituyendo (v) y (vi) en (viii) se tiene

$$\Delta P_{cp\text{correctado}} = a_2 + b_2 P_{cp2\text{modeloMCG}} - (a_2 + b_2 P_{cp1\text{modeloMCG}})$$

$$\Delta T_{\text{correctado}} = b_2 (P_{cp2\text{modeloMCG}} - P_{cp1\text{modeloMCG}})$$

y por (vii)

$$\Delta P_{cp\text{correctado}} = b_2 \Delta P_{cp} \quad (\text{ix})$$

con b_2 el coeficiente de regresión parcial del modelo1 correspondiente al MCG considerado (Tablas 2.11 y 2.17). En la Tabla 2.19 se proporcionan los valores de b_2 estimados para la zona centro del estado de Veracruz, para cada MCGs.

Tabla 2.19. Valores del coeficiente de regresión parcial b_2 para la P_{cp} .

Modelo de Circulación General	
CCM	GFDL
0.62001761	0.49376547

2.7 Aplicación de los factores de corrección estimados a los incrementos de temperatura y precipitación para cada MCG.

A partir de los datos de las Tablas 2.18 y 2.19 y de las ecuaciones (v) y (ix) se obtendrán los escenarios de cambio para la región de estudio, para la temperatura y la precipitación bajo condiciones de $2CO_2$.

Las Tablas 2.20 a 2.23, proporcionan ejemplos de los cálculos realizados para la generación de los escenarios de cambio climático y anomalías climáticas, para cada una de las 15 estaciones consideradas dentro de la región centro.

2.7.1 Tablas de cálculo para generar los escenarios de cambio climático de temperatura.

Tabla 2.20. Tabla de cálculo por MCG para la generación de los escenarios futuros de temperatura para la estación Teocelo, Ver, con el modelo GFDL-R30.

$b1=1.45558299$

Teocelo		$2CO_2-1CO_2$		Escenario futuro	Anomalia climática
Meses	T_0	Dif. T	$b_1 * Dif. T$	$t_0 + b_1 * dif. T$	$(t_0 + b * dif. T) - T_0$
1	15.9	2.29	3.3	19.3	3.3
2	16.9	2.95	4.3	21.2	4.3
3	19.3	2.92	4.3	23.5	4.3
4	21.3	2.82	4.1	25.4	4.1
5	22.2	2.2	3.2	25.4	3.2
6	21.5	2.65	3.9	25.4	3.9
7	20.7	2.66	3.9	24.6	3.9
8	20.9	2.71	3.9	24.8	3.9
9	20.7	2.84	4.1	24.8	4.1
10	19.5	2.68	3.9	23.4	3.9
11	18.2	2.72	4.0	22.2	4.0
12	16.8	3.11	4.5	21.3	4.5
Prom.	19.5			23.4	3.9

Tabla 2.21 Tabla de cálculo para la generación de los escenarios futuros de temperatura para la estación Teocelo, Ver, con el modelo CCC.

$b1=1.09908067$

Teocelo		$2CO_2-1CO_2$		Escenario futuro	Anomalia climática
Meses	T_0	Dif. T	$b_1 * Dif. T$	$t_0 + b_1 * dif. T$	$(t_0 + b * dif. T) - T_0$
1	15.9	1.47	1.6	17.6	1.6
2	16.9	1.69	1.9	18.7	1.9
3	19.3	1.67	1.8	21.1	1.8
4	21.3	2.43	2.7	24.0	2.7
5	22.2	2.17	2.4	24.6	2.4
6	21.5	1.66	1.8	23.4	1.8
7	20.7	1.89	2.1	22.8	2.1
8	20.9	2.17	2.4	23.3	2.4
9	20.7	2.23	2.5	23.1	2.5
10	19.5	2.66	2.9	22.5	2.9
11	18.2	2.21	2.4	20.7	2.4
12	16.8	1.67	1.8	18.6	1.8
	19.5			21.7	2.2

2.7.2 Tablas de cálculo para generar los escenarios de cambio climático de precipitación

Tabla 2.22 Tabla de cálculo para la generación de los escenarios futuros de precipitación para la estación Teocelo, Ver. con el modelo GFDL.

b ₂ =0.49376547										
Teocelo, Ver.										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
GFDL-R30		Salida MCG		Col.CxCol.D	Salida MCG	Col.FxCol.D	Col.G-Col.E	b ₂ xCol.H	Col.B+Col.I	Col.J/ColB
Meses	P ₀	1CO ₂	Días del mes	Pcp (mm/mes)	2CO ₂	Pcp (mm/mes)	Dif. P2CO ₂ -P1CO ₂	b ₂ Dif. Pcp	Escenario Futuro P0+b ₂ DifPcp	Razón de cambio P0+b ₂ DifPcp/P0
1	64	3.2	31	99.2	5	155	55.8	27.55	91.6	1.4
2	65.1	3.7	28	103.6	3.2	89.6	-14.0	-6.91	58.2	0.9
3	85.7	3.4	31	105.4	4.3	133.3	27.9	13.78	99.5	1.2
4	75.5	4.3	30	129	4.3	129	0.0	0.00	75.5	1.0
5	145.9	8.1	31	251.1	8.8	272.8	21.7	10.71	156.6	1.1
6	354.5	14.3	30	429	19.7	591	162.0	79.99	434.5	1.2
7	297.6	17.8	31	551.8	20.1	623.1	71.3	35.21	332.8	1.1
8	269	18.1	31	561.1	24.4	756.4	195.3	96.43	365.4	1.4
9	346.1	12.6	30	378	17	510	132.0	65.18	411.3	1.2
10	174.2	7.4	31	229.4	8	248	18.6	9.18	183.4	1.1
11	102.5	4	30	120	4.6	138	18.0	8.89	111.4	1.1
12	66.7	3.9	31	120.9	4.5	139.5	18.6	9.18	75.9	1.1
Prom.	2046.8								2396.0	

Tabla 2.23 Tabla de cálculo para la generación de los escenarios futuros de precipitación para la estación Teocelo, Ver. con el modelo CCC.

b₂=0.620017614										
Teocelo, Ver.										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
CCC		Salida a MCG		Col.CxCol. D	Salida MCG	Col.FxCol. D	Dif. Col.G-Col.E	b ₂ xColH	Col.B+Col.I	Col.J/ColB
Meses	P ₀	1CO ₂	Días del mes	Pcp (mm/mes)	2CO ₂	Pcp (mm/mes)	Dif. P2CO ₂ - P1CO ₂	b ₂ Dif. Pcp	Escenario Futuro P0+b ₂ DifPc p	Razón de cambio P ₀ +b ₂ DifPcp/ P ₀
1	64	8.7	31	269.7	7.5	232.5	-37.2	-23.1	40.9	0.64
2	65.1	8	28	224	6.5	182	-42	-26.0	39.1	0.60
3	85.7	7.4	31	229.4	6.2	192.2	-37.2	-23.1	62.6	0.73
4	75.5	7.5	30	225	10.3	309	84	52.1	127.6	1.69
5	145.9	13	31	403	14.1	437.1	34.1	21.1	167.0	1.14
6	354.5	15.3	30	459	11.2	336	-123	-76.3	278.2	0.78
7	297.6	10.2	31	316.2	7.2	223.2	-93	-57.7	239.9	0.81
8	269	9.7	31	300.7	9.8	303.8	3.1	1.9	270.9	1.01
9	346.1	15.9	30	477	10.6	318	-159	-98.6	247.5	0.72
10	174.2	14.6	31	452.6	17.1	530.1	77.5	48.1	222.3	1.28
11	102.5	11.5	30	345	11.7	351	6	3.7	106.2	1.04
12	66.7	8.4	31	260.4	7.1	220.1	-40.3	-25.0	41.7	0.63
Prom.	2046.8								1844.1	

Capítulo 2

Las Tablas 2.24 a 2.27 muestran los valores promedio mensuales de temperatura y precipitación, pronosticados por los MCGs (corregidos) para condiciones de 2CO₂. En ellas se observa que los cambios climáticos proyectados por los modelos CCC y GFDLR-30 para la región centro de Veracruz, son de un incremento en la temperatura de entre dos y cuatro grados centígrados en promedio

Las Figuras del Anexo permiten comparar las temperaturas y precipitaciones del escenario base (61-90) con las simuladas por los modelos, de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂.

Estas figuras muestran que la metodología de reducción de escala propuesta en este trabajo, permite adaptar de manera sencilla y eficiente las salidas de los modelos a la escala y condiciones climáticas de la región centro del estado de Veracruz, y por tanto generar escenarios más confiables de cambio climático, ya que las simulaciones corregidas de los MCGs para 1CO₂ siguen de cerca el comportamiento observado de las temperaturas y precipitaciones en los sitios de estudio.

Tabla 2.24 Temperatura pronosticada por el modelo GFDL-R30 (corregido) para la región centro de Veracruz bajo condiciones de 2CO₂.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Veracruz	24.5	26.1	27.8	29.6	30.9	31.5	31.4	31.5	31.3	30.1	28.1	26.8	29.1
Remolino	22.0	24.2	26.8	29.7	31.0	31.9	31.4	31.8	31.2	29.1	26.5	24.4	28.3
Espinal	22.4	24.6	27.7	30.7	31.5	32.2	31.8	32.2	31.7	29.5	26.9	24.9	28.8
Martínez de la Torre	22.1	24.2	27.0	29.6	30.8	31.8	31.1	31.6	31.2	29.0	26.4	24.5	28.3
Soledad de D	25.1	27.4	29.5	31.0	31.7	31.9	30.8	30.5	30.7	29.6	27.8	26.9	29.4
Tecuan-tepec	22.0	24.2	27.3	30.6	31.6	32.4	31.4	31.9	31.4	29.2	26.5	24.7	28.6
Rinconada	24.6	26.5	28.4	30.0	30.5	31.0	30.2	30.3	30.2	29.3	27.8	26.7	28.8
Jalcomulco	23.8	25.5	28.0	30.4	30.7	30.8	29.5	29.8	29.9	28.5	26.8	25.7	28.3
Naranja-l	21.5	23.2	25.5	27.3	27.4	27.9	26.8	27.0	27.4	26.1	24.2	23.4	25.7
Teocelo	19.3	21.2	23.5	25.4	25.4	25.4	24.6	24.8	24.8	23.4	22.2	21.3	23.4
Orizaba	19.5	21.2	23.5	25.3	24.8	25.0	23.9	24.5	24.6	23.0	21.5	21.2	23.2
Huatusco	19.4	21.1	23.2	24.9	25.1	25.5	24.7	25.0	25.0	23.8	22.4	21.5	23.4
Xalapa	19.5	21.1	23.4	25.3	25.4	25.2	24.5	24.9	24.9	23.5	22.2	21.5	23.4
Atzalan	15.7	17.7	20.3	22.4	22.2	21.9	20.8	21.2	21.2	19.7	18.6	18.0	20.0
Las Vigas	12.6	14.7	16.8	18.1	18.0	17.1	16.1	16.4	16.1	15.0	14.4	14.2	15.8

Capítulo 2

Tabla 2.25 Temperatura pronosticada por el modelo CCC (corregido) para la región centro de Veracruz bajo condiciones de 2CO₂.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Veracruz	23.0	23.7	25.6	28.5	30.0	29.6	29.5	29.9	29.6	29.0	26.6	24.5	27.5
Remolino	20.3	21.7	24.5	28.5	30.1	29.8	29.5	30.0	29.4	28.0	24.7	21.6	26.5
Espinal	20.6	22.2	25.3	29.2	30.7	30.0	29.9	30.4	29.8	28.5	25.0	21.9	27.0
Martínez de la Torre	20.3	21.7	24.6	28.2	30.0	29.7	29.2	29.8	29.4	28.0	24.6	21.7	26.4
Soledad de D.	23.5	25.0	27.2	29.8	30.8	30.0	28.9	28.9	29.1	28.5	26.4	24.5	27.7
Tecuntepec	20.2	21.7	24.9	29.1	30.8	30.2	29.6	30.2	29.6	28.3	24.7	21.7	26.7
Rinconada	23.0	24.1	26.1	28.8	29.7	29.1	28.4	28.7	28.4	28.2	26.3	24.2	27.1
Jalcomulco	22.1	23.1	25.7	29.1	29.9	28.8	27.7	28.2	28.2	27.5	25.3	23.1	26.5
Naranjal	19.8	20.8	23.1	25.8	26.6	25.9	25.1	25.6	25.9	25.1	22.9	20.8	23.9
Teocelo	17.6	18.7	21.1	24.0	24.6	23.4	22.8	23.3	23.1	22.5	20.7	18.6	21.7
Orizaba	17.8	18.8	21.1	23.9	23.9	22.9	22.0	22.8	22.8	22.0	19.8	18.4	21.4
Huatusco	17.7	18.7	20.7	23.4	24.3	23.4	23.0	23.5	23.3	22.8	20.9	18.9	21.7
Xalapa	17.8	18.6	21.1	23.9	24.6	23.1	22.6	23.2	23.2	22.5	20.6	18.8	21.7
Atzacan	14.0	15.2	17.9	20.9	21.4	19.7	19.0	19.5	19.4	18.7	16.9	15.1	18.2
Las Vigas	10.9	12.3	14.4	16.7	17.2	15.0	14.3	14.7	14.4	14.0	12.8	11.4	14.0

Tabla 2.26 Precipitación pronosticada por el modelo GFDL-R30 (corregido) para la región centro de Veracruz bajo condiciones de 2CO₂.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Veracruz	42.5	7.4	25.7	18.9	53.6	379.4	425.8	435.3	404.3	145.7	61.8	35.9	2036.4
Remolino	83.7	45.9	74.5	55.8	97.8	214.2	144.2	241.8	301.9	138.9	120.7	86.8	1606.2
Espinal	75.9	29.5	47.1	35.6	96.6	331.0	372.5	419.1	359.9	103.1	69.4	54.7	1994.3
Martínez	108.0	64.8	81.7	85.9	118.3	200.9	189.3	241.8	395.4	178.8	153.9	117.1	1935.8
Soledad	33.4	4.6	21.8	30.9	33.6	244.6	288.2	262.6	241.5	70.4	37.8	26.8	1296.0
Tecuntepec	114.9	63.5	99.7	104.1	146.0	362.1	359.7	408.0	411.3	241.7	170.4	113.9	2595.4
Rinconada	40.2	25.0	42.4	21.7	52.4	271.5	246.2	266.0	215.4	56.4	40.1	25.9	1303.3
Jalcomulco	42.2	14.4	34.7	27.3	76.0	288.5	252.5	260.6	285.4	88.1	43.9	29.1	1442.7
Naranjal	102.1	62.6	73.8	104.4	166.2	471.3	459.3	473.9	455.5	196.1	99.7	93.1	2757.8
Teocelo	91.6	58.2	99.5	75.5	156.6	434.5	332.8	365.4	411.3	183.4	111.4	75.9	2396.0
Orizaba	84.0	36.0	60.6	63.5	137.7	488.1	494.4	489.6	432.7	223.0	111.7	72.4	2693.7
Huatusco	75.0	40.8	61.9	78.4	137.4	471.1	395.4	374.9	413.5	160.1	85.4	55.3	2349.1
Xalapa	67.7	35.9	51.5	51.0	109.1	323.9	227.9	264.8	291.5	100.9	68.9	60.0	1653.1
Atzacan	85.3	45.6	62.7	59.9	113.3	363.0	248.3	333.8	440.6	216.9	139.1	76.4	2184.6
Las Vigas	56.3	21.9	35.9	34.1	63.5	219.8	188.2	229.8	289.6	118.9	78.7	49.1	1385.8

Capítulo 2

Tabla 2.27 Precipitación pronosticada por el modelo CCC (corregido) para la región centro de Veracruz bajo condiciones de 2CO₂.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Veracruz	4.1	0.1	0.0	63.5	61.0	233.2	356.3	353.0	256.5	179.6	65.6	15.2	1588.2
El Remolino	26.2	21.6	23.4	111.6	113.3	80.2	54.4	152.3	128.5	176.6	114.4	45.8	1048.2
Espinal	36.9	23.6	12.3	98.1	141.4	207.9	251.8	282.5	191.5	177.0	80.8	33.7	1537.6
Mtz. de la Torre	48.6	38.7	32.5	143.6	133.8	60.3	94.2	148.8	218.6	218.4	147.6	75.6	1360.6
Soledad de D.	0.0	0.0	0.0	70.3	33.6	86.8	208.4	177.3	82.9	95.0	30.8	0.0	785.2
Tecantepec	46.6	32.2	41.8	165.5	161.9	216.2	247.7	307.4	224.2	283.2	158.5	63.3	1948.4
Rinconada	0.0	12.5	9.1	68.6	60.5	120.1	163.3	178.0	60.2	93.8	38.6	0.0	804.6
Jalcomulco	0.0	0.0	0.0	77.5	86.0	134.1	166.6	169.1	125.0	125.5	42.4	0.0	924.0
Naranjal Fortín	62.2	50.4	47.7	151.3	172.0	302.1	370.6	379.8	298.8	232.3	97.9	68.1	2233.0
Teocelo	40.9	39.1	62.6	127.6	167.0	278.2	239.9	270.9	247.5	222.3	106.2	41.7	1844.1
Orizaba	8.5	0.0	0.7	104.5	147.8	341.1	392.3	382.5	241.8	246.1	85.8	14.5	1965.7
Huatusco	29.8	26.5	27.0	129.0	145.5	308.6	302.1	280.0	251.6	197.5	82.1	25.0	1804.5
Xalapa	17.0	18.2	11.2	103.1	121.5	172.5	135.5	170.6	125.5	139.3	63.7	24.3	1102.4
Atzacan	27.8	21.3	15.5	117.6	126.4	212.6	145.8	237.4	266.0	255.3	132.4	33.0	1591.1
Las Vigas	0.0	0.0	0.0	88.0	72.4	62.5	86.9	130.7	114.7	153.5	70.2	9.6	788.4

De la comparación de los valores de la precipitación anual obtenidos a partir de los modelos con los valores correspondientes al escenario base 61-90, se encuentra que en general el modelo GFDLR-30 (corregido) proyecta incrementos de la precipitación (Tabla 4.22). Por otra parte, el modelo CCC (corregido) decrementos y ausencia de la misma en algunos meses del periodo invernal (estaciones de Soledad de Doblado, Rinconada, Jalcomulco, Orizaba y Las Vigas) y al inicio de la primavera (estaciones de Veracruz, Soledad de Doblado, Jalcomulco y Las Vigas). Los resultados obtenidos se discuten con detalle en el capítulo siguiente.

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se analizan con más detalle las proyecciones de temperatura y precipitación que se obtienen con los modelos GFDL-R30 y CCC para la región centro del estado de Veracruz, previa aplicación de la reducción de escala a las salidas de los MCG. El análisis de la información se realiza de manera anual, estacional y mensual, y sólo en el caso de la precipitación se agrega el análisis de dos periodos: noviembre – abril y mayo – octubre, por ser representativos de la menor y mayor variación temporal de esta variable atmosférica en las condiciones actuales.

3.1 Escenarios futuros de temperatura para la región centro del estado Veracruz

3.1.1 Temperatura media anual

A partir de las temperaturas promedio mensual (corregidas) pronosticadas por los modelos GFDL-R30 (Tabla 2.24) y CCC (Tabla 2.25) se obtuvieron los promedios anuales (Tabla 3.1) y estacionales (Tabla 3.2) para cada MCG con el fin de generar los escenarios de cambio para estos periodos.

Tabla 3.1 Temperaturas medias anuales (°C) observadas y estimadas por los MCG bajo condiciones de 2CO₂

Estación	Altitud (msnm)	61-90	Modelo	
			CCC	GFDL
Veracruz	2	25.3	27.5	29.1
El Remolino	35	24.3	26.5	28.3
Espinal	111	24.7	27.0	28.8
Martínez de la Torre	152	24.2	26.4	28.3
Soledad de Doblado	183	25.5	27.7	29.4
Tecantepec	250	24.5	26.7	28.6
Rinconada	313	24.9	27.1	28.8
Jalcomulco	330	24.3	26.5	28.3
Naranjal Fortín	697	21.8	23.9	25.7
Teocelo	1218	19.5	21.0	23.4
Orizaba	1259	19.1*	21.4	23.2
Huatusco	1344	19.5	21.7	23.4
Xalapa	1427	19.5	21.7	23.4
Atzacan	1842	15.9	18.2	20.0
Las Vigas	2400	11.8	14.0	15.8

*Datos tomados de las normales climatológicas (61-90) del SMN

De la Tabla 3.1 se aprecia que los dos modelos muestran una disminución de la temperatura conforme se incrementa la altitud. En general las diferencias que se dan entre las

temperaturas correspondientes al escenario base (1961-1990) y las de los escenarios de cambio climático debido a una duplicación de dióxido de carbono, son de entre dos y cuatro grados centígrados. Ambos modelos de circulación general coinciden en un incremento mayor o igual a 2 °C en las temperaturas medias anuales de la región centro de Veracruz.

La Figura 3.1 muestra el descenso de la temperatura con la altura antes mencionado, así como la forma en que las curvas correspondientes a los MCG siguen el comportamiento de la temperatura normal aún en las zonas de elevada altitud, situación que no se tenía en las salidas para condiciones de 1CO₂ atmosférico sin reducción de escala (ver Figuras 2.1 y 2.2).

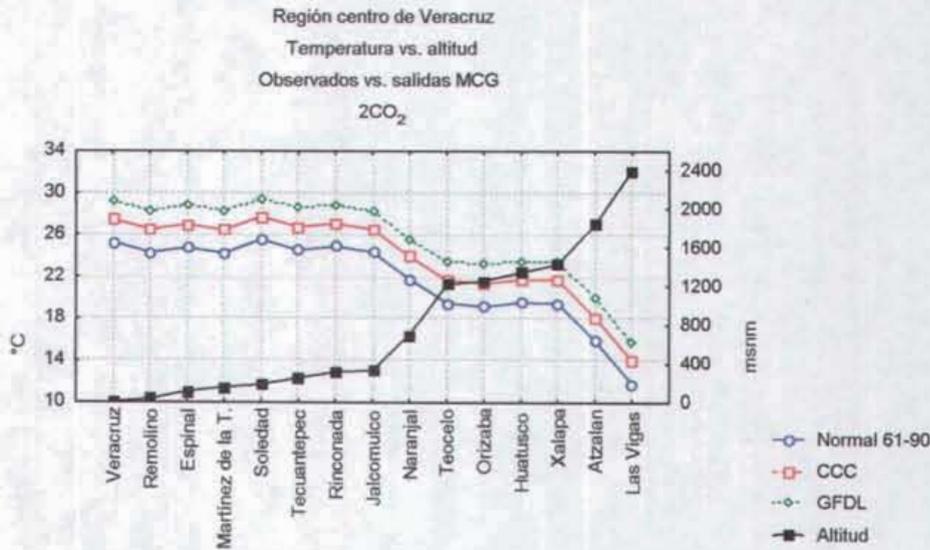


Figura 3.1 Distribución de las temperaturas medias anuales bajo condiciones de cambio climático.

3.1.2 Temperatura media mensual

Las Figuras 3.2 y 3.3 muestran el comportamiento de las temperaturas medias mensuales bajo condiciones de 2CO₂. Los modelos coinciden en que enero sería el mes más frío y presentan discrepancias en cuanto al mes más cálido; el modelo GFDL-R30 apunta hacia el mes de junio mientras que el modelo CCC lo hace hacia el mes de mayo. Se observa que los meses de noviembre y marzo separan los meses cálidos de los fríos, y que los meses de diciembre y febrero difieren muy poco en cuanto a valores de temperatura.

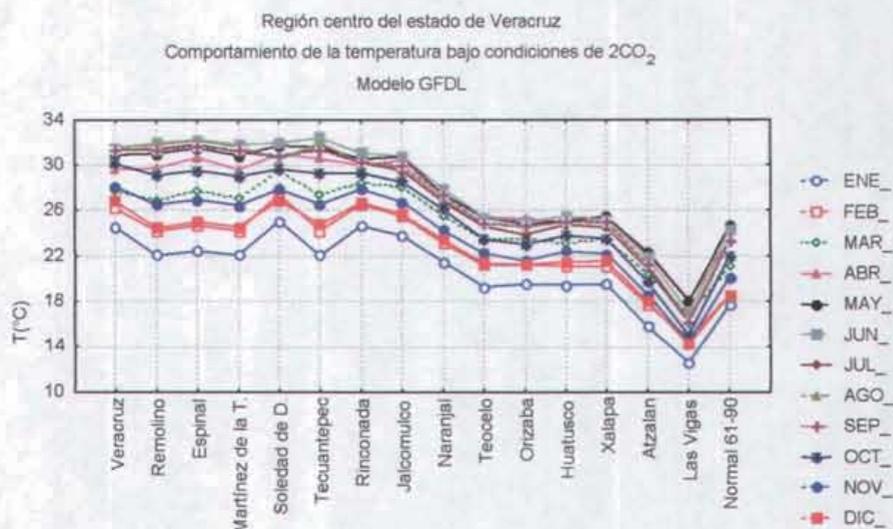


Figura 3.2 Temperaturas medias mensuales proyectadas a lo largo del año por el modelo GFDL-30, para cada una de las estaciones consideradas en el estudio. Enero sería el mes más frío en toda la región y junio el más cálido.

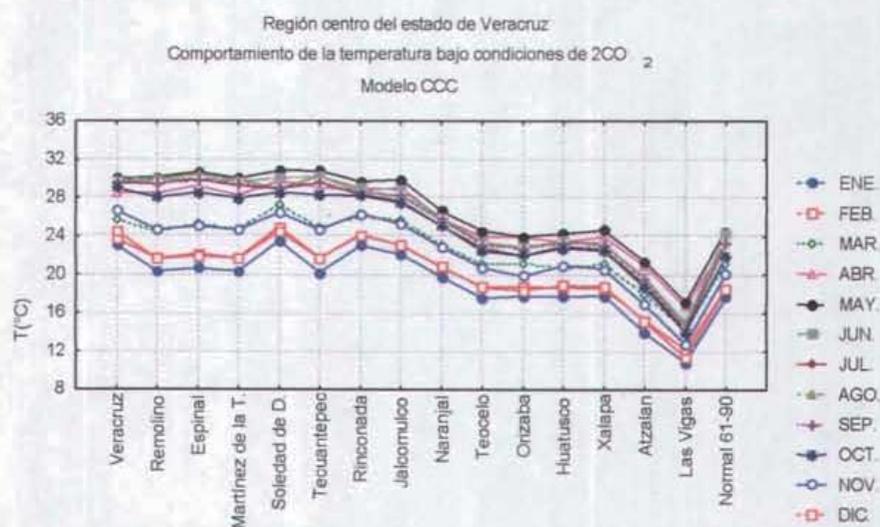


Figura 3.3 Temperaturas medias mensuales proyectadas a lo largo del año por el modelo CCC; para cada una de las estaciones consideradas en el estudio. Enero sería el mes más frío en toda la región y mayo el más cálido.

3.1.3 Temperatura por estación del año

La Tabla 3.2 muestra los valores de temperatura promedio para el invierno, la primavera, el verano y el otoño proyectada por los modelos y permite comparar dichos valores con los correspondientes al escenario base.

Capítulo 3

Tabla 3.2. Tabla comparativa de temperaturas (°C) promedio observadas y estimadas por los MCG bajo condiciones de 2CO₂ por estación del año.

Estación	Invierno			Verano			Primavera			Otoño		
	61-90	Modelo		61-90	Modelo		61-90	Modelo		61-90	Modelo	
		CCC	GFDL		CCC	GFDL		CCC	GFDL		CCC	GFDL
Veracruz	21.9	23.7	25.8	27.5	29.7	31.5	25.8	28.0	29.4	25.8	28.4	29.8
El Remolino	19.5	21.2	23.5	27.6	29.8	31.7	25.3	27.7	29.2	24.7	27.3	28.9
Espinal	19.9	21.6	24.0	28.0	30.1	32.1	26.0	28.4	29.9	25.1	27.8	29.4
Martínez de la Torre	19.5	21.3	23.6	27.5	29.6	31.5	25.2	27.6	29.1	24.7	27.3	28.9
Soledad de Doblado	22.5	24.3	26.4	27.2	29.3	31.1	27.0	29.3	30.7	25.4	28.0	29.4
Tecantepec	19.5	21.2	23.7	27.9	30.0	31.9	25.8	28.3	29.8	24.8	27.5	29.0
Rinconada	22.0	23.8	26.0	26.6	28.7	30.5	25.9	28.2	29.7	25.1	27.7	29.1
Jalcomulco	21.0	22.8	25.0	26.1	28.2	30.0	25.9	28.2	29.7	24.4	27.0	28.4
Naranjal Fortín	18.7	20.5	22.7	23.5	25.5	27.2	22.9	25.2	26.8	22.1	24.6	25.9
Teocelo	16.5	18.3	20.6	21.0	23.1	24.9	20.9	23.2	24.8	19.5	22.1	23.5
Orizaba	16.6*	18.3	20.6	20.5*	22.6	24.5	20.6*	23.0	24.5	18.9*	21.5	23.0
Huatusco	16.6	18.4	20.7	21.2	23.3	25.0	20.5	22.8	24.4	19.8	22.3	23.7
Xalapa	16.6	18.4	20.7	20.9	23.0	24.8	20.9	23.2	24.7	19.5	22.1	23.5
Atzalan	13.0	14.8	17.1	17.3	19.4	21.3	17.7	20.1	21.6	15.7	18.3	19.8
Las Vigas	9.8	11.5	13.8	12.6	14.7	16.5	13.8	16.1	17.6	11.1	13.7	15.2

* Datos tomados de las normales climatológicas 61-90 del SMN.

3.1.4 Anomalías climáticas de temperatura

3.1.4.1 Anomalías por mes

En las Tablas 3.3 y 3.4 se presentan las anomalías climáticas⁷ de temperatura que se generan de acuerdo a los modelos GFDL-R30 y CCC bajo condiciones de cambio climático por duplicación de CO₂ atmosférico. Las tablas fueron divididas de acuerdo a lo observado en las Figuras 3.2 y 3.3.

Los datos muestran mayores diferencias en los meses de diciembre, enero y marzo; el modelo GFDL-R30 predice grandes cambios positivos de temperatura durante el primer y último mes del invierno, marzo y septiembre.

⁷ Anomalía climática: Diferencia entre un estado climático y el estado medio (Seillers *et al.*, 1990: p 2).

Tabla 3.3. Anomalías de temperatura (°C) para el periodo frío e inicios del cálido.

Estación	Nov.		Dic.		Ene.		Feb.		Mar.		Abr.	
	GFDL	CCC										
Veracruz	3.9	2.5	4.2	1.9	3.1	1.7	4.3	1.9	4.0	1.8	3.6	2.5
El Remolino	4.3	2.4	4.6	1.8	3.2	1.5	4.4	1.9	4.2	1.8	4.1	2.8
Espinal	4.3	2.4	4.7	1.7	3.3	1.5	4.3	1.9	4.3	1.9	4.4	2.9
Martínez de la Torre	4.2	2.4	4.6	1.8	3.3	1.5	4.3	1.9	4.2	1.9	4.2	2.8
Soledad de Doblado	3.8	2.5	4.3	1.9	3.2	1.7	4.3	1.9	4.1	1.8	3.8	2.5
Tecantepec	4.3	2.4	4.7	1.7	3.3	1.5	4.3	1.9	4.3	1.9	4.4	2.9
Rinconada	4.0	2.5	4.4	1.9	3.2	1.6	4.3	1.9	4.1	1.8	3.9	2.6
Jalcomulco	3.9	2.4	4.5	1.9	3.3	1.6	4.3	1.9	4.2	1.8	4.0	2.6
Naranjal Fortín	3.8	2.4	4.5	1.9	3.4	1.7	4.3	1.9	4.3	1.8	4.1	2.5
Teocelo	4.0	2.4	4.5	1.8	3.3	1.6	4.3	1.9	4.3	1.8	4.1	2.7
Orizaba	4.1	2.4	4.6	1.8	3.3	1.6	4.3	1.9	4.2	1.8	4.2	2.8
Huatusco	3.9	2.4	4.5	1.9	3.3	1.6	4.3	1.9	4.3	1.8	4.1	2.6
Xalapa	4.0	2.4	4.5	1.8	3.3	1.6	4.3	1.9	4.2	1.8	4.1	2.7
Atzalan	4.1	2.4	4.6	1.8	3.3	1.6	4.3	1.9	4.3	1.8	4.3	2.8
Las Vigas	4.1	2.4	4.6	1.8	3.3	1.6	4.3	1.9	4.3	1.8	4.2	2.7
Promedio												

Valores por arriba de los 4.0°C; Valores por debajo de los 2°C; meses de transición entre periodos fríos y cálidos.

Tabla 3.3. Anomalías de temperatura (°C) para el periodo cálido.

Estación	May.		Jun.		Jul.		Ago.		Sep.		Oct.	
	GFDL	CCC										
Veracruz	3.3	2.4	3.8	1.9	4.0	2.1	4.0	2.3	4.1	2.4	3.9	2.8
El Remolino	3.3	2.5	3.9	1.8	4.0	2.1	4.2	2.4	4.4	2.5	4.1	3.0
Espinal	3.3	2.5	3.9	1.7	4.0	2.1	4.3	2.5	4.4	2.5	4.1	3.1
Martínez de la Torre	3.3	2.5	3.9	1.8	4.0	2.1	4.2	2.4	4.3	2.5	4.1	3.1
Soledad de Doblado	3.2	2.4	3.8	1.9	3.9	2.1	3.9	2.3	4.1	2.4	3.9	2.8
Tecantepec	3.3	2.5	3.9	1.7	4.0	2.1	4.2	2.5	4.3	2.5	4.1	3.1
Rinconada	3.2	2.4	3.8	1.9	3.9	2.1	4.0	2.4	4.2	2.4	3.9	2.9
Jalcomulco	3.2	2.4	3.8	1.8	3.9	2.1	3.9	2.4	4.1	2.4	3.9	2.9
Naranjal Fortín	3.1	2.3	3.8	1.9	3.8	2.1	3.7	2.4	4.0	2.4	3.8	2.8
Teocelo	3.2	2.4	3.9	1.8	3.9	2.1	3.9	2.4	4.1	2.5	3.9	2.9
Orizaba	3.3	2.4	3.9	1.8	4.0	2.1	4.1	2.4	4.3	2.5	4.0	3.0
Huatusco	3.2	2.4	3.9	1.8	3.8	2.1	3.9	2.4	4.1	2.4	3.9	2.9
Xalapa	3.2	2.4	3.9	1.8	3.9	2.1	4.0	2.4	4.2	2.5	3.9	2.9
Atzalan	3.2	2.4	3.9	1.8	3.9	2.1	4.1	2.4	4.2	2.5	4.0	3.0
Las Vigas	3.2	2.4	3.9	1.8	3.9	2.1	4.0	2.4	4.2	2.5	4.0	3.0

Valores por arriba de los 4.0°C; Valores por debajo de los 2°C

3.1.4.2 Anomalías por estación del año

Tabla 3.4. Anomalías climáticas de temperatura (°C).

Estación	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
Veracruz	3.9	1.8	2.9	2.2	3.9	2.1	4.0	2.6
Remolino	4.1	1.7	2.9	2.4	4.1	2.1	4.2	2.7
Espinal	4.1	1.7	2.9	2.4	4.1	2.1	4.3	2.7
Martínez de la Torre	4.1	1.7	2.9	2.4	4.0	2.1	4.2	2.7
Soledad de Doblado	3.9	1.8	2.9	2.2	3.9	2.1	3.9	2.6
Tecuntepec	4.1	1.7	2.9	2.4	4.0	2.1	4.2	2.7
Rinconada	4.0	1.8	2.9	2.3	3.9	2.1	4.0	2.6
Jalcomulco	4.0	1.8	2.9	2.3	3.9	2.1	4.0	2.6
Naranjal Fortín	4.0	1.8	2.9	2.2	3.8	2.1	3.9	2.6
Teocelo	4.1	1.8	2.9	2.3	3.9	2.1	4.0	2.6
Orizaba	4.1	1.7	2.9	2.4	4.0	2.1	4.1	2.6
Huatusco	4.0	1.8	2.9	2.3	3.8	2.1	3.9	2.6
Xalapa	4.0	1.8	2.9	2.3	3.9	2.1	4.0	2.6
Atzacan	4.1	1.7	2.9	2.4	4.0	2.1	4.1	2.6
Las Vigas	4.1	1.7	2.9	2.3	3.9	2.1	4.1	2.6

De los datos de la Tabla 3.4 se encuentra que los modelos difieren menos en la estación de la primavera (0.6 °C en promedio) y más en la estación del invierno (2.3 °C en promedio); en general se tendrían estaciones más cálidas por incrementos en la temperatura.

3.2 Escenarios futuros de precipitación para la región centro del estado de Veracruz

3.2.1 Precipitación media anual

En este apartado se presentaran las proyecciones que hacen los MCG para la precipitación. A partir de los valores promedio mensual pronosticados (corregidos) por los modelos GFDL-R30 (Tabla 2.26) y CCC (Tabla 2.27), se obtuvieron los promedios anuales (Tabla 3.5) y estacionales (Tabla 3.6) para cada modelo con el fin de generar los escenarios de cambio para esos periodos.

Tabla 3.5. Precipitaciones medias anuales (mm) observadas y estimadas por los MCG bajo condiciones de 2CO₂

Estación	Altitud	61-90	Modelo	
			CCC	GFDL
Veracruz	2	1732.7	1588.2	2036.4
El Remolino	35	1250.4	1048.2	1606.2
Espinal	111	1295.0	1537.6	1994.3
Martínez de la T.	152	1574.1	1360.6	1935.8
Soledad de Doblado	183	974.3	785.2	1296.0
Tecuan-tepec	250	2203.2	1948.4	2595.4
Rinconada	313	972.2	804.6	1303.3
Jalcomulco	330	1102.6	924.0	1442.7
Naranjal Fortín	697	2421.1	2333.0	2757.8
Teocelo	1218	2046.8	1844.1	2396.0
Orizaba*	1259	2180.5	1965.7	2693.7
Huatusco	1344	2000.0	1804.5	2349.1
Xalapa	1427	1305.1	1102.4	1653.1
Atzalan	1842	1812.4	1591.1	2184.6
Las Vigas	2400	1024.3	788.4	1385.8

*Datos tomados de las normales climatológicas (61-90) del SMN

Disminución de la precipitación anual

Los modelos coinciden en un incremento de la precipitación media anual para la estación de Espinal la cual se encuentra en la parte norte de la región de estudio. En general el modelo CCC proyecta disminución y el GFDL-R30 incremento en las precipitaciones anuales respecto al periodo 1961-1990.

La Figura 3.4 permite observar el efecto que tiene el relieve de la región en el comportamiento espacial de la precipitación; la precipitación no se incrementa con el incremento en la altitud a partir de los 1420 msnm; sin embargo, las curvas muestran un comportamiento similar al de la precipitación observada, situación que no se tenía bajo condiciones de 1CO₂ atmosférico.

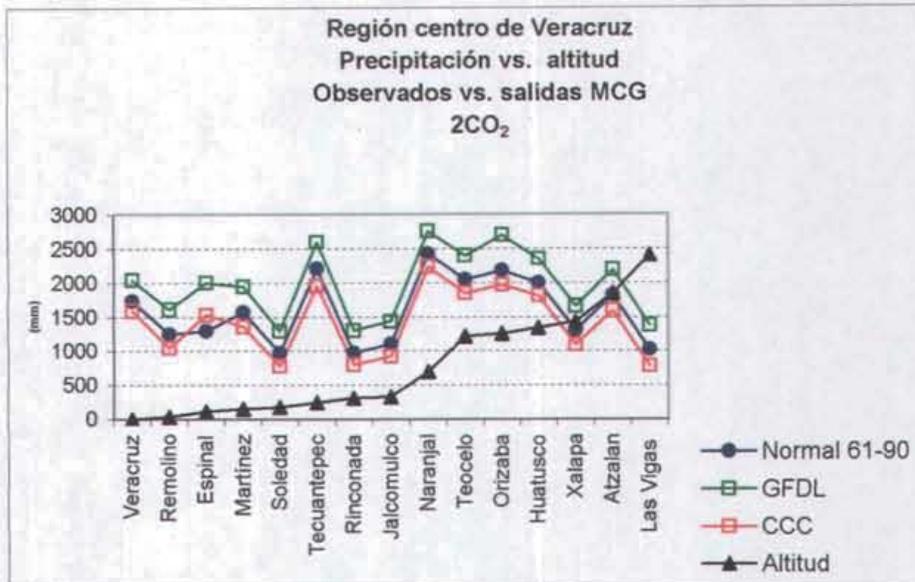


Figura 3.4. Distribución de la precipitación promedio anual bajo condiciones de cambio climático.

3.2.2 Precipitación media mensual

Las Figuras 3.5 y 3.6 permiten observar el comportamiento espacial que tendrían las precipitaciones bajo condiciones de 2CO₂ en la región de estudio por mes. Los modelos coinciden en que diciembre, febrero y marzo serían los meses con menor precipitación y julio y agosto los de mayor precipitación. Se presentan discrepancias en cuanto al mes de septiembre, mes de máxima actividad ciclónica en la región (Jáuregui, 1995); el modelo GFDL-R30 proyecta valores en general mayores a los observados. El modelo CCC no muestra una diferencia tan marcada entre los valores de precipitación de los meses de septiembre y octubre como el modelo GFDL-R30.

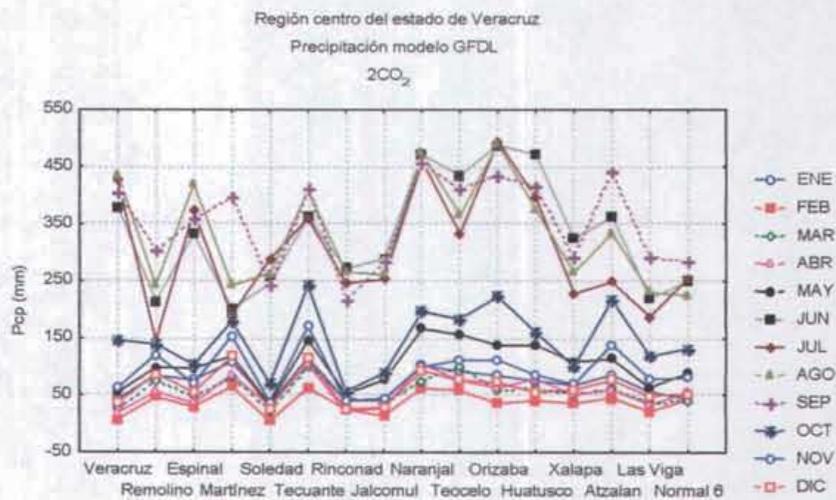


Figura 3.5. Precipitaciones medias mensuales estimadas por el modelo GFDL-R30.

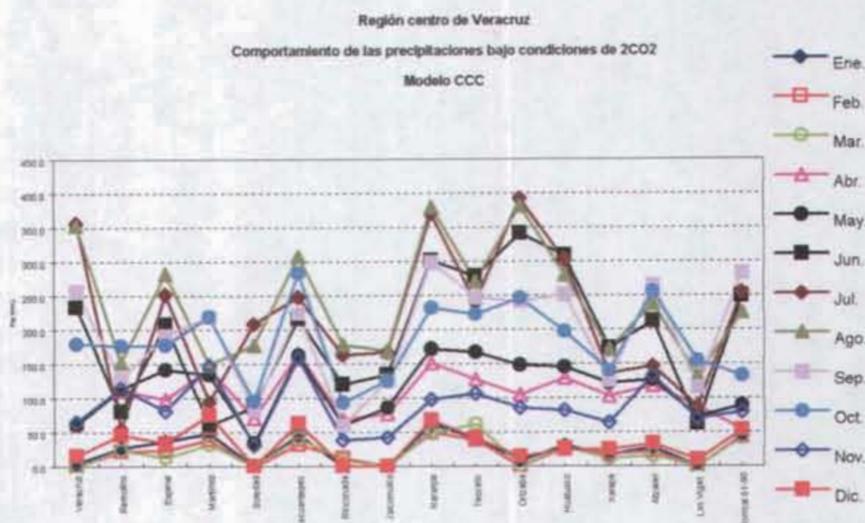


Figura 3.6. Precipitaciones medias mensuales estimadas por el modelo CCC.

3.2.3 Precipitación por estación del año

La Tabla 3.6 muestra los valores de precipitación proyectados por los MCG para el invierno, la primavera, el verano y el otoño, y permite comparar dichos valores con los correspondientes al escenario base.

Tabla 3.6. Tabla comparativa de las precipitaciones (mm) observadas y estimadas por los MCG bajo condiciones de 2CO₂ por estación del año.

Estación	Invierno			Primavera			Verano			Otoño		
	61-90	GFDL	CCC	61-90	GFDL	CCC	61-90	GFDL	CCC	61-90	GFDL	CCC
Veracruz	50.2	85.7	19.4	370.3	98.2	124.5	1097.6	1240.6	942.6	214.6	611.9	501.7
El Remolino	162	216.4	93.5	287.3	228.1	248.3	483.4	600.2	286.9	317.7	561.4	419.4
Espinal	46.5	160.0	94.2	325.9	179.3	251.8	804.4	1122.6	742.2	118.2	532.4	449.3
Martínez de la Torre	212.4	289.9	162.9	321.7	285.9	309.9	617.4	632.0	303.3	422.6	728.0	584.6
Soledad de Doblado	35.9	64.7	0.0	218.4	86.2	103.9	615.4	795.4	472.5	104.6	349.7	208.7
Tecuantepec	229.9	292.3	142.1	525.8	349.9	369.1	950.2	1129.8	771.3	497.3	823.4	665.9
Rinconada	77.7	91.1	12.5	257.9	116.5	138.1	544.5	783.8	461.4	92.1	311.9	192.6
Jalcomulco	58.4	85.7	0.0	302.6	138.0	163.5	609.3	801.6	469.8	132.3	417.4	292.9
Naranjal Fortín	210.2	257.7	180.7	645.3	344.3	370.9	1205.6	1404.5	1052.4	360.0	751.3	629.0
Teocelo	214.8	225.6	121.7	575.9	331.6	357.3	912.7	1132.7	789.1	343.4	706.0	576.0
Orizaba*	95.5	192.4	23.0	585.1	261.8	253.1	1174.5	1472.1	1115.9	325.4	767.3	573.8
Huatusco	146.2	171.1	81.3	591.8	277.6	301.4	990.0	1241.4	890.7	272.0	659.0	531.1
Xalapa	120.5	163.6	59.5	396.3	211.6	235.8	585.8	816.6	478.6	202.5	461.2	328.5
Atzalan	151.5	207.3	82.1	448.3	235.8	259.4	809.0	945.0	595.8	403.6	796.5	653.8
Las Vigas	75.1	127.3	9.6	229.7	133.6	160.5	501.6	637.9	280.1	217.9	487.1	338.3

Incremento en la precipitación; disminución en la precipitación.

Capítulo 3

De la Tabla 3.6 se observa que los modelos coinciden en proyectar para la región centro de Veracruz valores por abajo de lo observado para la primavera, y por arriba para el otoño. Las proyecciones difieren en el caso del invierno y verano.

3.2.4. Análisis de los periodos húmedo y seco en la región de estudio.

A partir de las gráficas de las salidas de los MCG para condiciones de 2CO₂ se encuentra que los meses con menor variación en el comportamiento y valores de la precipitación van de noviembre a abril, y los meses de mayor variación se encuentran dentro del periodo mayo a octubre. La Tabla 3.7 permite comparar los valores de precipitación de estos periodos con los valores observados (1961-1990) y conocer los cambios que se darían en cada periodo.

Tabla 3.7. Razón de cambio (%) de la precipitación según los MCG para los periodos May.-Oct., Nov.-Abr.

Estación	Latitud	61-90		Cambio (%)			
				Mayo - Octubre		Noviembre- Abril	
		May.-Oct.	Nov.-Abr.	GFDL	CCC	GFDL	CCC
Naranjal Fortín	18° 49'	1930.3	490.8	15.1	-9.1	9.1	-2.7
Orizaba	18° 52'	1910.9	269.6	18.6	-8.3	58.8	-20.6
Soledad de Doblado	19° 03'	861.0	113.3	32.5	-20.5	37.0	-10.8
Huatusco	19° 09'	1654.3	345.7	18.0	-10.2	14.8	-7.6
Veracruz	19° 12'	1582.5	150.2	16.5	-9.0	27.9	-1.2
Jalcomulco	19° 20'	962.0	140.6	30.1	-16.2	36.2	-14.7
Rinconada	19° 21'	827.9	144.3	33.8	-18.4	35.4	-10.8
Teocelo	19° 23'	1587.3	459.5	18.7	-10.2	11.4	-9.0
Xalapa	19° 32'	1024.3	280.8	28.7	-15.6	19.3	-15.4
Las Vigas	19° 39'	808.4	215.9	37.3	-23.2	27.8	-22.3
Atzacan	19° 48'	1406.6	405.8	22.0	-11.6	15.6	-14.4
Martínez de la T.	20° 04'	1027.4	546.7	28.9	-14.9	11.8	-11.0
Tecuntepec	20° 08'	1609.0	594.2	19.9	-10.5	12.2	-14.5
El Remolino	20° 10'	849.2	401.2	34.1	-17.0	16.5	-14.5
Espinal	20° 15'	1183.4	111.6	42.1	5.8	179.7	155.8

De la Tabla 3.7 se aprecia que en general el modelo GFDL-R30 proyecta incrementos en la precipitación en ambos periodos, indicando mayor incremento en el periodo Nov.-Abr.; el modelo CCC lo hace hacia la disminución de la precipitación sobre todo en el periodo May.-Oct.. Las mayores disminuciones en ambos periodos se pronostican para Las Vigas, y los mayores aumentos para Espinal.

3.2.5 Cambios en la precipitación

En esta sección se realiza una descripción de los cambios que se darían en la precipitación según los modelos de circulación general considerados en este trabajo. Los resultados se presentan a través de tablas de valores estacionales y mensuales, estos últimos agrupados en dos periodos: seco y húmedo respectivamente.

La Tabla 3.8 proporciona las razones de cambio que se obtienen de acuerdo a los modelos GFDL-R30 y CCC para la precipitación bajo condiciones de cambio climático por duplicación de CO₂ atmosférico.

Tabla 3.8. Razón de cambio de la precipitación obtenidas a partir de los MCG.

Estación	Invierno		Primavera		Verano		Otoño	
	Modelo		Modelo		Modelo		Modelo	
	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC	GFDL	CCC
Veracruz	1.7	0.2	0.3	0.3	1.1	0.8	2.9	2.3
El Remolino	1.3	0.4	0.8	0.9	1.2	0.5	1.8	1.3
Espinal	3.4	0.6	0.6	0.8	1.4	0.7	4.5	3.8
Martínez de la Torre	1.4	0.6	0.9	1.0	1.0	0.5	1.7	1.4
Soledad de Doblado	1.8	0.0	0.4	0.5	1.3	0.6	3.3	2.0
Tecantepec	1.3	0.5	0.7	0.7	1.2	0.7	1.7	1.3
Rinconada	1.2	0.1	0.5	0.5	1.4	0.6	3.4	2.1
Jalcomulco	1.5	0.0	0.5	0.5	1.3	0.6	3.2	2.2
Naranjal Fortín	1.2	0.7	0.5	0.6	1.2	0.7	2.1	1.7
Teocelo	1.1	0.5	0.6	0.6	1.2	0.7	2.1	1.7
Orizaba*	2.0	0.1	0.4	0.4	1.3	0.8	2.4	1.8
Huatusco	1.2	0.5	0.5	0.5	1.3	0.7	2.4	2.0
Xalapa	1.4	0.4	0.5	0.6	1.4	0.6	2.3	1.6
Atzalan	1.4	0.4	0.5	0.6	1.2	0.6	2.0	1.6
Las Vigas	1.7	0.1	0.6	0.7	1.3	0.4	2.2	1.6

Aumento, disminución, sin cambio, y agotamiento en la precipitación.

Sobresalen las proyecciones del modelo CCC que apuntan a un posible agotamiento del recurso agua para las estaciones de Jalcomulco y Soledad de Doblado durante el invierno. En general el modelo CCC predice disminuciones de la precipitación en todas las estaciones del año excepto en el otoño, y el modelo GFDL-R30 aumentos excepto en la primavera.

En las Tablas 3.9 y 3.10 se proporcionan las razones de cambio en la precipitación por mes y en los periodos may.-oct. y nov.-abr. Se encuentra que los modelos GFDL-R30 y CCC coinciden en proyectar incrementos en la precipitación en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, y una disminución de ésta en febrero. Los modelos muestran discrepancias en los meses restantes, cabe mencionar que para estos meses el modelo GFDL-R30 predice aumentos y el CCC disminuciones excepto en el mes de agosto (sin cambio).

Tabla 3.9. Cambio en la precipitación mensual de mayo a octubre.

Estación	May.		Jun.		Jul.		Ago.		Sep.		Oct.	
	Modelo		Modelo		Modelo		Modelo		Modelo		Modelo	
	GFDL	CCC										
Veracruz	1.1	1.3	1.2	0.8	1.1	0.9	1.2	1.0	1.2	0.7	1.1	1.3
El Remolino	1.2	1.4	1.4	0.5	1.4	0.5	1.7	1.1	1.3	0.5	1.0	1.3
Espinal	1.5	2.2	1.4	0.8	1.3	0.9	1.6	1.1	1.4	0.8	1.5	2.6
Martínez de la T.	1.1	1.3	1.5	0.5	1.3	0.6	1.7	1.1	1.2	0.7	1.0	1.3
Soledad de D.	1.3	1.3	1.5	0.5	1.1	0.8	1.5	1.0	1.4	0.5	1.2	1.7
Tecantepec	1.1	1.3	1.2	0.7	1.2	0.8	1.4	1.0	1.2	0.7	1.0	1.2
Rinconada	1.2	1.4	1.4	0.6	1.1	0.8	1.5	1.0	1.4	0.4	1.2	2.1
Jalcomulco	1.1	1.3	1.4	0.6	1.1	0.8	1.6	1.0	1.3	0.6	1.1	1.6
Naranjal Fortín	1.0	1.1	1.2	0.8	1.1	0.9	1.2	1.0	1.2	0.8	1.1	1.3
Teocelo	1.1	1.1	1.2	0.8	1.1	0.8	1.4	1.0	1.2	0.7	1.1	1.3
Orizaba	1.1	1.2	1.2	0.8	1.1	0.9	1.3	1.0	1.2	0.7	1.1	1.2
Huatusco	1.1	1.1	1.2	0.8	1.1	0.8	1.3	1.0	1.2	0.7	1.1	1.3
Xalapa	1.1	1.2	1.3	0.7	1.2	0.7	1.6	1.0	1.3	0.6	1.1	1.5
Atzalan	1.1	1.3	1.3	0.7	1.2	0.7	1.5	1.0	1.2	0.7	1.0	1.2
Las Vigas	1.2	1.4	1.5	0.4	1.3	0.6	1.8	1.0	1.3	0.5	1.1	1.4
Promedio	1.2	1.3	1.3	0.7	1.2	0.8	1.5	1.0	1.3	0.6	1.1	1.5

Incrementos, disminución, sin cambio en la precipitación.

Tabla 3.10. Cambio en la precipitación mensual de noviembre a abril.

Estación	Nov.		Dic.		Ene.		Feb.		Mar.		Abr.	
	Modelo		Modelo		Modelo		Modelo		Modelo		Modelo	
	GFDL	CCC										
Veracruz	1.1	1.2	1.3	0.6	2.2	0.2	0.5	0.0	1.7	0.0	1.0	3.4
El Remolino	1.1	1.1	1.2	0.6	1.6	0.5	0.9	0.4	1.3	0.4	1.0	2.0
Espinal	2.1	2.5	3.3	2.1	4.3	2.1	1.6	1.3	4.5	1.2	2.2	6.0
Martínez de la T.	1.1	1.0	1.1	0.7	1.4	0.6	0.9	0.5	1.3	0.5	1.0	1.7
Soledad	1.3	1.1	1.4	0.0	3.2	0.0	0.4	0.0	1.7	0.0	1.1	2.4
Tecantepec	1.1	1.0	1.1	0.6	1.4	0.6	0.9	0.5	1.3	0.5	1.0	1.6
Rinconada	1.3	1.2	1.7	0.0	2.8	0.0	0.8	0.4	1.4	0.3	1.1	3.4
Jalcomulco	1.3	1.2	1.5	0.0	2.6	0.0	0.7	0.0	1.7	0.0	1.0	2.8
Naranjal Fortín	1.1	1.1	1.1	0.8	1.3	0.8	0.9	0.7	1.2	0.8	1.0	1.5
Teocelo	1.1	1.0	1.1	0.6	1.4	0.6	0.9	0.6	1.2	0.7	1.0	1.7
Orizaba	1.4	1.0	1.7	0.3	2.5	0.3	1.2	0.0	1.9	0.0	1.3	2.1
Huatusco	1.1	1.1	1.2	0.5	1.5	0.6	0.8	0.5	1.3	0.6	1.0	1.7
Xalapa	1.1	1.1	1.2	0.5	1.7	0.4	0.8	0.4	1.4	0.3	1.0	2.0
Atzalan	1.1	1.0	1.2	0.5	1.6	0.5	0.9	0.4	1.4	0.3	1.0	2.0
Las Vigas	1.2	1.0	1.3	0.2	2.2	0.0	0.8	0.0	1.7	0.0	1.0	2.6
Promedio	1.2	1.2	1.4	0.5	2.1	0.5	0.9	0.4	1.7	0.4	1.1	2.4

Incrementos, disminución, sin cambio en la precipitación.

3.2.6 Climatología de la región de estudio bajo condiciones de cambio climático por duplicación de CO₂ atmosférico.

En el anexo V se proporcionan de manera gráfica el comportamiento que proyectan los MCG en la temperatura y precipitación para cada uno de los sitios considerados en este estudio dentro de la región centro de Veracruz, con el fin de que pueda servir de apoyo a trabajos futuros sobre vulnerabilidad ante un cambio climático en esta región.

Con los datos de las Tablas 2.20 y 2.21 se crearon los mapas de temperatura para los diferentes periodos de análisis y con los datos de las Tablas 2.22 y 2.21 se generaron los mapas correspondientes a la precipitación.

3.2.6.1 Temperatura media mensual bajo condiciones de 2CO₂

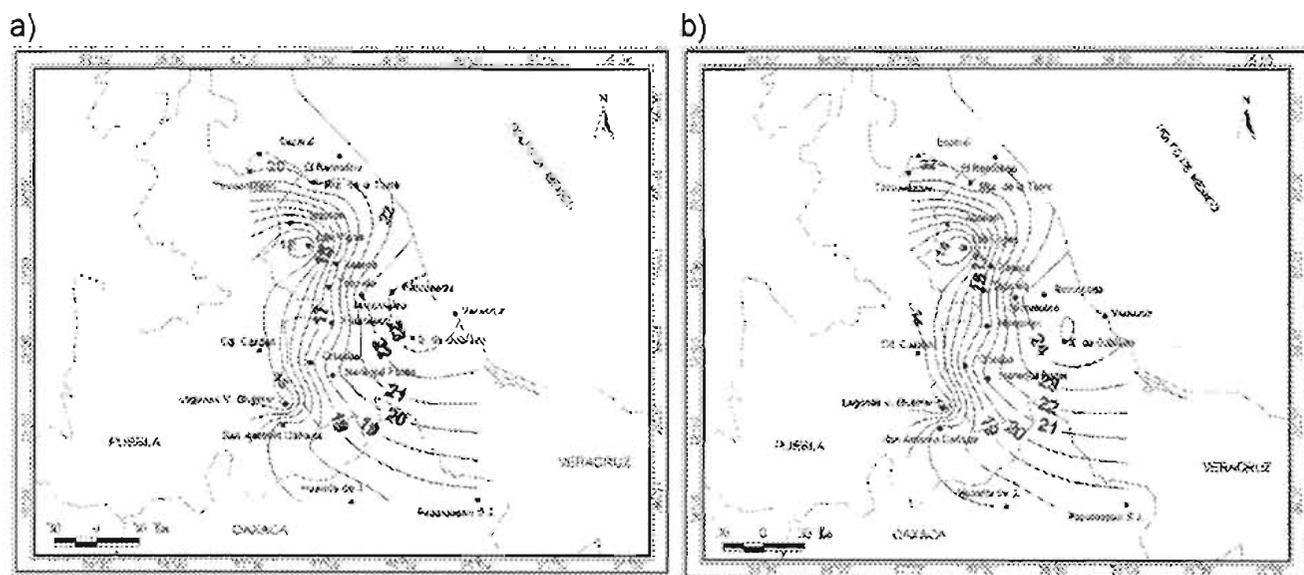


Figura 3.7 Temperatura media mensual (°C) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de 2CO₂ para enero: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30

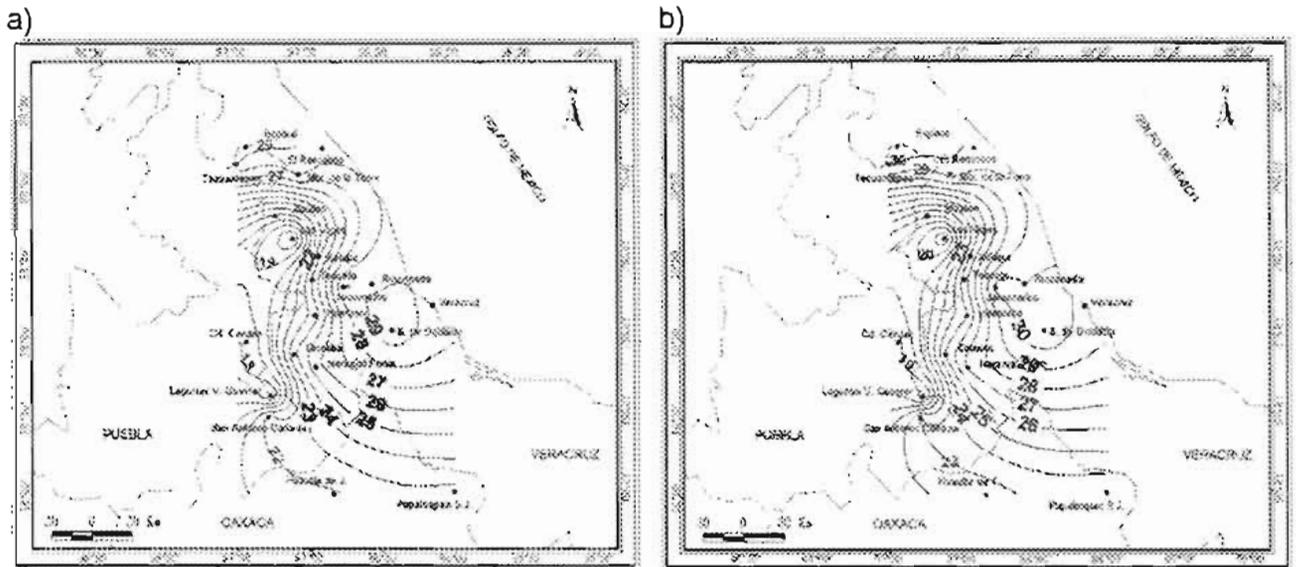


Figura 3.8 Temperatura media mensual (°C) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para abril: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

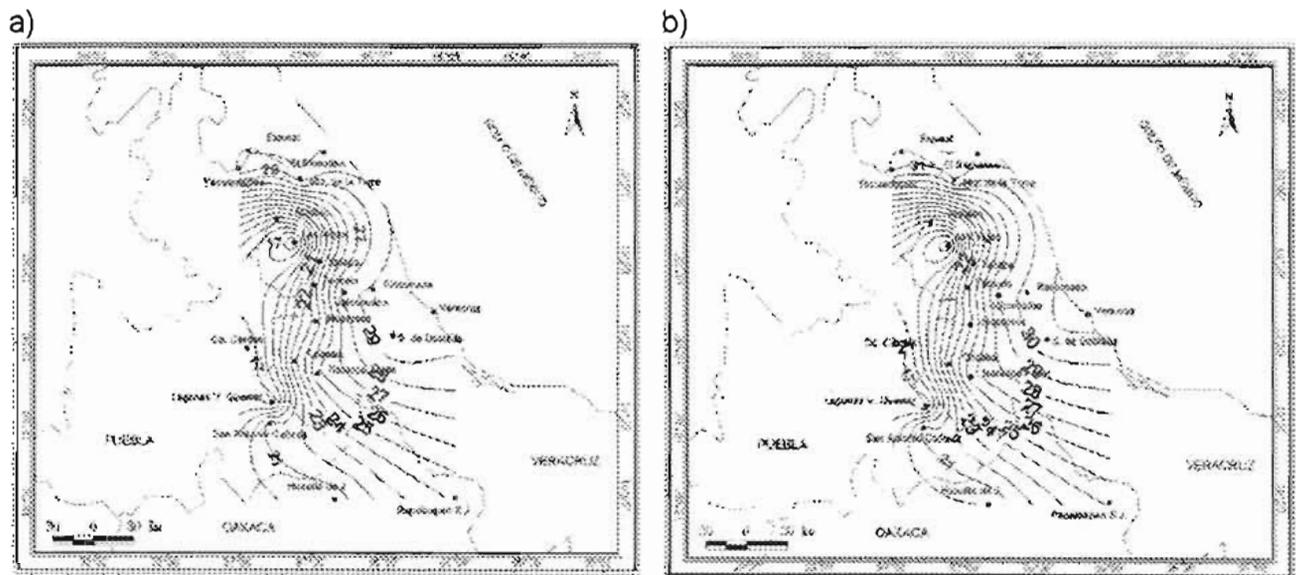


Figura 3.9 Temperatura media mensual (°C) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para julio: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

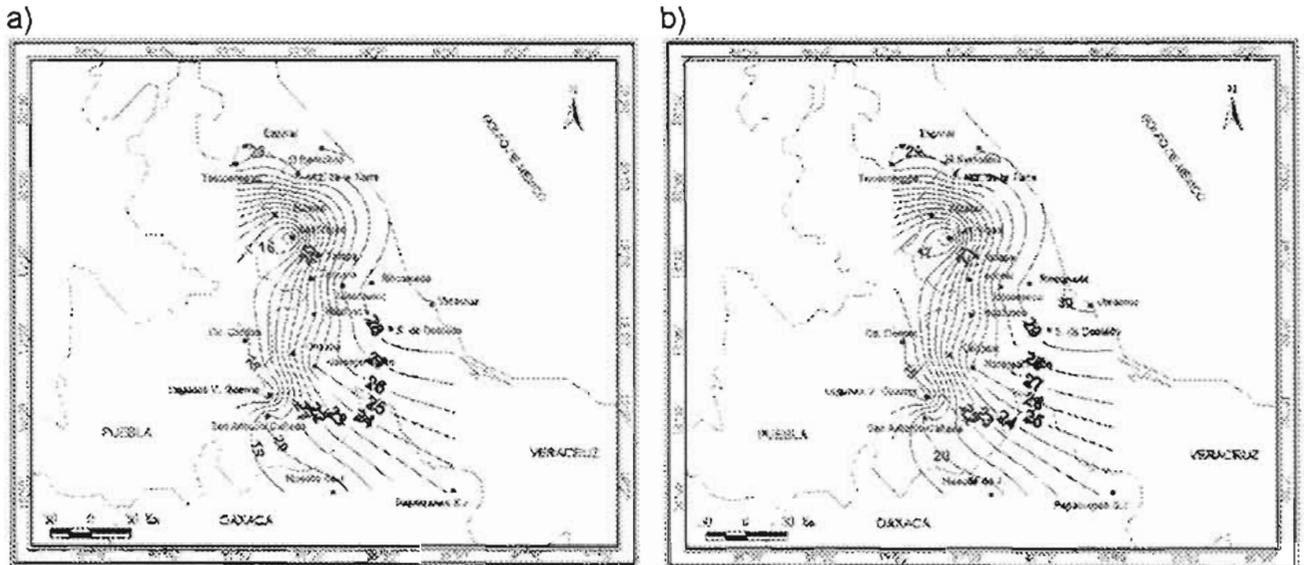


Figura 3.10 Temperatura media mensual (°C) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de 2CO₂ para octubre: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

De los mapas mensuales de temperatura media generados en base a las proyecciones de los MCG para condiciones de 2CO₂ se encuentra que en general:

En todos los mapas se observa un fuerte gradiente de temperatura al norte de la saliente hacia el Golfo de la Sierra Madre Oriental, entre las estaciones de Martínez de la Torre y Las Vigas, ésta última situada en un pasillo de lomeríos que se encuentra entre la Sierra de Chiconquiaco (que cubre los municipios de Huarusco, Martínez de la Torre y Atzalan, entre otros más) y la del Cofre de Perote.

Los gradientes más débiles se presentan la zona sur de la región de estudio la cual abarca parte de la subprovincia de la llanura costera veracruzana caracterizada por sistemas de lomeríos hacia el oeste y la llanura costera aluvial hacia el este.

Los valores más altos de temperatura se encuentran hacia la zona costera en las estaciones de Rinconada, Veracruz y Soledad de Doblado, y las más bajas sobre Las Vigas, Ver. y Lagunas Vicente Guerrero, Pue.

En los mapas de temperaturas medias (°C) para el invierno y verano se conserva el patrón general descrito en los mapas anteriores, aunque durante el invierno en la parte norte de la región de estudio el gradiente de temperatura es menor que el del verano.

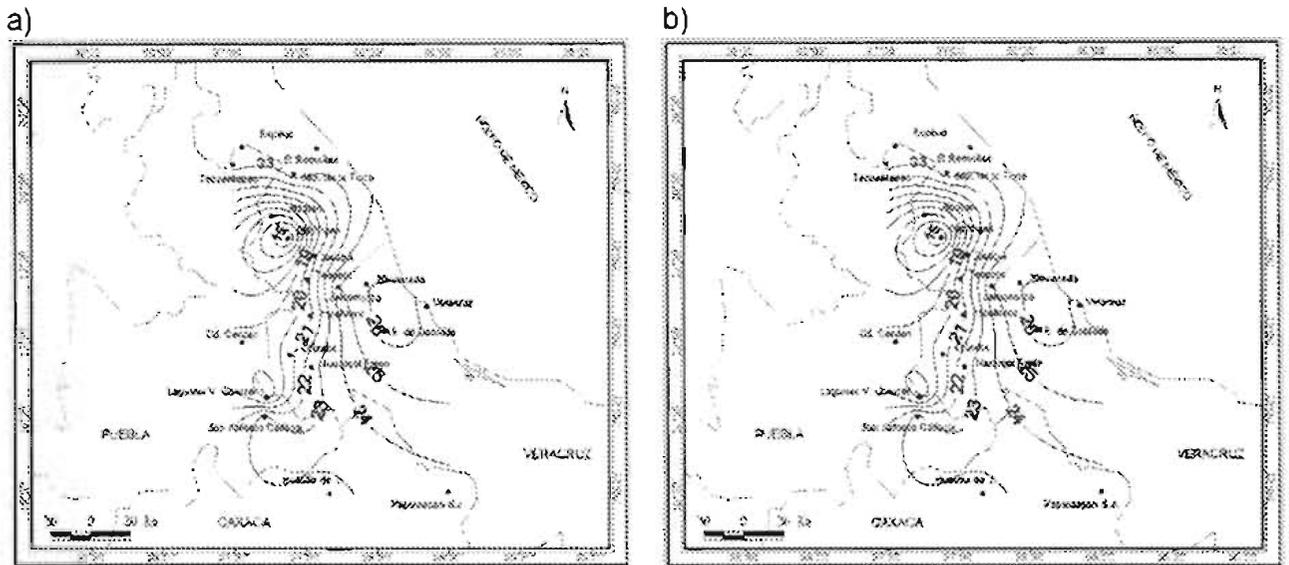


Figura 3.11 Temperatura media mensual (°C) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para el invierno: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

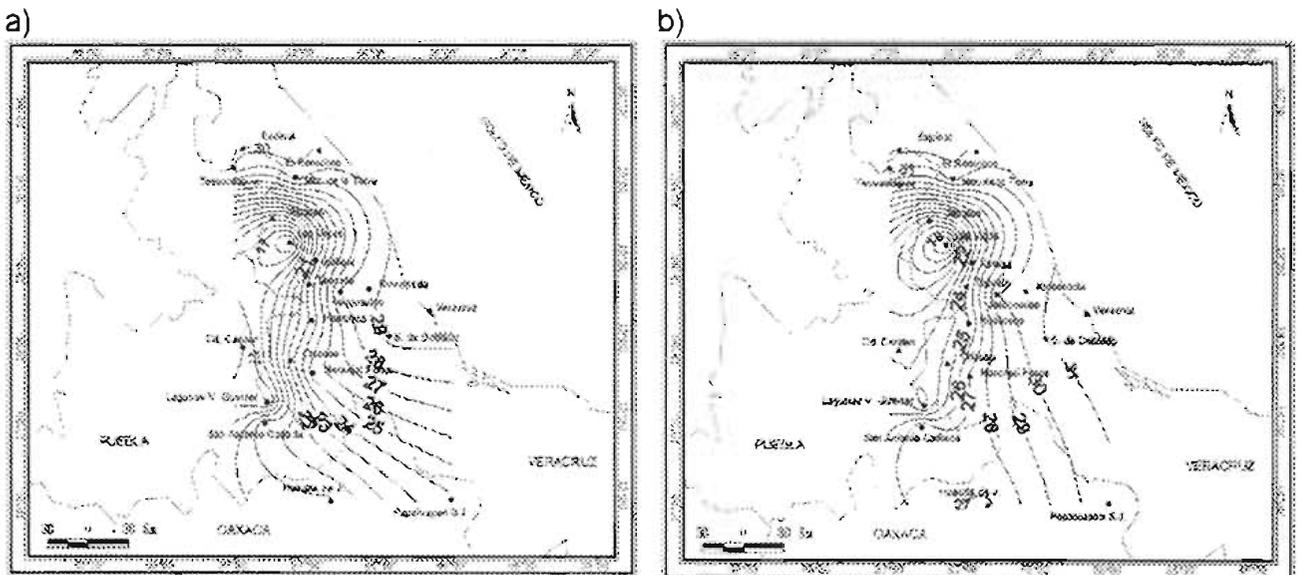


Figura 3.12 Temperatura media mensual (°C) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para el verano: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

3.2.6.2 Precipitación media mensual bajo condiciones de $2CO_2$

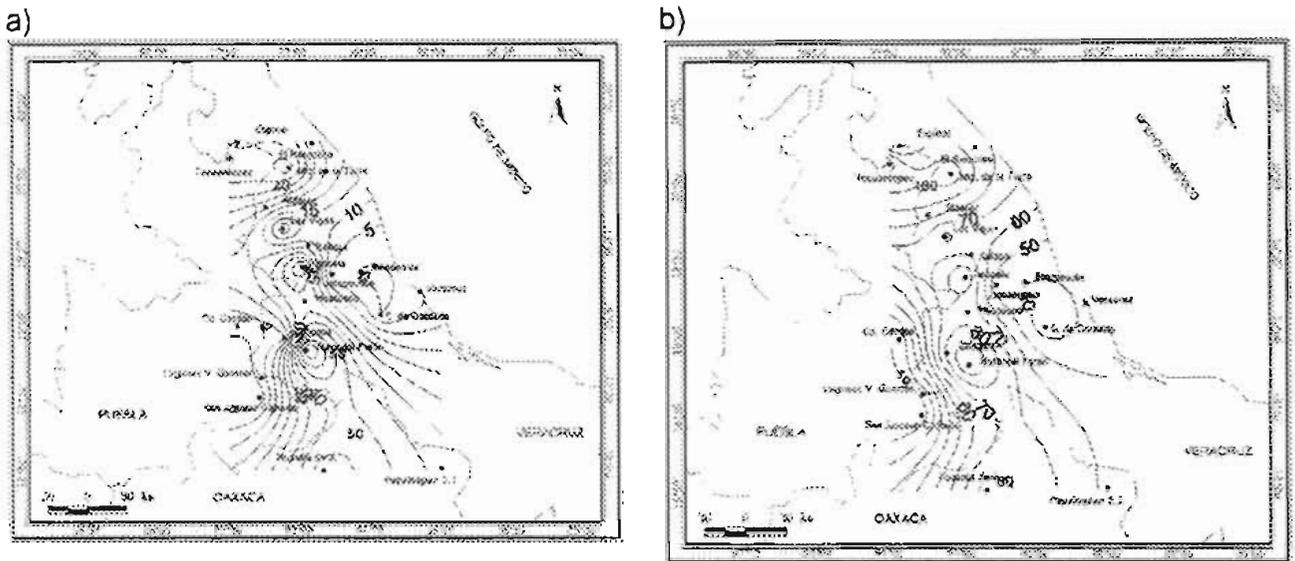


Figura 3.13 Precipitación media mensual (mm) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para enero: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

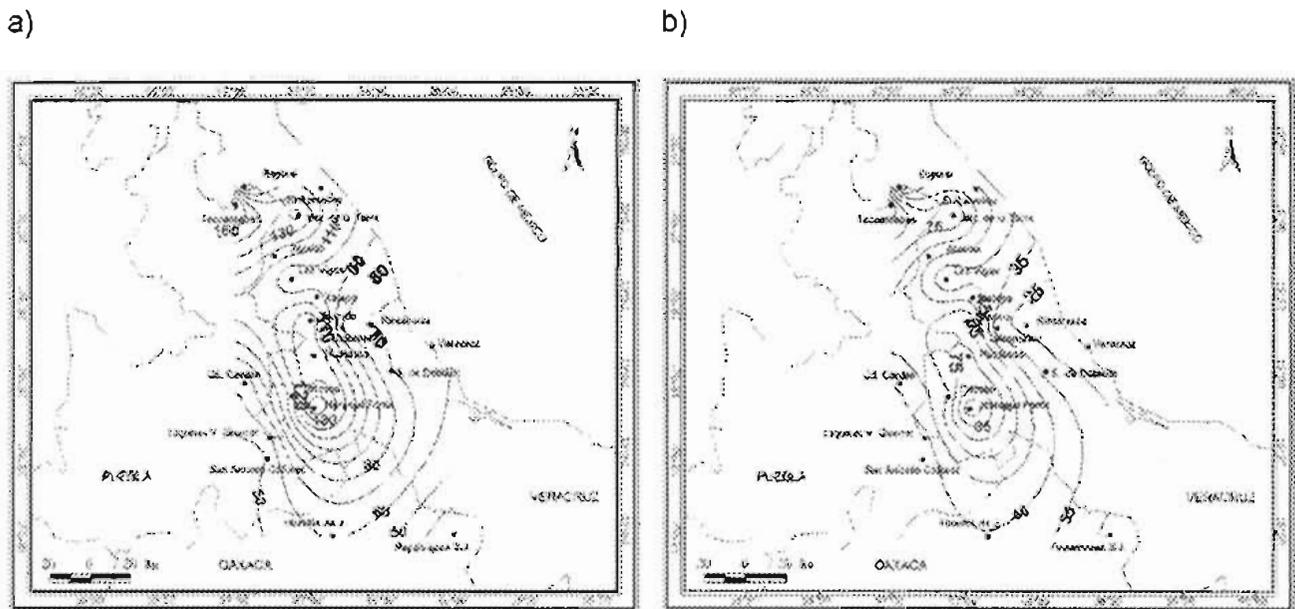


Figura 3.14 Precipitación media mensual (mm) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para abril: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

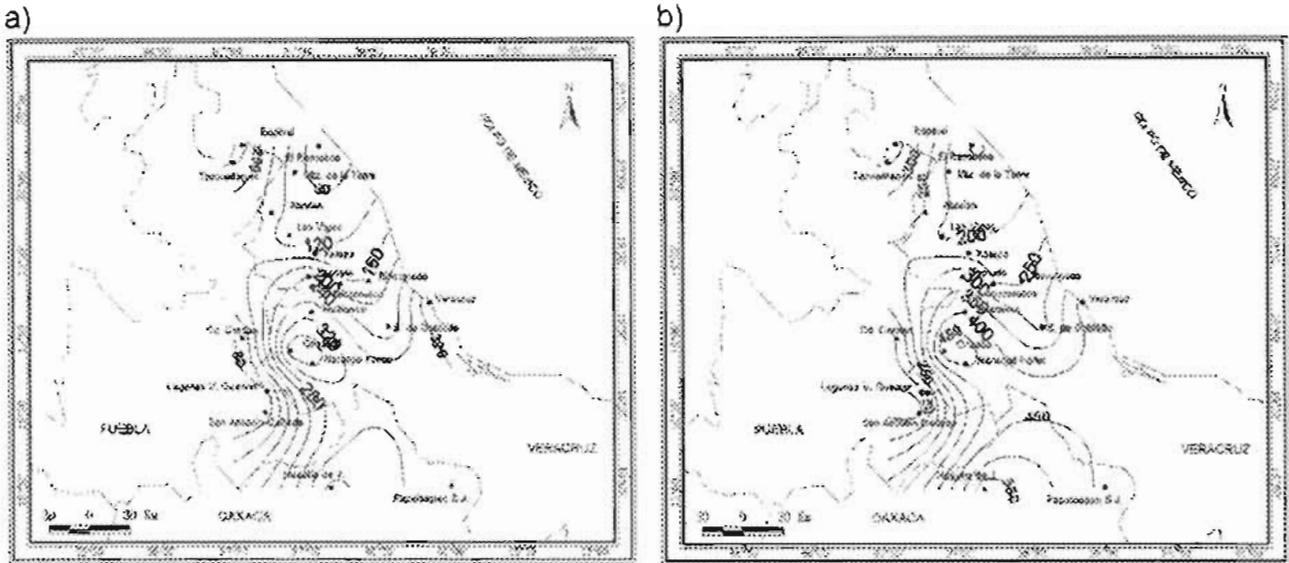


Figura 3.15 Precipitación media mensual (mm) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para julio: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

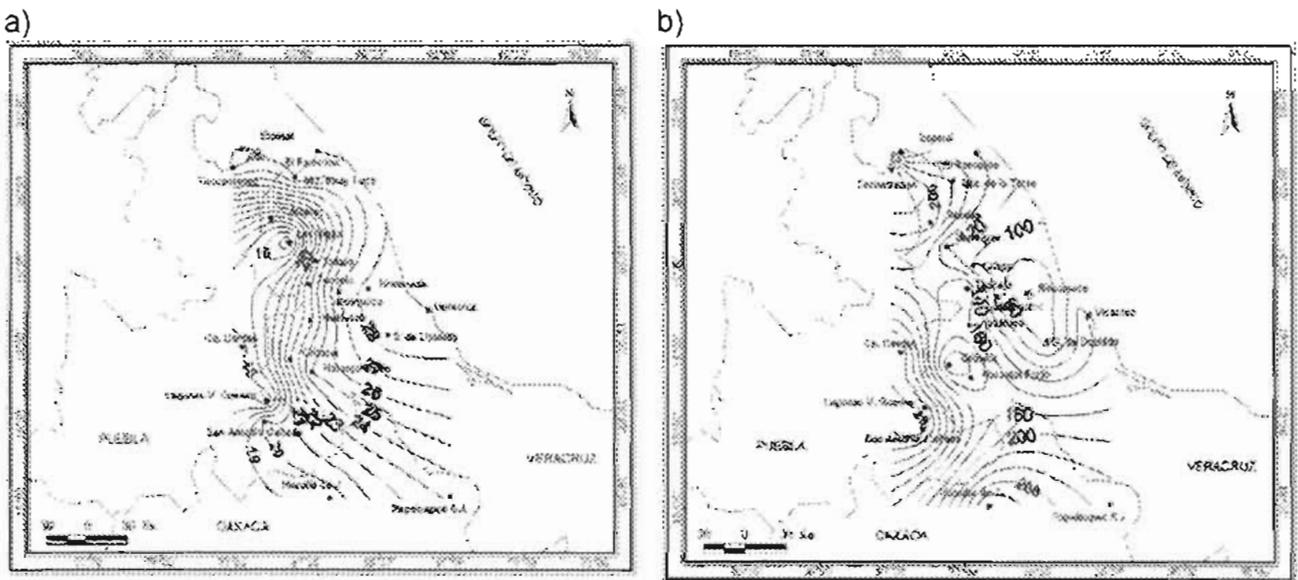


Figura 3.16 Precipitación media mensual (mm) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de $2CO_2$ para octubre: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

En los mapas correspondientes a los meses de enero, abril y octubre se observan tres áreas de mayor precipitación sobre las estaciones de Teocelo, Ver., Naranjal Fortín, Ver. y Tecuantepec, Ver. Las áreas de menor precipitación se encuentran por lo general en las estaciones de Las Vigas, Ver. y Lagunas Vicente Guerrero, Pue.

Durante el verano el patrón de isoyetas cambia marcadamente, éstas forman dos especies de lenguas, una en dirección norte – sur hacia Soledad de Doblado, Ver. (CCC:280 mm, GFDL:400 mm) y la otra en dirección sur-oeste con centro de máxima sobre Orizaba,

Capítulo 3

Ver. y Naranjal Fortín, Ver. (CCC: 360 mm, GFDL: 450 mm). Sobre la parte norte de la región de estudio la precipitación se incrementa hacia la Sierra Madre Oriental.

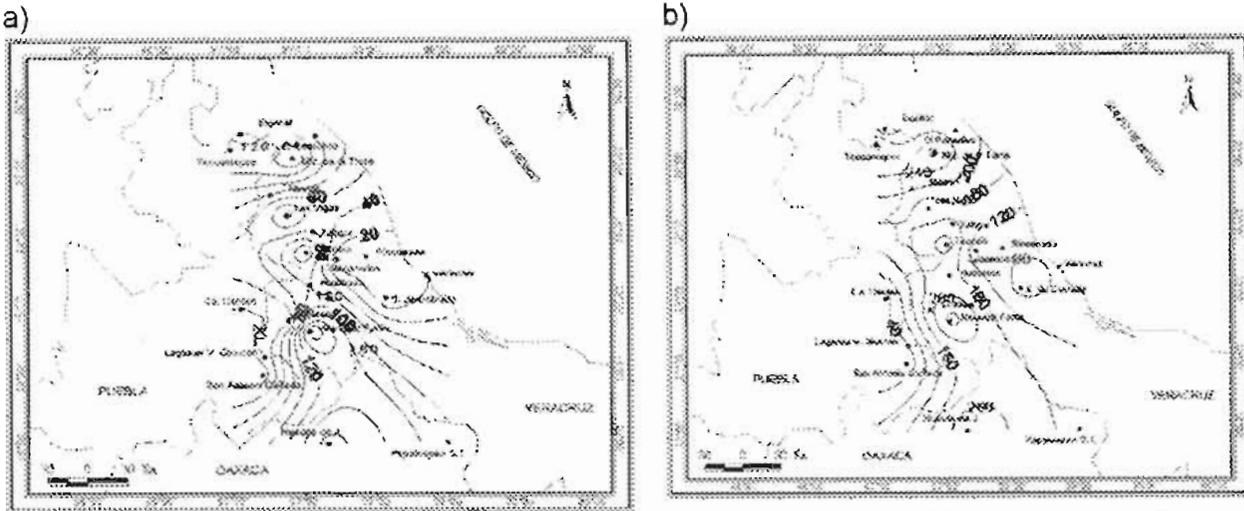


Figura 3.17 Precipitación media (mm) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de 2CO₂ para el invierno: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

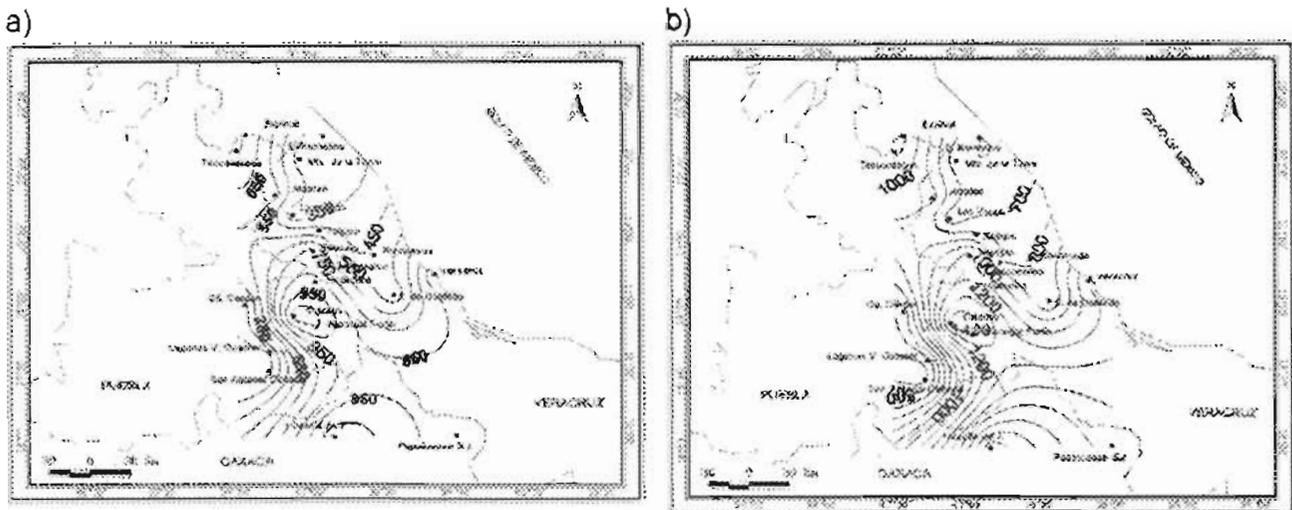


Figura 3.10 Precipitación media (mm) para la región centro del estado de Veracruz ante condiciones de 2CO₂ para el verano: a) Modelo CCC. b) Modelo GFDL-R30.

Los mapas de invierno guardan un comportamiento espacial en las isoyetas muy parecido al del mes de enero, el centro de mayor precipitación se encuentra sobre Martínez de la Torre, Ver. (CCC: 140mm, GFDL: 280 mm), sobre Teocelo, Ver. (CCC: 100mm, GFDL: 200 mm) y Naranjal Fortín, Ver. (CCC: 160 mm, GFDL: 240mm). Los centros de mínima precipitación se ubican en hacia la zona costera y hacia el sotavento de la Sierra Madre Oriental.

Las proyecciones de temperatura y precipitación obtenidas de los modelos GFDL-R30 y CCC se sintetizan en la Tabla 3.11 siguiente; en ella se observa que los modelos coinciden sólo en las proyecciones para la primavera y el otoño.

Tabla 3.11 Tendencias en la temperatura y precipitación por MCG.

Estación	Modelo CCC		Modelo GFDL	
	T	Pcp	T	Pcp
Invierno	+	-	+	+
Primavera	+	-	+	-
Verano	+	-	+	+
Otoño	+	+	+	+

Sobre estas apreciaciones hay que tomar en cuenta que en algunos casos los aumentos en la temperatura podrían beneficiar a algunos cultivos y que los cambios en la precipitación no siempre afectan la producción de los cultivos (Conde *et al.*, 2000)

La figura 3.11 permite compara los cambios en la precipitación proyectados por los MCG para la región de estudio. Se observa que sólo en la estación de Espinal, situada en la parte norte de la región de estudio, los modelos GFDL-R30 y CCC coinciden en proyecta aumento de la precipitación durante el invierno.

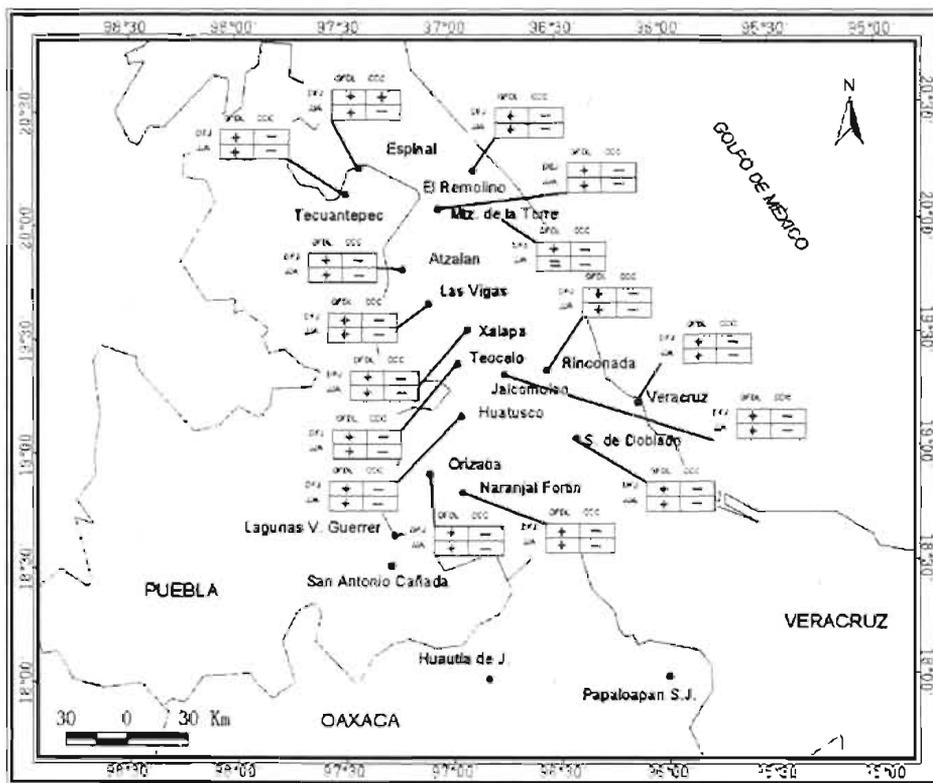


Figura 3.11 Cambio de la precipitación en relación con el promedio observado 1961-1990.

De la comparación de los valores correspondientes a los cambios de temperatura mensual y el cambio en la precipitación mensual obtenidos por Magaña *et al.*, (2000) para la región 15 de Douglas la cual comprende la mayor parte de la zona de estudio (Conde *et al.*, 1995; Gay, 2000), con los valores correspondientes obtenidos en este trabajo (ver Tablas 3.12 y 3.13) se encuentra que hay diferencias en cuanto a los cambios de las temperaturas proyectadas el modelo GFDL-R30, y semejanzas con el modelo CCC; respecto a la precipitación las proyecciones presentan semejanzas sobre el incremento de la precipitación en los meses de abril, octubre y noviembre, y disminución de la precipitación en el mes de febrero.

Tabla 3.12. Tabla comparativa de cambios de temperatura.

Temperatura	Modelo	Enc.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Región 15	CCC	1.6	1.8	1.7	2.1	2.1	1.8	1.9	2.1	2.1	2.4	2.3	1.3
Trabajo		1.6	1.9	1.8	2.7	2.4	1.8	2.1	2.4	2.5	3.0	2.4	1.8
Región 15	GFDL	2.3	2.9	2.9	2.4	2.1	2.5	2.6	2.4	2.6	2.6	2.5	2.9
Trabajo		3.3	4.3	4.2	4.1	3.2	3.9	3.7	4.0	4.2	4.0	4.0	4.5

Semejanza en valores

Tabla 3.13. Tabla comparativa de cambios en la precipitación.

Precipitación	Modelo	Enc.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Región 15	CCC	0.9	0.9	1.0	1.3	1.0	0.7	0.7	0.9	0.7	1.3	1.1	1.0
Trabajo		2.1	0.9	1.7	1.1	1.2	1.3	1.2	1.5	1.3	1.1	1.2	1.4
Región 15	GFDL	1.6	0.8	1.2	1.0	0.9	1.5	1.0	1.3	1.5	1.3	1.1	1.2
Trabajo		0.5	0.4	0.4	2.4	1.3	0.7	0.8	1.0	0.6	1.5	1.2	0.5

Semejanza en valores

3.3 Escenarios futuros para el cultivo de café de la región centro del estado de Veracruz.

Como se mencionó en la introducción, este trabajo forma parte de las investigaciones que se realizan dentro del proyecto AIACCLA-29 (Gay *et al.*, 2000), el cual contempla para México el análisis de la vulnerabilidad actual y futura de los agricultores de café en la región centro de Veracruz.

En el capítulo dos se dio un panorama breve sobre las actividades agrícolas de la región y sobre el lugar que ocupa el cultivo de café en Veracruz respecto a dentro de la producción estatal y nacional; como es sabido este cultivo además de cubrir la demanda nacional cubre parte del mercado internacional.

Es por ello que en este apartado se analiza la aptitud de la región para el cultivo del café, a partir del contraste de los requerimientos fenológicos de la planta con los resultados obtenidos de temperatura y precipitación media mensual aplicando la técnica de reducción de escala a salidas de los modelos GFDL-R30 y CCC para condiciones de duplicación de dióxido de carbono atmosférico.

El que México resulte ser un país vulnerable ante condiciones de cambio climático y que pueda llegar a experimentar en el futuro aumentos en las temperaturas medias y disminución de las precipitaciones, pone en riesgo la producción agrícola ya que se podrían tener severos impactos en ella debido que pueden no cumplirse los requerimientos térmicos e hídricos de los cultivos ante esas condiciones.

Por ejemplo, Flores *et al.*, (1995) analizan la vulnerabilidad y el comportamiento de la aptitud del cultivo de maíz de temporal ante un cambio climático utilizando los modelos GFDL-R30 y CCC. Encuentra que sólo el 4.34% del territorio nacional sería potencialmente apto para el cultivo de maíz de temporal, es decir, las zonas con aptitud para el cultivo disminuiría marcadamente ante estas condiciones climáticas,

Conde C, *et al* (2000) emplea el modelo de simulación CERES-Maize para evaluar el impacto del cambio climático en el cultivo Su estudio contempla la región centro de la República Mexicana (abarcando parte de los estados de Jalisco, México, Puebla y Veracruz), encuentra por ejemplo, que en la mayoría de los sitios y por debajo de los 2000 msnm los efectos de un cambio climático en los rendimientos del maíz de temporal serían negativos. Cabe mencionar que dentro del estudio se analiza la producción de Coatepec, Ver y se obtienen bajas significativas en los rendimientos.

Como lo menciona Barradas (1995) la generación de escenarios de cambio climático para la agricultura se vuelven una herramienta fundamental para el análisis de vulnerabilidad y adaptación ante posibles cambios climáticos, sobre todo para los cultivos básicos por su estrecha relación con la lluvia de temporal; considera además que las constantes fenológicas podrían jugar un papel importante en el estudio de estos impactos ya que podrían usarse directamente en los escenarios de cambio climático para la determinación de la aptitud de los cultivos en sitios del territorio nacional.

3.3.1 Características del cafeto

De acuerdo a Avila (1994) el cafeto proviene originalmente de las montañas de Abisinia, África. Es un vegetal que pertenece a la orden de las rubiaceas y a la familia cofeales; “existen varios subgéneros pero es el *eucoffea* al que pertenecen las especies que producen el fruto denominado café”.

En la actualidad se encuentra distribuido mundialmente y puede encontrarse en diversas condiciones ecológicas, pero se ha encontrado que “a temperaturas por arriba de los 34°C los cafetos detienen la producción de materia seca” y a 2 °C pueden presentarse daños permanentes en los tejidos.

“El comportamiento de la producción mundial del café está condicionada por una variada gama de factores, que podrian clasificarse en: agrícolas, climáticos, políticos y económicos”; dentro de los factores adversos al cultivo se pueden mencionar por ejemplo, los daños por plagas, heladas, sequías o el exceso de lluvia (Avila, 1994).

3.3.1.1 Requerimientos agroclimáticos del cultivo

De acuerdo a Díaz *et al.*, (2001) “la temperatura y la precipitación bajo condiciones de temporal son los dos factores del clima que interactuando condicionan la adaptación y producción de los cultivos”; bajo este criterio es posible determinar la aptitud del cultivo de café en la región centro de Veracruz a partir de los escenarios de cambio climático proyectados para la temperatura y precipitación por los modelos GFDL-R30 y CCC. Los requerimientos agroclimáticos del café se muestran en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14 Requerimientos a agroclimáticos del café.
Fuente: Díaz *et al.*, 2001.

Factores	Aptitud		
	Muy Buena	Media	No apta
Altitud (msnm)	900 – 1 300	600 – 900	0 – 600 1 300 – 7 000
Temperatura (°C)	17 – 23	14 – 17 23 – 27	< 14 > 27
Precipitación (mm)	1 800 – 2 500	1 500 – 1 800 2 500 – 3 000	0 – 1 500 3 000 – 6 500

Cabe señalar, que para un estudio integral de los efectos del cambio climático en el cultivo del café es necesario analizar a detalle los posibles efectos en la evapotranspiración, humedad en el suelo, el posible incremento de plagas y enfermedades en la planta, etc. En esta sección sólo se consideran los requerimientos agroclimáticos térmicos e hídricos (básicos) y de altitud para el análisis de la aptitud de la planta de café ante condiciones de cambio climático.

3.3.2 Escenarios de cambio climático

Las Tablas 3.15 y 3.16 proporcionan a los escenarios de aptitud de la región de estudio por sitio para el cultivo de café. Los datos de temperatura y precipitación promedio anual proyectadas por los modelos corresponden a los datos de las Tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.15. Escenarios de aptitud para el cultivo de café según modelo CCC.

Estación	Altitud (msnm)	Escenario base (61-90)		Escenario de Modelo CCC		Escenarios de aptitud	
		T ₀ (°C)	Pcp ₀ (mm)	T (°C)	Pcp (mm)	Actual	Futuro
Veracruz	2	25.3	1732.7	27.5	1588.2	No apto	No apto
El Remolino	35	24.3	1250.4	26.5	1048.2	No apto	No apto
Espinal	111	24.7	1295.0	27.0	1537.6	No apto	No apto
Martínez de la Torre	152	24.2	1574.1	26.4	1360.6	No apto	No apto
Soledad de Doblado	183	25.5	974.3	27.7	785.2	No apto	No apto
Tecuntepec	250	24.5	2203.2	26.7	1948.4	No apto	No apto
Rinconada	313	24.9	972.2	27.1	804.6	No apto	No apto
Jalcomulco	330	24.3	1102.6	26.5	924.0	No apto	No apto
Naranjal Fortín	697	21.8	2421.1	23.9	2333.0	No apto	Media*
Teocelo	1218	19.5	2046.8	21.0	1844.1	Muy Buena	Muy Buena
Orizaba	1259	19.1	2180.5	21.4	1965.7	Muy Buena	Muy Buena
Huatusco	1344	19.5	2000.0	21.7	1804.5	Muy Buena	Muy Buena
Xalapa	1427	19.5	1305.1	21.7	1102.4	No apto	No apto
Atzalan	1842	15.9	1812.4	18.2	1591.1	No apto	No apto
Las Vigas	2400	11.8	1024.3	14.0	788.4	No apto	No apto

*Se presenta deficiencia de agua.

Aumento y disminución en los valores de las variables atmosféricas.

Las estaciones no cumplen el nivel de la altitud requerido por el cultivo

Tabla 3.16. Escenarios de aptitud para el cultivo de café según modelo GFDL-R30.

Estación	Altitud (msnm)	Escenario base (61-90)		Escenario de Cambio GFDL-R30		Escenarios de aptitud	
		T ₀ (°C)	Pcp ₀ (mm)	T (°C)	Pcp (mm)	Actual	Futuro
Veracruz	2	25.3	1732.7	29.1	2036.4	No apto	No apto
El Remolino	35	24.3	1250.4	28.3	1606.2	No apto	No apto
Espinal	111	24.7	1295.0	28.8	1994.3	No apto	No apto
Martínez de la Torre	152	24.2	1574.1	28.3	1935.8	No apto	No apto
Soledad de Doblado	183	25.5	974.3	29.4	1296.0	No apto	No apto
Tecuatepec	250	24.5	2203.2	28.6	2595.4	No apto	No apto
Rinconada	313	24.9	972.2	28.8	1303.3	No apto	No apto
Jalcomulco	330	24.3	1102.6	28.3	1442.7	No apto	No apto
Naranjal Fortín	697	21.8	2421.1	25.7	2757.8	No apto	Media
						Muy Buena	Muy Buena
Teocelo	1218	19.5	2046.8	23.4	2396.0		Buena
Orizaba	1259	19.1	2180.5	23.2	2693.7	Muy Buena	Media
Huatusco	1344	19.5	2000.0	23.4	2349.1	Muy Buena	Media
Xalapa	1427	19.5	1305.1	23.4	1653.1	No apto	No apto
Atzalan	1842	15.9	1812.4	20.0	2184.6	No apto	T y Pcp adecuadas
Las Vigas	2400	11.8	1024.3	15.8	1385.8	No apto	No apto

Aumento y disminución en los valores de las variables atmosféricas

Las estaciones no cumplen el nivel de la altitud requerido por el cultivo.

Del contraste de los requerimientos fenológicos del café con los valores de temperatura y precipitación obtenidas bajo condiciones de 2CO₂ se encuentra:

a) Con el modelo GFDL-R30

- Bajo las condiciones de cambio proyectadas, la zona de Naranjal Fortín podría tener una aptitud media, mientras que Orizaba y Huatusco podrían experimentar una disminución en la aptitud por los aumentos en las temperaturas y variaciones en la precipitación proyectada. En Atzalan se alcanzarían las temperaturas y precipitaciones adecuadas para el cultivo aunque se tendría el problema de la altitud.

b) Con el modelo CCC

- Sólo se presentarían cambios en la zona de Naranjal Fortín ya que podría alcanzar la aptitud media si se compensara el déficit de agua que presentaría.

Por tanto las condiciones de cambio correspondientes al modelo CCC son las que afectarían menos al cultivo de café en la región de estudio. Las deficiencias de agua podrían ser compensadas mediante el suministro de agua por algún medio artificial y se podría manejar el frescor dentro del cultivo mediante la siembra de árboles de sombra adecuados y usando una densidad de siembra adecuada.

Conclusiones

En este trabajo se concluye que es posible adecuar las salidas de los modelos de circulación general GFDL-R30 y CCC a las condiciones geográficas y climáticas de la región de estudio mediante la técnica propuesta de reducción de escala. Lo anterior permite representar el efecto que ejerce la orografía de la región de estudio en los comportamientos observados en la temperatura y precipitación (Figuras 3.1 y 3.4), el cual no es considerado en detalle los modelos debido a su resolución (Figuras 3.1 y 3.2).

Una forma de validar las salidas de los MCG es comparando los resultados de los modelos para las condiciones de $1x CO_2$ con los datos normales (Conde et al., 1994). En este trabajo se obtienen coeficientes de correlación entre los datos observados del periodo 1960 – 1990 y las salidas de los modelos corregidos de 0.95 (para el modelo CCC) y 0.96 (para el modelo GFDL-R30) en el caso de la temperatura, y de 0.54 (para el modelo CCC) y 0.77 (para el modelo GFDL-R30) en el caso de la precipitación.

A partir estos valores de correlación se puede decir que las salidas el modelo GFDL-R30 corregido son las que más se asemejan a los datos observados. En el caso de la precipitación, la cual resulta ser una variable difícil de ser simulada por los modelos climáticos, se encuentra además que el modelo GFDL-R30 no logra simular la disminución de la precipitación que se da en los meses de julio o agosto en los sitios de estudio (ver Figuras V).

Los escenarios de cambio climático muestran incrementos de la temperatura de superficie entre dos y cuatro grados centígrados y alteraciones en la precipitación de superficie en la mayoría de los sitios considerados en el estudio. Los modelos difieren menos en sus proyecciones de temperatura en la estación de la primavera ($0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio) y más en la estación del invierno ($2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio).

En cuanto a la precipitación, los MCG coinciden en proyectar valores por abajo de lo observado en la primavera y por arriba de lo observado para el otoño; esto último podría traer como consecuencia cambios en el período de lluvias de la región de estudio y la evaporación, por ejemplo (ver Figura 3.7). En la Tabla 3.11 contenida en el capítulo tres se sintetizan estos resultados.

Para los cultivos el aumento de las temperaturas podría implicar demanda de agua, mientras que una disminución de la precipitación, un aumento de stress en la planta; situación proyectada en general por los MCG para la primavera.

Los resultados obtenidos en este trabajo son similares en promedio a los que se obtuvieron en estudios previos (Magaña, 2000), pero la metodología propuesta permite asignar de mejor manera los posibles cambios en localidades con climatologías muy diferentes.

Del análisis de aptitud del cultivo bajo condiciones de $2CO_2$ atmosférico las condiciones de cambio proyectadas por el modelo CCC podrían ser equilibradas mediante el suministro artificial de humedad a la planta, y los aumentos de temperatura podrían ser

Conclusiones

disminuidos proporcionando frescor al cultivo a través del manejo de plantas de sombra adecuadas.

Dado que en este análisis sólo se consideran los requerimientos de temperatura, humedad y altitud del cultivo, los resultados deben tomarse como un primer escenario futuro; sería recomendable incluir otros requerimientos como tipo de suelo, pH, etc. en el análisis de aptitud.

Sobre las proyecciones del clima de la región de estudio al 2010 se encuentra que a partir de la información de las tendencias anuales (Tabla 1.11) se calcularon las tendencias a 20 años de las temperaturas máximas y mínimas, y precipitación. Con éstos valores se estimaron las temperaturas medias y anuales y las precipitaciones mensuales y anuales, con el fin de estimar el clima de la región al 2010. Del análisis de los datos climáticos (ver secciones 1.3.4 y 1.3.5) se encontró que existirían cambios importantes para algunas localidades en la región de estudio (Martínez de la Torre, Atzalan, Las Vigas); dichos cambios serían importantes en estudios de impactos en agricultura, recursos hídricos, etc.

La Tabla 3.17a muestra que sólo tres de las trece estaciones climatológicas de la zona de estudio cambian de subtipo: Martínez de la Torre, Las Vigas de Ramírez y Atzalan; Martínez de la Torre y Atzalan cambiarían a un régimen de lluvia anual, y Las Vigas de Ramírez incrementaría su temperatura media anual. En la tabla 3.17b se describen las características principales de los climas observados y es proyectados contenidos en la Tabla 3.17a.

Tabla 3.17. Climas observados y estimados al 2025 por estación climatológica.

Estación	Clima	
	Observado (61-90)	Proyectado
El Remolino	Cálido subhúmedo con lluvias en verano (p/t menor a 43.1) Aw ₁	Aw ₁
Martínez de la T.	Cálido húmedo con lluvias de verano Aw ₂	Afm
Tecantepec	Cálido húmedo con lluvias todo el año Afm	Afm
Atzalan	Templado subhúmedo con régimen de lluvias de veran Cw _{2b}	Cfm
Las Vigas de R.	Semifrio con temperatura media anual entre 5° y 12°C Cw _{2b}	Cw_{2b}
Xalapa	Semicálido subhúmedo con lluvias de verano ACw ₂	ACw ₂
Rinconada	Cálido subhúmedo con lluvias de verano(p/t menor a 43.1) Aw ₀	Aw ₀
Teocelo	Semicálido húmedo con lluvias todo el año ACfm	ACfm
Jalcomulco		Aw ₁ Aw ₁
Huatusco		ACfm ACfm
Veracruz		Aw ₂ Aw ₂
Naranjal Fortín		ACfm ACfm
Soledad de D.		Aw ₀ Aw ₀

Conclusiones

Tabla 3.17. Características de algunos de los principales tipos y subtipos climáticos presentes en la región de estudio. Fuente: Soto *et al.*, 1989.

Aw ₀	Cálido subhúmedo con lluvias en verano y P/T menor a 43.1
Aw ₁	Cálido subhúmedo con lluvias en verano y P/T entre 43.2 y 55.3
Aw ₂	Cálido húmedo con lluvias en verano y P/T mayor a 55.3
Afm	Cálido húmedo con lluvias todo el año. La precipitación del mes más seco es superior a 60 mm. El porcentaje de lluvia invernal es menor de 18. La lluvia invernal resulta de la suma de la precipitación de los meses enero, febrero y marzo dividida entre el total anual por cien.
Cw ₂ b	Templado subhúmedo con régimen de lluvias en verano, P/T mayor a 55.0. Es el más húmedo de su tipo. Presenta el verano fresco y largo.
Cw ₂ b [*]	Semifrío, temperatura media anual entre 5° y 12°C. Subhúmedo con lluvias en verano y P/T mayor a 55.0. Verano fresco y largo.
ACw ₂	Semicálido subhúmedo con lluvias en verano y cociente P/T mayor a 55.0.
ACfm	Semicálido húmedo con lluvias todo el año. El mes más seco tiene una precipitación mayor a 40mm. El porcentaje de lluvia invernal es menor de 18.
Cfm	Templado húmedo con lluvias todo el año siendo la precipitación del mes más seco mayor a 40 mm. Porcentaje de lluvia invernal menor a 18.

En este trabajo se propone un método para adecuar las salidas de los modelos de circulación general a la escala regional, considerando la compleja topografía de la región centro de Veracruz, que ningún MCGs puede considerar.

La generación de escenarios de cambio climático regionales son fundamentales para evaluar la vulnerabilidad futura de la región ante posibles cambios en el clima, y para el diseño de estrategias y políticas de adaptación que aminoren los posibles impactos negativos.

Uno de los objetivos del proyecto AIACCLA-29 (Gay *et al.*, 2000) es presentar los posibles escenarios de cambio climático a los tomadores de decisiones de la región. Este trabajo contribuye a ese esfuerzo, pues se ha analizado con profundidad, la validez del banco de datos climáticos, su comportamiento espacial y temporal y, finalmente, su posible cambio ante una duplicación de la concentración de CO₂.

Bibliografía

Aguilar, A. G., 2000: Los asentamientos humanos y el cambio climático en México. Un escenario futuro de la vulnerabilidad regional. Capítulo VIII en el libro México: Una visión hacia el siglo XXI. *El Cambio Climático en México*. SEMARNAP. UNAM, USCSP. C. Gay (compilador). 171-194 p.

Albritton, D. L. y L. M. Filho, 2001: *Cambio climático 2001: La base científica*. IPCC, Eds. (Disponible en <http://ipcc.ch>. Última consulta, agosto 2004).

Avila, T. M., 1994: *El papel del estado mexicano en la caficultura nacional. El caso de Veracruz*. Tesis de Licenciatura. Fac. de Ciencias Agrícolas de la Univ. Veracruzana, Xalapa. 139 p.

Barradas, V.L., 1995: Fenología y cambio climático global. En Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 8 al 11 de mayo de 1995. 197-201 p.

Conde, A. C., O. Sánchez y C. Gay, 1994: Escenarios básicos y regionales. En Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, 18 al 22 de mayo de 1994. 39-43 p.

Conde, A. C., O. Sánchez, V. Magaña y C. Gay, 1995: Escenarios climáticos básicos regionales. En Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 8 al 11 de mayo de 1995. 101-111 p.

Conde, A. C., R. Ferrer, D. Liverman, 2000: Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES-MAIZE. Capítulo VI en el libro México: Una visión hacia el siglo XXI. *El Cambio Climático en México*. SEMARNAP. UNAM, USCSP. C. Gay (compilador). 119-141 p.

Conde, A. C., 2003: *Cambio y variabilidad climáticos. Dos estudios de caso en México*. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra. UNAM. 300 p.

Delworth, T.L., A.J. Brócoli, K. Dixon, I. Held, T. Knutson, P.j. Kushner, M.J. Spelman, R. J. Stouffer, K. D. Vinnikou, R. E. Wetherald, 1999: Coupled climate modelling at GFDL recent accomplishments and future plans. *Clivar Exchange*, 4, 17-22 p.

Díaz, P.G., M. Cortina, L. Rodríguez, 2001. Potencial agroproductivo de cada hectárea de la superficie territorial del estado de Veracruz. Disponible en <http://orbita.starmedia.com/rcveracruz/Agricola/AgEx/AgEx17C.pdf> (última consulta octubre 2004)

Douglas, M. y H. Padilla, 1992: *Meteorología Tropical*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México. 55 p. Documento proporcionado en el Curso Internacional "Aspectos Esenciales de la Meteorología Tropical", celebrado en Panamá, Panamá; del 23 de julio al 10 de agosto de 2001.

Bibliografía

Fernández, G. F. 1996: *Manual de Climatología Aplicada. Clima, medio ambiente y planificación*. España: Editorial Síntesis, S.A. 985 p.

Ferrer R., C. Conde, G Villarreal., D. Liverman, 1995: Agricultura en México y cambio climático global. En Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 8 al 11 de mayo de 1995. 185-196 p.

Fitzziarald, D., 1986: Slope winds in Veracruz, *J. of Climate and Applied Meteorology*. **25**: 133-144 p.

Flores E. M., R. Araujo, E. Betancourt, D. Liverman, 1995: Comportamiento en la superficie potencialmente apta para el cultivo del maíz de temporal ante un cambio climático global. En Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 8 al 11 de mayo de 1995. 179-184 p.

García, Codron, Juan Carlos. 1996. *Un clima para la historia... una historia para el clima*. Santander: Servicios de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. 95 p.

Gay, C., L.G. Ruiz, M. Imaz, C. Conde (eds). 1995. Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*. Cuernavaca, Mor. 1994. INE, CCA, UNAM, USCSP. México.

Gay, C., L.G. Ruiz Suárez, M. Imaz, C. Conde y B. Mar. (eds). 1996. Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*. Cuernavaca, Mor. 1995. INE, CCA, UNAM, USCSP. México.

Gay, C. (ed). 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 p.

Gay, García, C. Coordinador, 2002: AIACC-LA29. *Evaluación Integrada de la Vulnerabilidad Social y Adaptación al Cambio y Variabilidad Climática de los Productores Agropecuarios en México y Argentina*. Manuscrito. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México. 1-10 p.

Gil, O. y J. Olcina, 1998: *Diccionario de Climatología*. Ed. ACENTO. Madrid. 95 p.

Gobierno del Estado de Veracruz, 2000. *Atlas Estatal de Riesgos Veracruz de Ignacio de la Llave*. Subsecretaría de Protección Civil. 50 – 52 p; 78 –82 p.

Grotch, S.L., and M.C. MacCracken, 1991: The use of general circulation models to predict regional climate change. *J. Climate*, **4**. 286-303 p.

Gutiérrez, A., Compilador, 1995: Provincias fisiográficas. Capítulo del Volumen I. El Territorio y sus características. Libro *Veracruz Cifras y Perfiles 1970-1990*. Editado por la Universidad Veracruzana. I: 81-88 p.

Bibliografía

Harvey, D., J. Gregory, M. Hoffert, a. Jain, M. Lal, R. Leemans, S. Raper, T. Wigley, J. De Wolde, 1997: Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. *Cambio Climático 2001: Documento Técnico del IPCC*. J.T. Houghton *et al.*, Eds. (Disponible <http://ipcc.ch>; consultado en diciembre 2003).

Harvey, D., J. Gregory, M., Hoffert, A. Jain, M. Lal, R. Leemans, S. Raper, T. Wigley, J. Mitchell, J. F. B., and D. J. Karoly, 2001: Detection of climate change and attribution of causes. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. J.T. Houghton *et al.*, Eds., Cambridge University Press, 695 –738 p. Citado por McCracken *et al.*, 2003.

Hernández, C. M., 2001: *Tendencias climáticas en el centro del estado de Veracruz en el siglo XX (Veracruz y Las Vigas): Análisis exploratorio*. Tesis de Licenciatura. Fac. de Instrumentación Electrónica de la Univ. Veracruzana, Xalapa. 104 p.

Hernández, M.A., L.A. Torres, G.V. Madero. 2000. Sequía Meteorológica. Capítulo II en el libro México: Una visión hacia el siglo XXI. *El Cambio Climático en México*. SEMARNAP. UNAM, USCSP. C. Gay (compilador). 25-39 p.

IPCC, 1997: Resumen para responsables de políticas. Impactos regionales del cambio climático: Evaluación de la vulnerabilidad: *Informe Especial del Grupo de trabajo II del IPCC*. R. T. Watson *et al.*, Eds. (Disponible <http://ipcc.ch>; consultado en noviembre 2004).

IPCC, 2001: *Tercer Informe de evaluación. Cambio Climático 2001: La base científica. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*. 1 – 20 p.(Disponible en <http://ipcc.ch>; consultado el 28 de marzo de 2003).

Jáuregui E., A. Ruíz, C. Gay, A. Tejeda, 1995: Una estimación del impacto de la duplicación del CO₂ atmosférico en el bioclima humano de México. En Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 8 al 11 de mayo de 1995. 219-225 p.

Jáuregui, E. y Zitácuaro, I., 1995: El impacto de los ciclones tropicales del Golfo de México en el estado de Veracruz. *La Ciencia y el Hombre*, **21**: 75-119 p.

Luna Bauza, 1994: *Crónicas de los Huracanes en el estado de Veracruz*. Editora del Gobierno del Estado de Veracruz-Llave. 132 p.

MacCartey, J.M., O.F. Canziani, N.A. Leary, D. J. Dokken, and K.S. White, Eds. 2001: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press. 1032 p. Citado por McCracken *et al.*, 2003.

McCracken M.C., E.J. Barron, D. R. Easterling, B.S. Felzer, T. R. Karl, 2003: Climate change scenarios for the U.S. National Assessment. *Articles Am. Meteor. Soc.*, December 2003. 1711-1723 p.

Bibliografía

Maderey, R. L. y A. Jiménez, 2000: Los recursos hidrológicos del Centro de México ante un cambio climático global. Capítulo III en el libro México: Una visión hacia el siglo XXI. *El Cambio Climático en México*. SEMARNAP. UNAM, USCSP. C. Gay (compilador). 41- 61 p.

Maderey-R, L. E. y Torres-Ruata, C. (1990), "Hidrografía e hidrometría", IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4 000 000. Instituto de Geografía, UNAM

Magaña, Rueda, V., 1994: An strategy to determine regional climate change. En Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca, Morelos, del 18 al 22 de mayo de 1994. 45-53 p.

Magaña, Rueda, V., 1995: Escenarios físicos de cambio climático. En Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 8 al 11 de mayo de 1995. 93-99 p.

Magaña, V., 1999: *Los impactos de El Niño en México*. UNAM, Secretaría de Gobernación, CONACYT, Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI). 228 p.

Magaña, V., C. Conde., O. Sánchez y C. Gay., 2000: Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. Capítulo I en el libro México: *Una visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México*. SEMARNAP. UNAM, USCSP. C. Gay (compilador). 1- 24 p.

Marchal, J.Y., Palma, R., 1985: *Análisis gráfico de un espacio regional: Veracruz*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Veracruz, México. 220 p.

Mendoza V. M., E. E. Villanueva y J. Adem, 1995: Estudios de vulnerabilidad basados en escenarios de cambio climático en México, derivados de resultados de GCM's con doblamiento del CO₂ atmosférico (El ciclo anual presente). En Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 8 al 11 de mayo de 1995. 149-164.

Mosiño A., P., and E. García, 1974: *The climate of Mexico*. World Survey of Climatology, Vol. 11., New York, U.S.A. (Citado por Pereyra *et al.*, 1995)

Muñoz Ledo, R., 1994: Cálculo de las emisiones nacionales de CO₂ a partir del balance de energía. En Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. *México ante el Cambio Climático*, celebrado en Cuernavaca Morelos, del 18 al 22 de abril de 1994. 13-23 p.

Ojeda, M., A. Tejeda., M. Make. y S. Ruiz., 1993: *Análisis preliminar de las tendencias climáticas en tres localidades del estado de Veracruz, y sus posibles causas*. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM, México. 49 – 68 p.

Ortega Valcárcel, J., 2000: *Los horizontes de la geografía*. Barcelona: Ariel. 445 p.

Ortiz, M.A. y A. P. Méndez, 2000. Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México. Capítulo V en el libro México: Una visión hacia el siglo XXI. *El Cambio Climático en México*. SEMARNAP. UNAM, USCSP. C. Gay (compilador). 83-101 p.

Bibliografía

- Pereyra, D., Palma, B., y Barrientos, A., 1991: El Niño y su relación con las lluvias de Xalapa, Veracruz, México. *GEOS Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, **11**: 11-15 p.
- Pereyra, D., Palma, B. y Zitácuaro, I., 1992: Correlation between northers of Gulf of México and frosts at Las Vigas, Veracruz. *Atmósfera*. **5**: 109-118 p.
- Pereyra, D., B Sánchez, y J.L. Aguilar, 1994 : Effect of ENSO on the mid-summer drought in Veracruz State, México. *Atmósfera*. **7**: 211-219 p.
- Pereyra, D., A. Tejeda, B. Palma, 1995: Panorámica de la Climatología de Veracruz. Capítulo del Volumen I. El Territorio y sus características. Libro *Veracruz Cifras y Perfiles 1970-1990*. Editado por la Universidad Veracruzana. **I**:1 09-145 p.
- Rodríguez, R. L. y F. Acevedo, 1995: Zonas con riesgo de inundaciones en el Estado de Veracruz. *La Ciencia y el Hombre*, **21**: 121-151 p.
- Sellers, H., y K, McGuffie, 1990 : *Introducción a los Modelos Climáticos*. Omega, S.A. Barcelona. 231 p.
- Soto, M y García, E., 1989: *Atlas climático del estado de Veracruz*. Instituto de Ecología, Xalapa, Ver. 125 p.
- Stanley L. G. and M. C. MacCraken, 1990: The Use of General Circulation Models to Predict Regional Climate Change. *J. Climate*, **4**. 286-303.
- Tejeda, A., F., Acevedo y E., Jáuregui, 1989: *Atlas Climático del Estado de Veracruz*. Colección Textos Universitarios, UV. 1989. 150 p.
- Tejeda, A., T. Aguas y E. Viveros, 1995: Riesgos por factores climáticos en centro urbanos del estado de Veracruz. *La Ciencia y el Hombre*, **21**: 209-224 p.
- Villers-Ruiz, L.,I. Trejo-Vásquez, 2000. El cambio climático y la vegetación en México. Capítulo IV en el libro México: Una visión hacia el siglo XXI. *El Cambio Climático en México*. SEMARNAP. UNAM, USCSP. C. Gay (compilador). 63-81 pp.
- Von Storch, H., E. Zorita and U. Cubasch., 1993: Downscaling of global Climate Change Estimates to Regional Scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime. *Amer. Meteor. Soc.* **6**, 1161-1171 p.
- Wilby R.L., H. Keisuke, H. Hassan, K. Hanaki., 1998: Satatistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output., en *J. Hidrology*, **205**, 1-19 p.
- Zehnder, J., 1993: The effect of topography on tropical cyclone Landfall in Mexico. Procced. 20th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, *Amer. Meteor. Soc.* San Antonio, USA. Citado por Jáuregui *et al.*, 1995.

Bibliografía

Sitios web:

Albritton, D. L. y L. M. Filho, 2001: <http://ipcc.ch>; consultado en agosto 2004.

CCC, 2003: <http://www.pcmdi.llnl.gov/modeldoc/amip/12ccc.html>, consultado en marzo 2003.

GFDL, 2003: <http://www.gfdl.noaa.gov>; consultado en noviembre de 2003.

SMN, <http://smn.gob.mx/ciclones/historia/historia.html>; consultado en junio de 2003.

Díaz, P.G., M. Cortina, L. Rodríguez, 2001.

<http://orbita.starmeda.com/rcveracruz/Agricola/AgEx/AgEx17C.pdf>, consultado en octubre 2004.

Harvey, D., J. Gregory. M. Hoffert, a. Jain, M. Lal, R. Leemans, S. Raper, T. Wigley, J. De Wolde, 1997: <http://ipcc.ch>; consultado en diciembre 2003.

IPCC, 1997: <http://ipcc.ch>; consultado en noviembre 2004.

IPCC, 2001: <http://ipcc.ch>; consultado el 28 de marzo de 2003.

ANEXO I

Ecuaciones básicas de los MCG

De acuerdo a Sellers *et al.* (1990) cualquier modelo de circulación general debe ser formulado en base a los fundamentos siguientes:

1. Conservación de la energía (Primera ley de la termodinámica)

$$\frac{Dl}{Dt} = -p \frac{d\rho^{-1}}{dt} + Q$$

Considerando: dQ =Energía de entrada
 dU =Aumento de la energía interna
 $pd\alpha$ = el trabajo realizado

$$dQ = dU + pd\alpha$$

2. Conservación del momento (Segunda ley de movimiento de Newton)

Considerando: Fuerza igual a masa por aceleración

$$\frac{Dv}{Dt} = -2\Omega \times V - \rho^{-1} \nabla p + g + F$$

3. Conservación de la masa (ecuación de continuidad)

Considerando la suma de los gradientes del producto de la densidad y la velocidad del viento en las tres direcciones ortogonales nula.

$$\frac{D\rho}{Dt} = \rho \nabla \cdot v + C - E$$

4. Ley del gas ideal (una aproximación a la ecuación de estado)

$$p = \rho RT$$

Anexo

Notación:

v = Velocidad con relación a la Tierra en rotación,

$\frac{D}{Dt}$ = Derivada total,

Ω = Vector velocidad angular de la Tierra ($\Omega_y = \Omega \cos \varphi$, $\Omega_z = \Omega \sin \varphi$),

φ = Latitud,

g = Aceleración gravitacional aparente (9.8 m/s^2),

p = Presión atmosférica,

F = Fuerza por unidad de masa,

ρ = Densidad atmosférica,

C = Índice de creación de los componentes atmosféricos,

E = Índice de destrucción de los componentes atmosféricos,

I = Energía interna por unidad de masa ($=C_v T$),

Q = Proporción de calentamiento por unidad de masa,

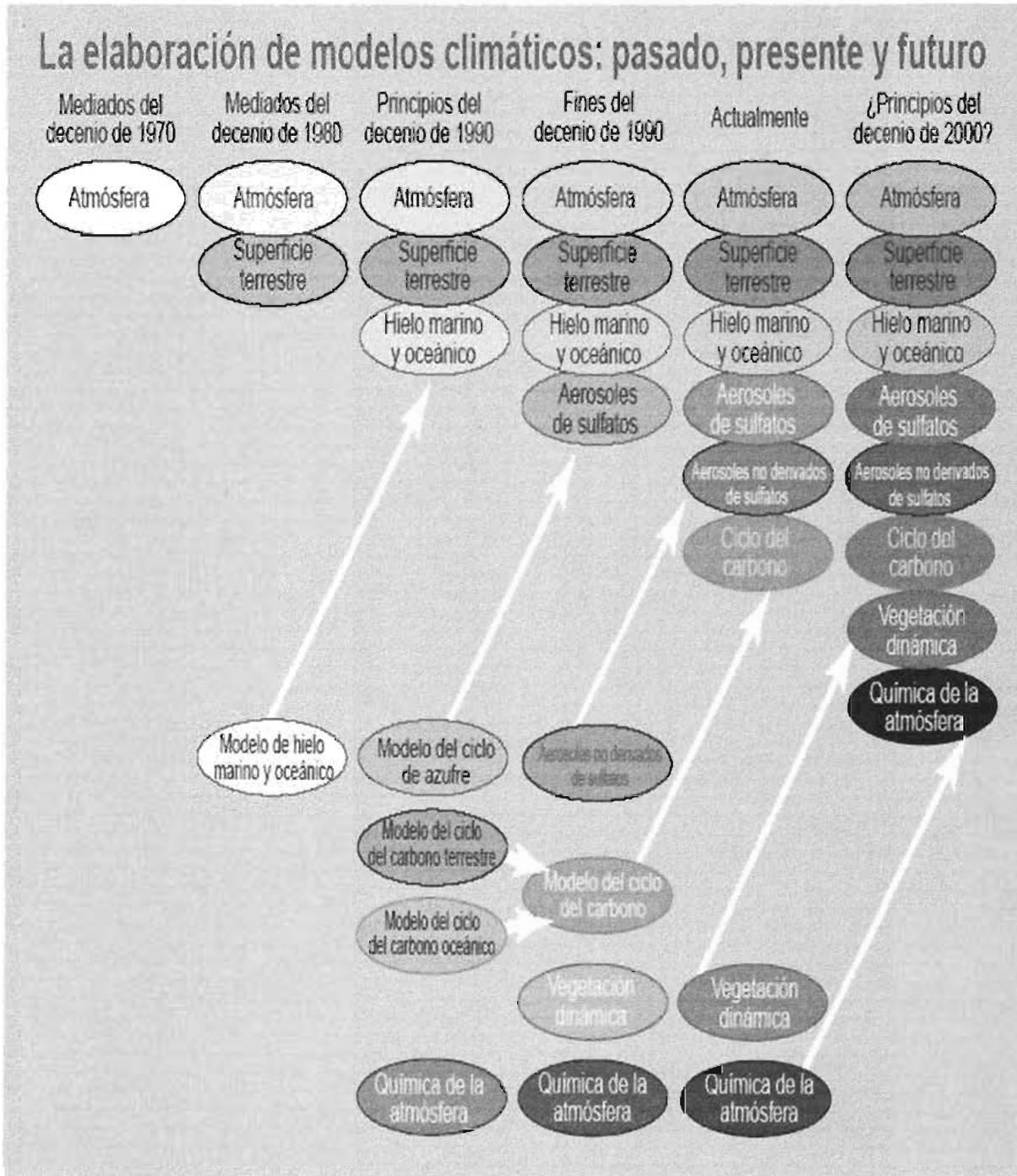
R = Constante de los gases (8 313.6 kilojulios por tonelada mol por grado absoluto de temperatura)

T = Temperatura

C_v = Calor específico del aire a volumen constante

Además hacen mención de que "los MCG deberían conservar la enstrofía (raíz cuadrada media de la vorticidad) para que la energía del movimiento se transmita en forma real a escalas espaciales cada vez más pequeñas y no tenga el efecto de que la estructura del modelo se vuelva inestable después de tiempos cortos de integración".

ANEXO II



Esquema del desarrollo de los modelos climáticos de los 70's a principios del 2000. Tomado de Albritton et al. (2001). Pp 41.

Anexo

ANEXO IV

Resumen de los principales modelos climáticos.

Tabla A.2.4 Modelos climáticos de la atmósfera y el océano⁸.

Tipo de modelo	Descripción
Atmosféricos radiativos – convectivos unidimensionales	Permiten calcular el forzamiento radiativo asociado con los cambios de la composición de la atmósfera ya que tratan con detalle los procesos relacionados con la transferencia de la radiación infrarroja y solar de la atmósfera. Se integran a nivel mundial (horizontalmente) y contienen varias capas verticalmente. Se debe prescribir el cambio de la cantidad de vapor de agua con el tiempo sobre la base de observaciones.
Oceánicos de difusión-alboramiento unidimensionales	Se emplea para conocer el papel que tienen los océanos dentro de la respuesta de la temperatura de la superficie a los cambios de forzamiento radiativo. El modelo se representa como una sola caja atmosférica, una capa de superficie que representa la tierra y el océano, capa de mezcla, y un océano profundo; en el modelo se representan las transferencias de la radiación solar e infrarroja, el intercambio de calor aire-mar y la mezcla en el océano profundo por difusión y variación termohalina.
De balance de energía unidimensional	Suministran información sobre la interacción de las retroalimentaciones del transporte de calor horizontal y en las que intervienen el hielo y la nieve. Sólo se representa la variación con la latitud y la atmósfera se integra verticalmente en dirección este-oeste; permite la combinación con la superficie para formar una sola capa. Los transportes de calor por la atmósfera y los océanos en la dirección norte-sur son representados como difusión y la emisión de radiación infrarroja hacia el espacio es función de los incrementos lineales de temperatura de la superficie.
Atmosféricos y oceánicos bidimensionales	Hacen posible el cálculo del transporte de calor bajo más fundamentos físicos que los modelos de balance de energía. Las dimensiones pueden ser latitud-altura o latitud-profundidad. En los modelos oceánicos la intensidad de la variación termohalina puede estar determinada o prescrita. Se han acoplado el modelo oceánico bidimensional con el modelo de balance de energía atmósfera-superficie unidimensional.
De circulación general atmosféricos (MCGA), oceánicos (MCGO) y acoplados (MCGAO).	Ambos son tridimensional; en la horizontal tienen una resolución de 2-4° de latitud por 2-4° de longitud y en la vertical de 10 a 20 capas. Simulan directamente los vientos, las corrientes oceánicas además de otras variables. Los modelos atmosféricos tienen prescritos las temperaturas de superficie del océano y hielo marino y los modelos oceánicos, las temperaturas de superficie y la salinidad, o los flujos de calor y agua dulce correspondientes. El acoplamiento de ambos modelos genera los MCGAO, éstos últimos calculan la transferencia de radiación a través de la atmósfera (modelan explícitamente el vapor de agua, las nubes y otros componentes atmosféricos), la nieve y el hielo marino, los flujos de superficie, el transporte de calor y agua por la atmósfera y el océano, y la captación de calor por los océanos; permitiendo cálculo de intercambios de calor, humedad y momento entre los componentes atmosférico y oceánico.

⁸ Resumen de los tipos principales de modelos atmosféricos y oceánicos a partir de la descripción contenida en el SIE GPOI (IPCC, 1996).

ANEXO V

Gráficos del cambio de la temperatura y precipitación promedio mensual bajo condiciones de 2CO₂ de uno de los sitios considerados en el estudio.

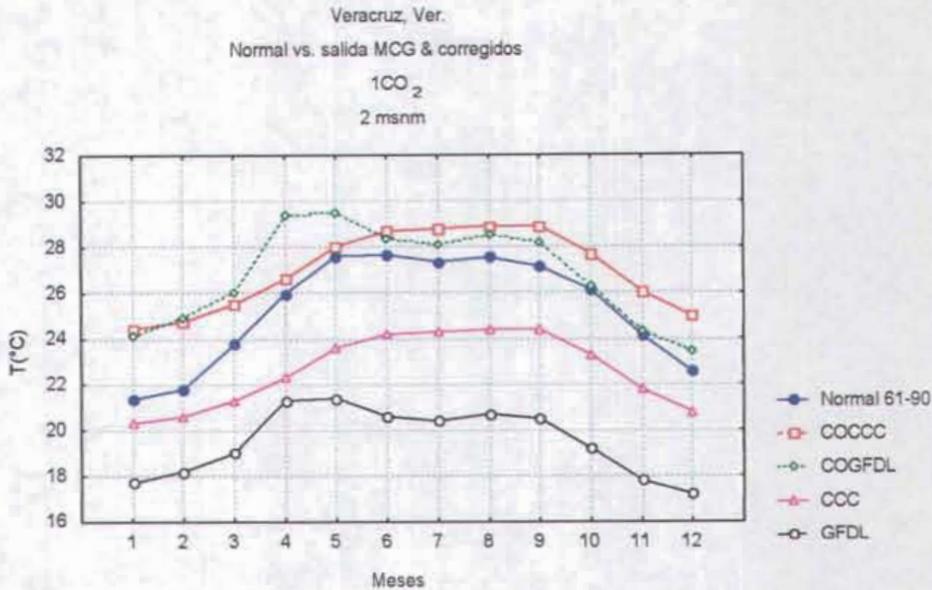


Figura 1.5. 1. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂, para Veracruz, Ver.

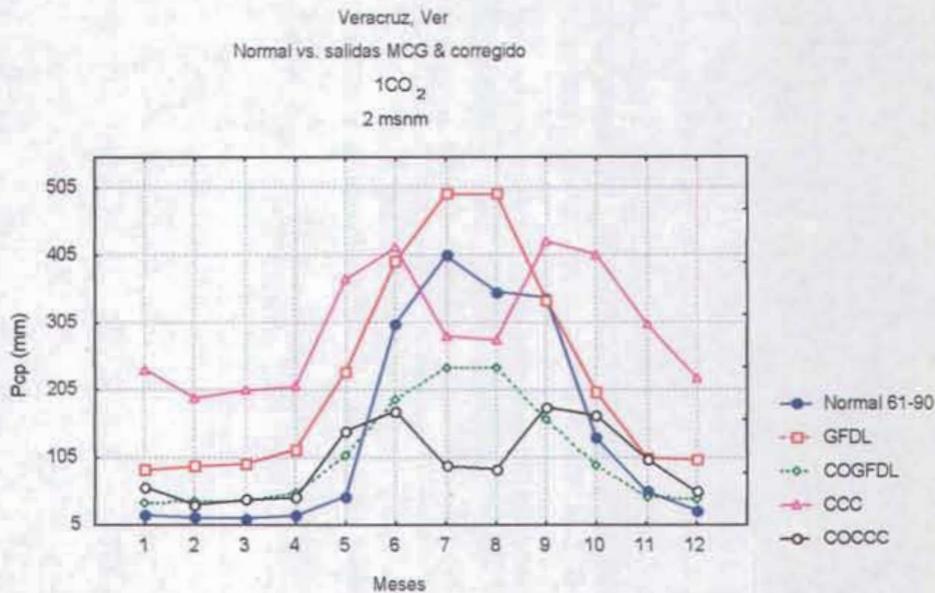


Fig. 1.5.2. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Veracruz, Ver. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

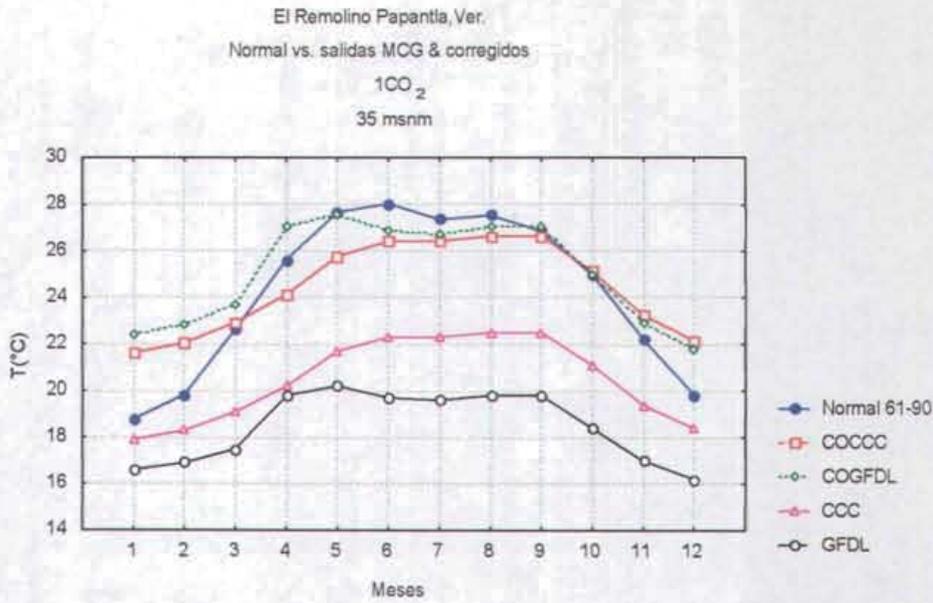


Figura 1.5.3. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para El Remolino, Ver.

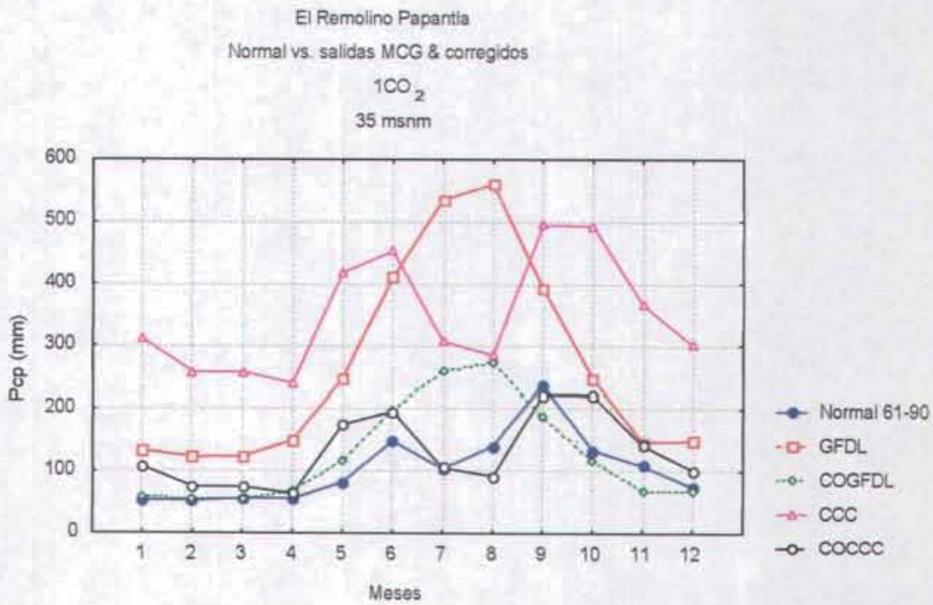


Fig. 1.5.4. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para El Remolino Papantla. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en julio.

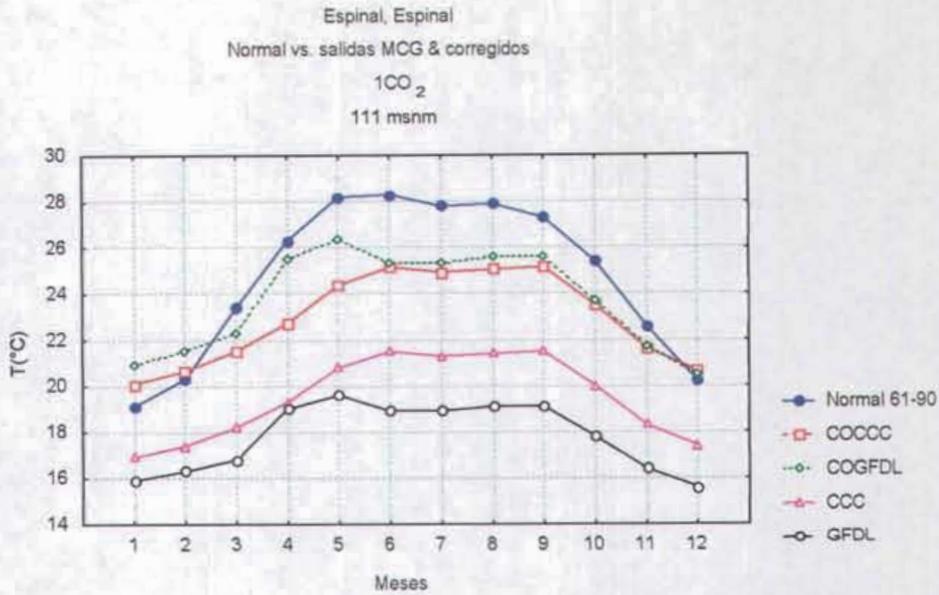


Figura 1.5.5. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Espinal, Ver.

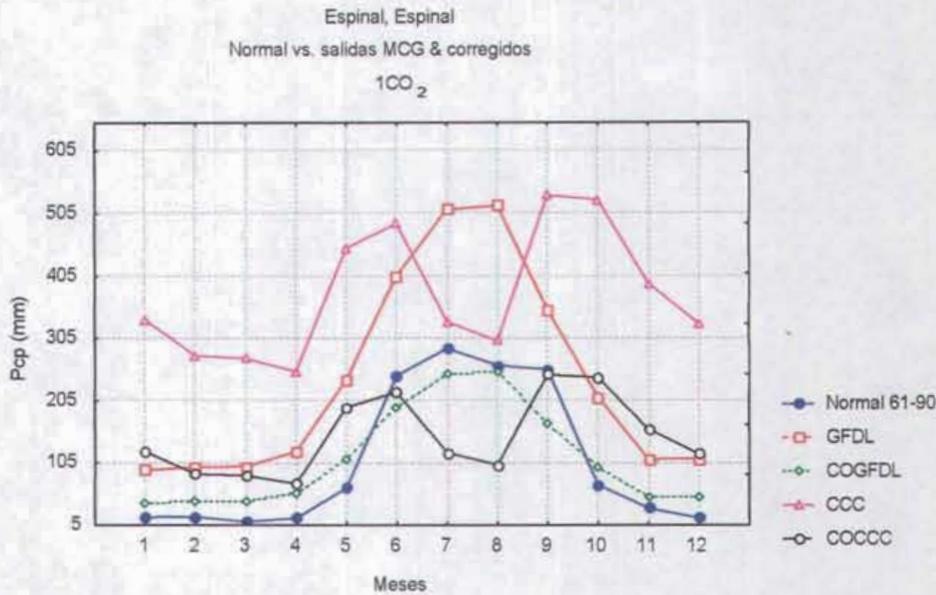


Fig. 1.5.6 Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Espinal, Espinal. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

Anexo

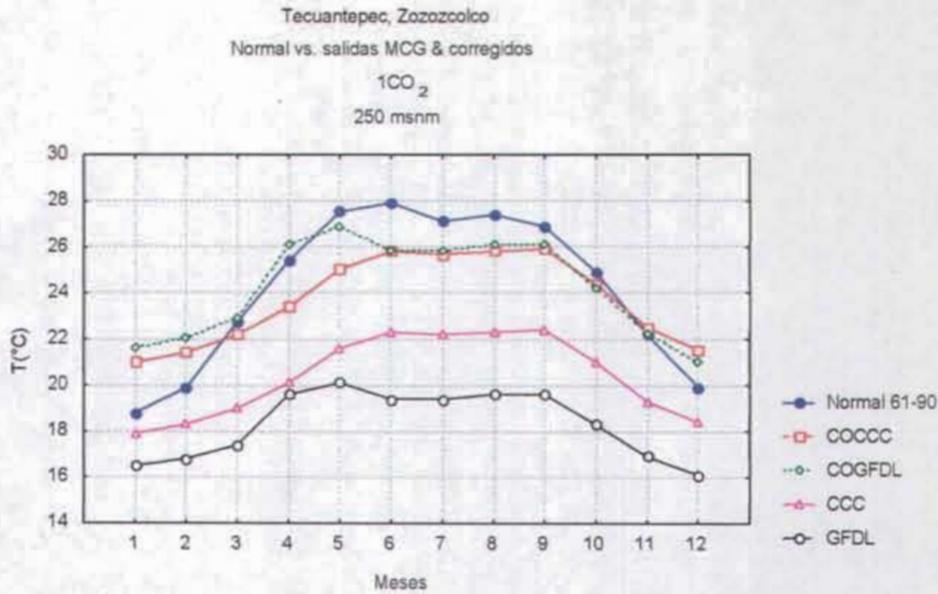


Figura 1.5.7. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Martínez de la Torre, Ver.

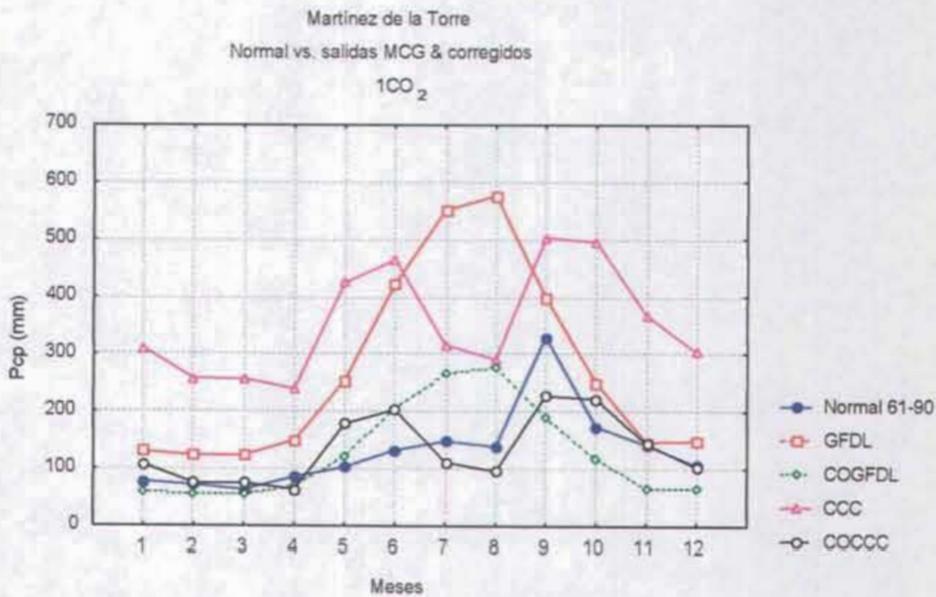


Fig. 1.5.8. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Martínez de la Torre. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

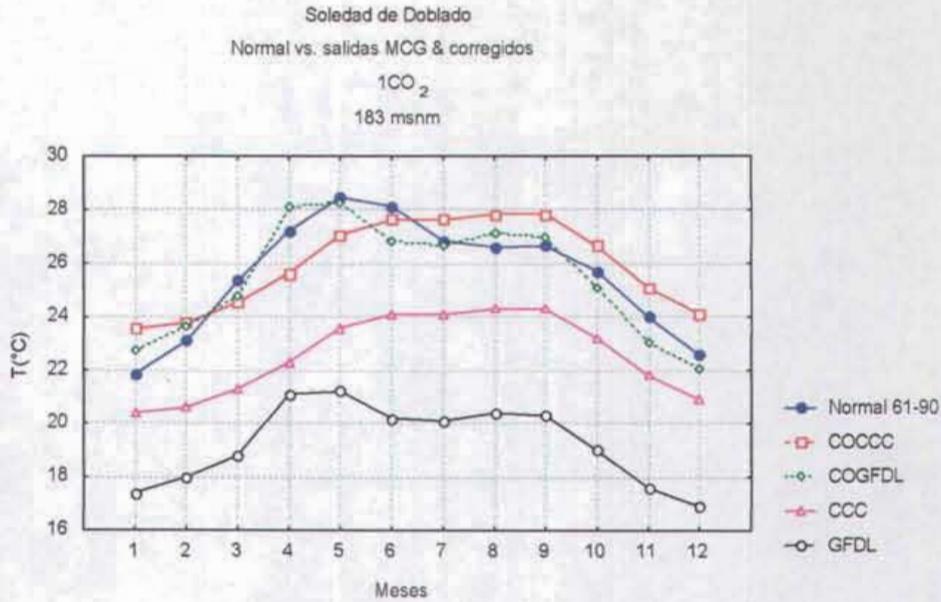


Figura 1.5.9. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Soledad de Doblado, Ver.

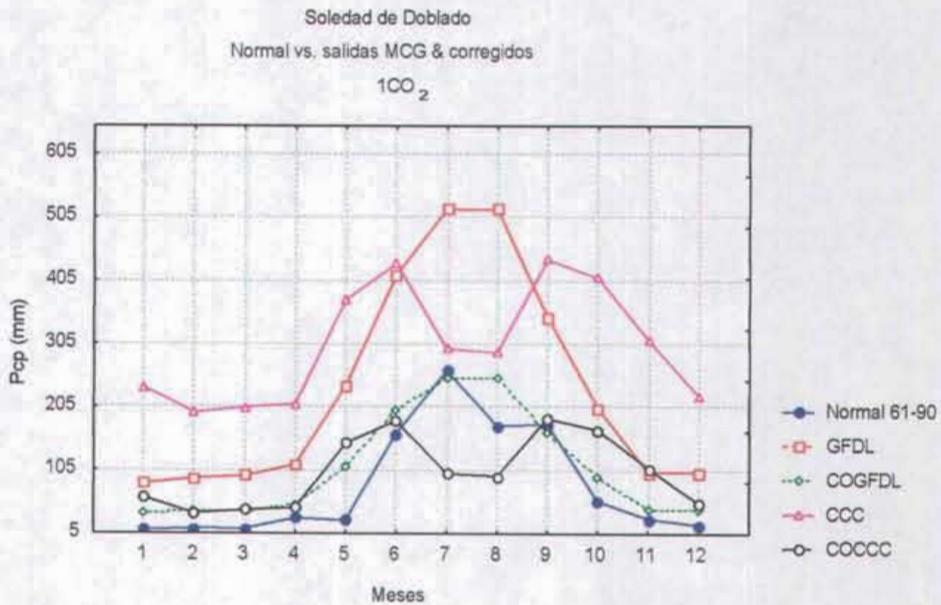


Fig. 1.5.10. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Soledad de Doblado. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

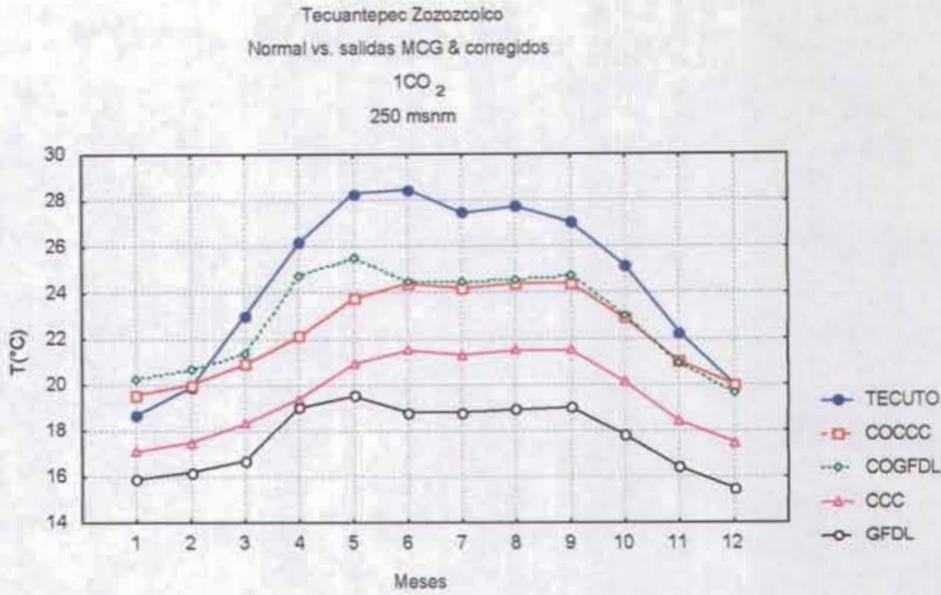


Figura 1.5.11. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Tecuan-tepec, Ver.

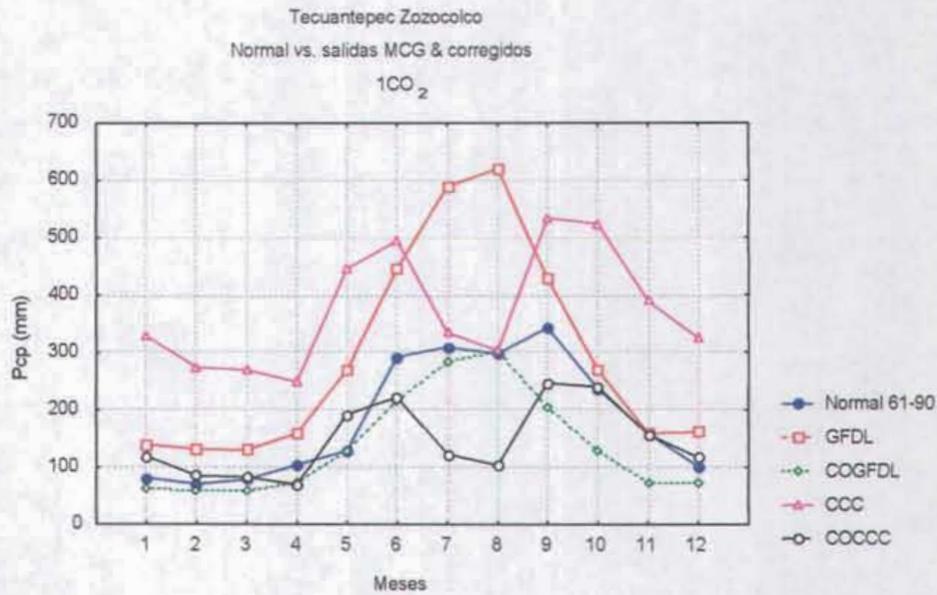


Fig. 1.5.12. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Tecuan-tepec, Zo-zo-co-lco. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

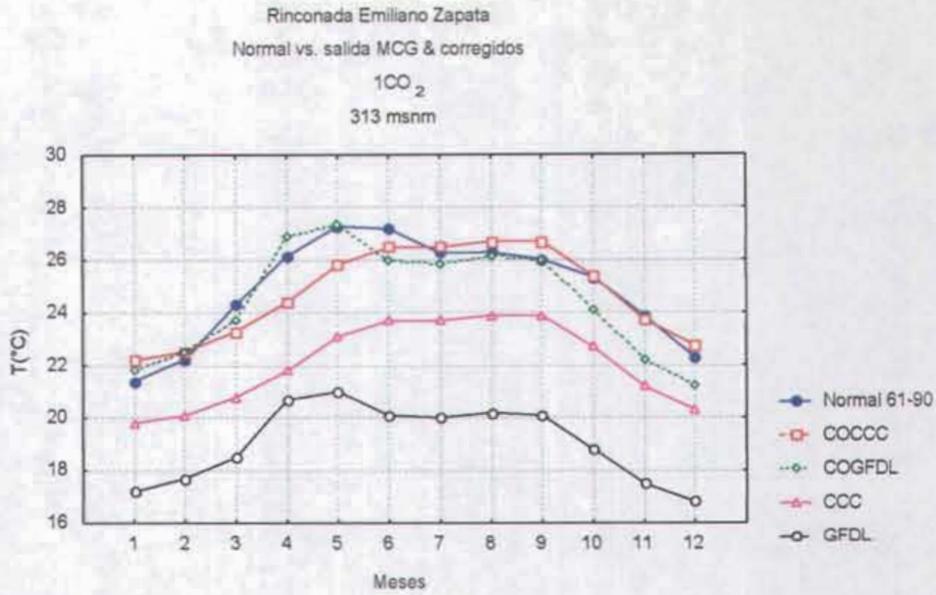


Figura 1.5.13. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Rinconada, Ver.

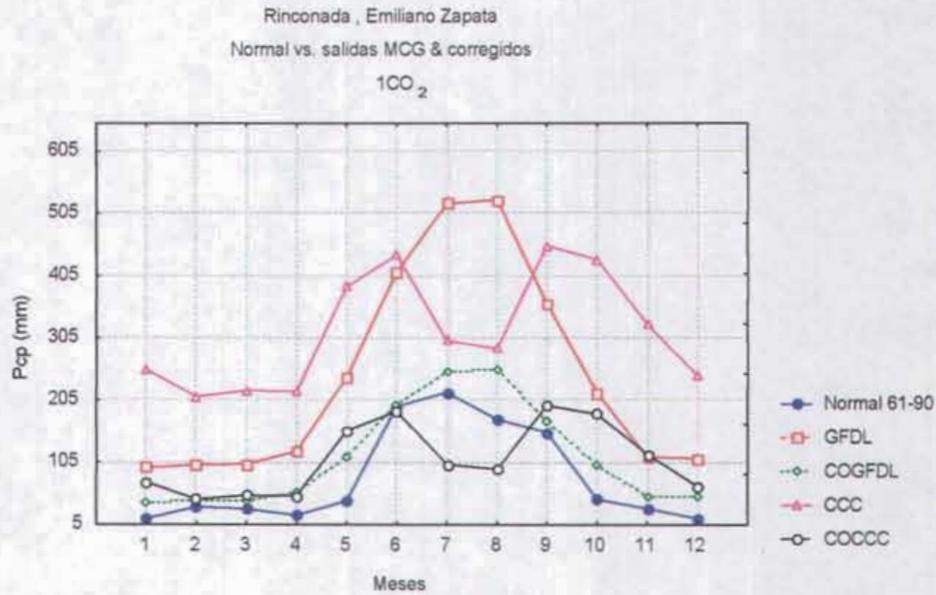


Fig. 1.5.14. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Rinconada, Emiliano Zapata. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

Anexo

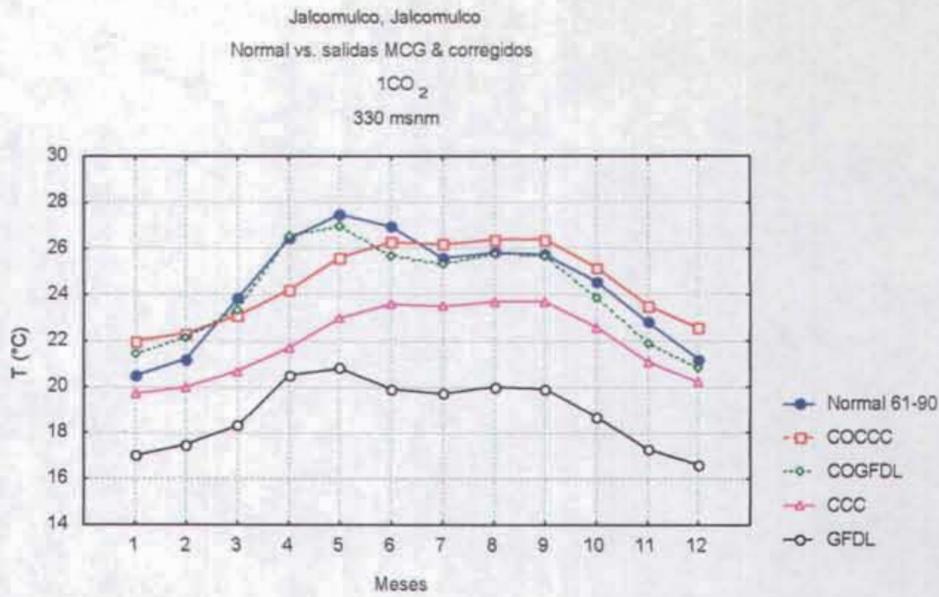


Figura 1.5.15. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂, para Jalcomulco, Ver.

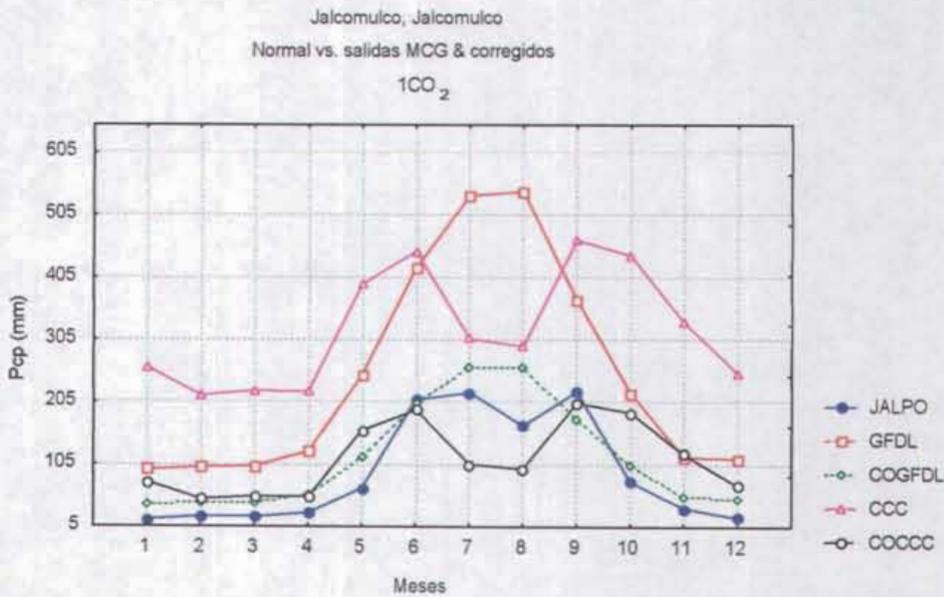


Fig. 1.5.16. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Jalcomulco, Jalcomulco. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

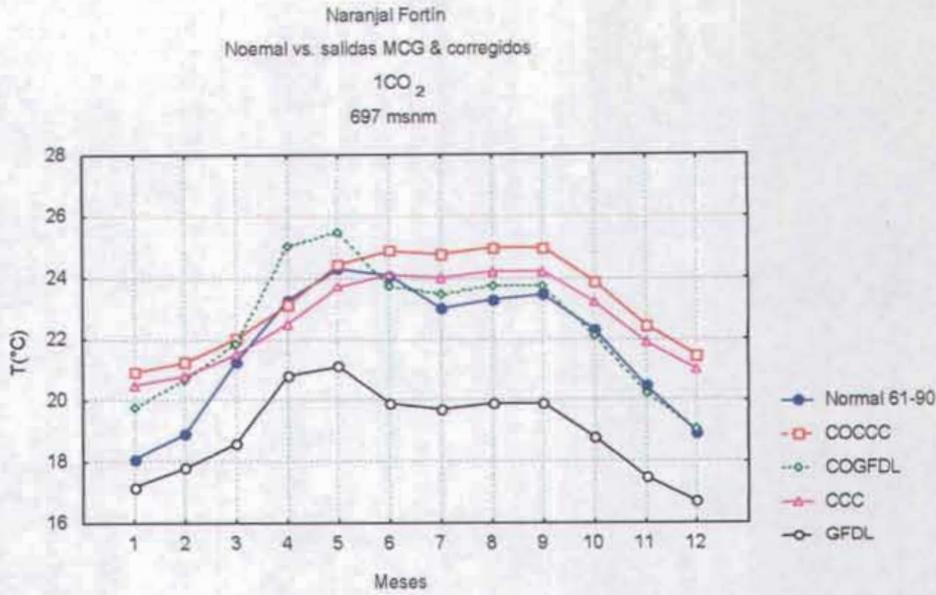


Figura 1.5.17. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Naranjal Fortin, Ver.

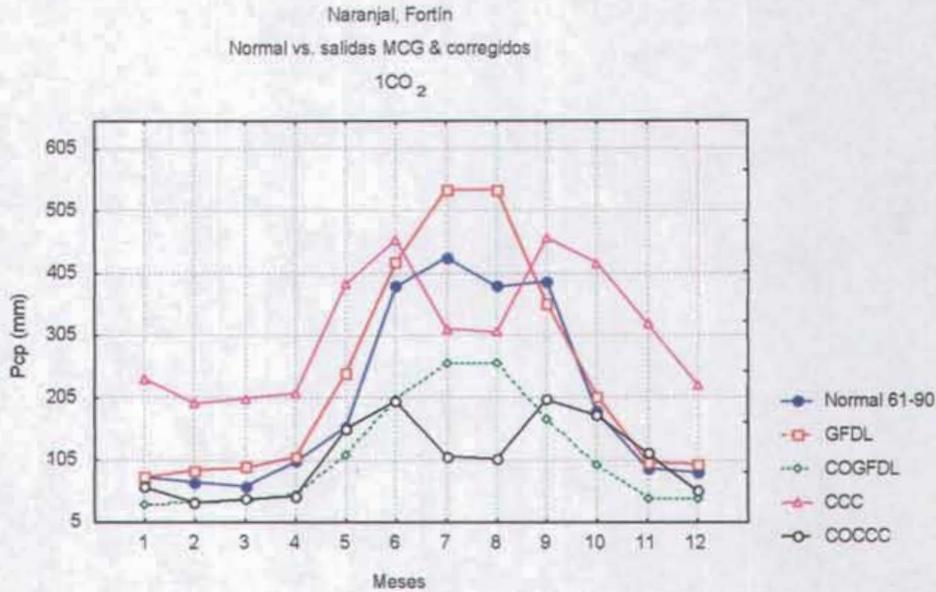


Fig. 1.5.18. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Naranjal, Fortin. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

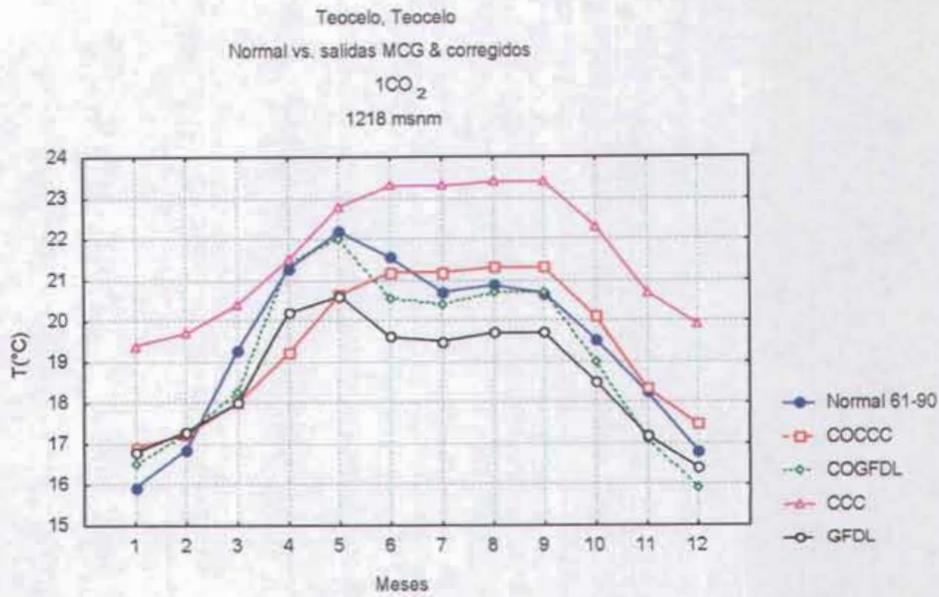


Figura 1.5.19. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂, para Teocelo, Ver.

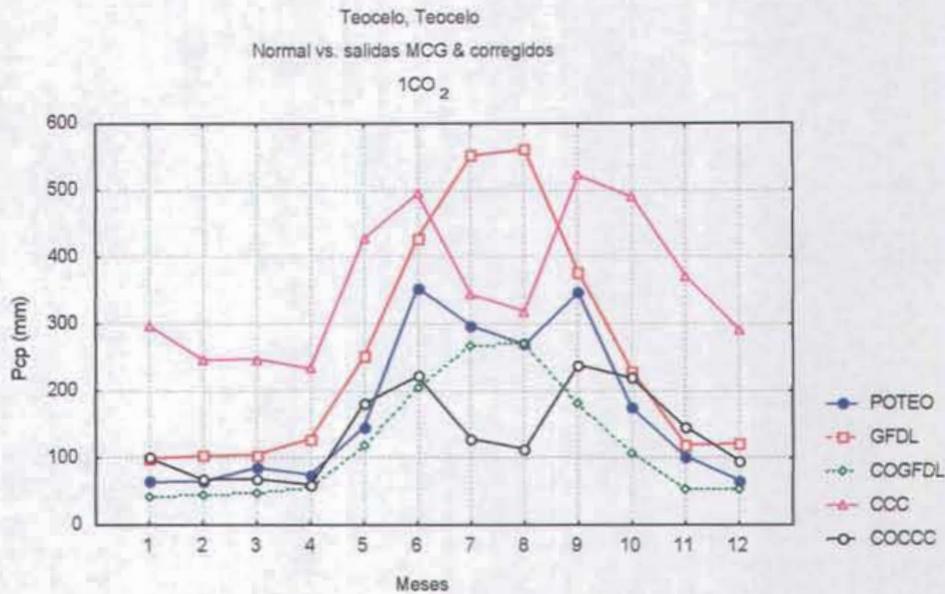


Fig. 1.5.20. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Teocelo, Teocelo. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en julio y agosto.

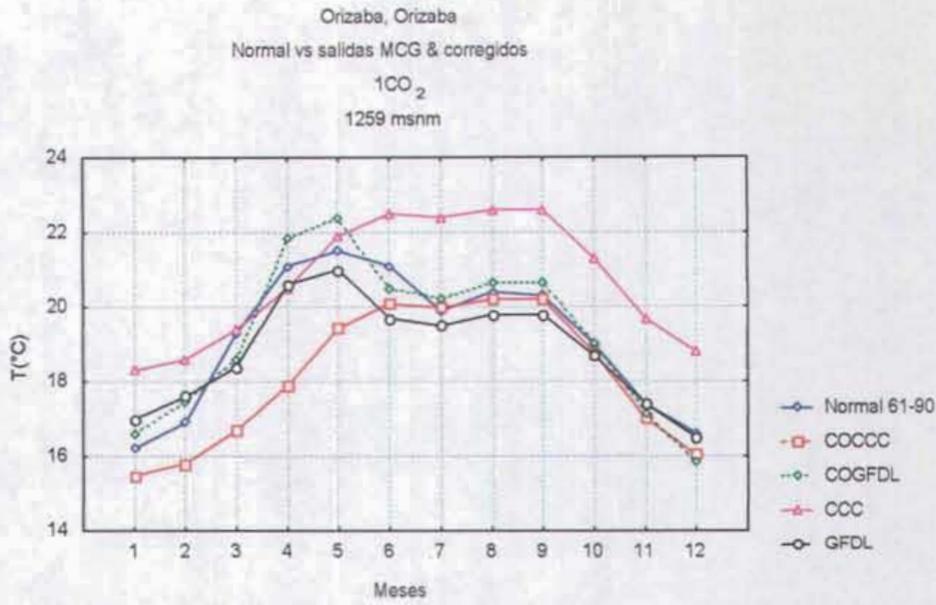


Figura 1.5.21. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Orizaba, Ver.

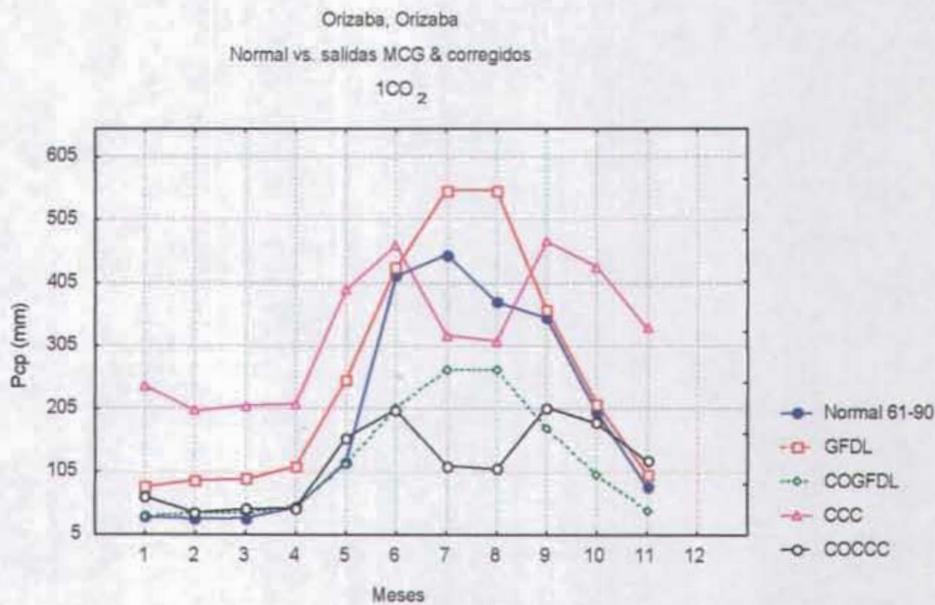


Fig. 1.5.22. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Orizaba, Orizaba. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

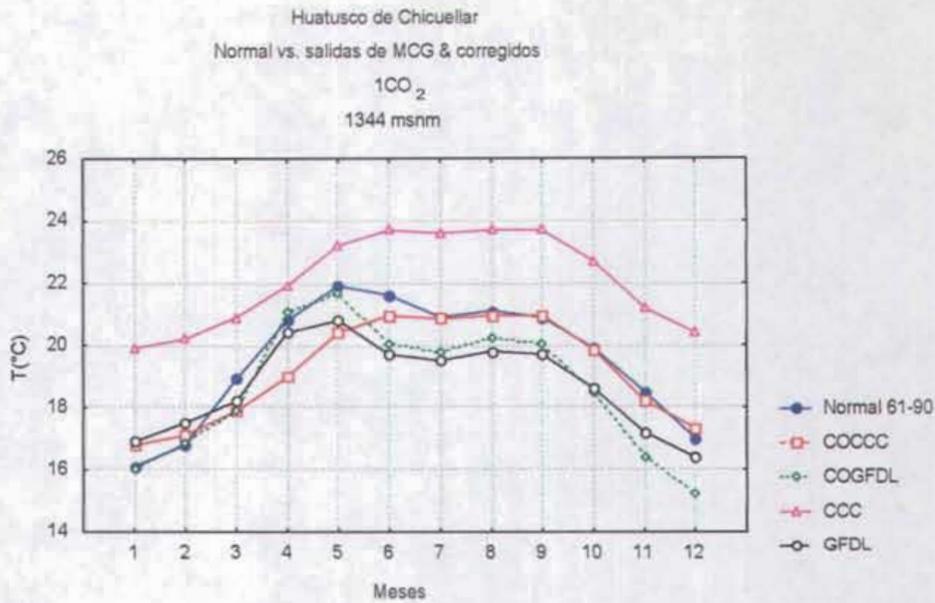


Figura 1.5.23. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Huatusco de Chicuellar.

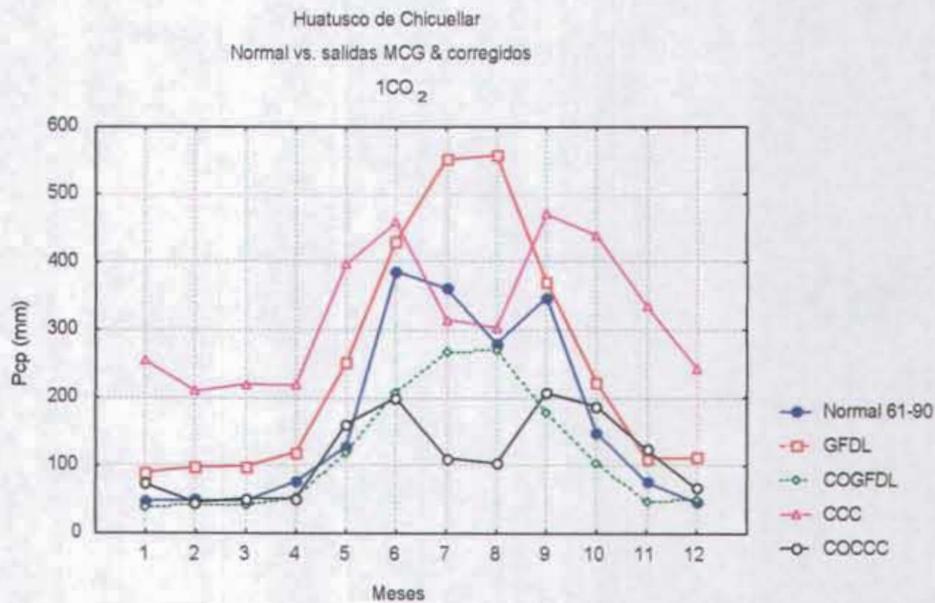


Fig. 1.5.24. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Huatusco de Chicuellar. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en julio y agosto.

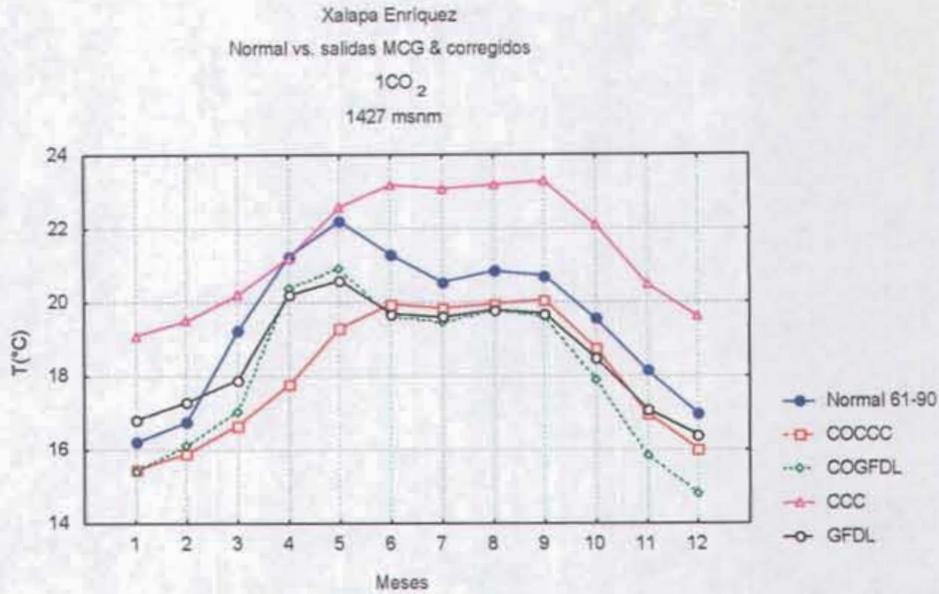


Figura 1.5.25. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Xalapa Enríquez., Ver.

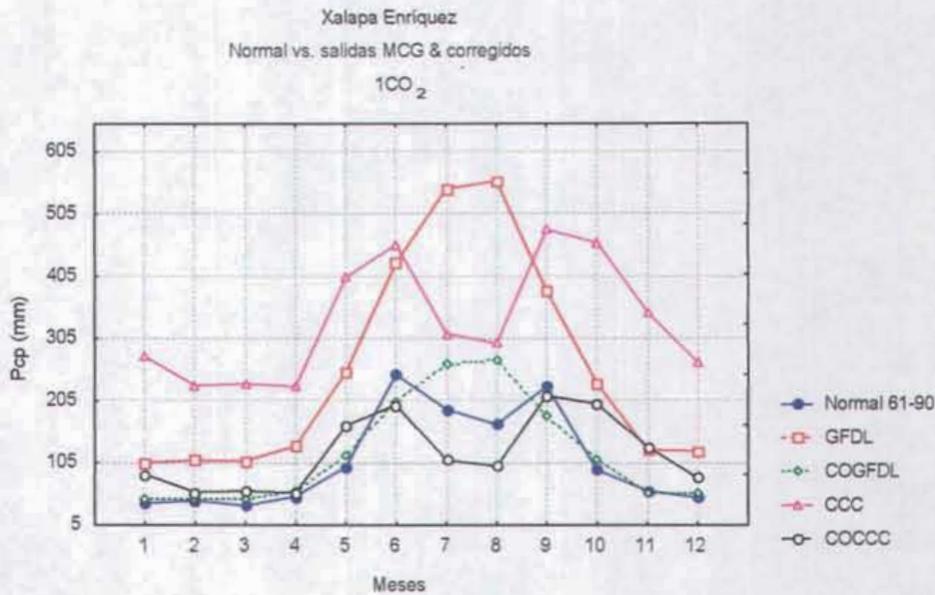


Fig. 1.5.26. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Xalapa Enríquez. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en julio y agosto.

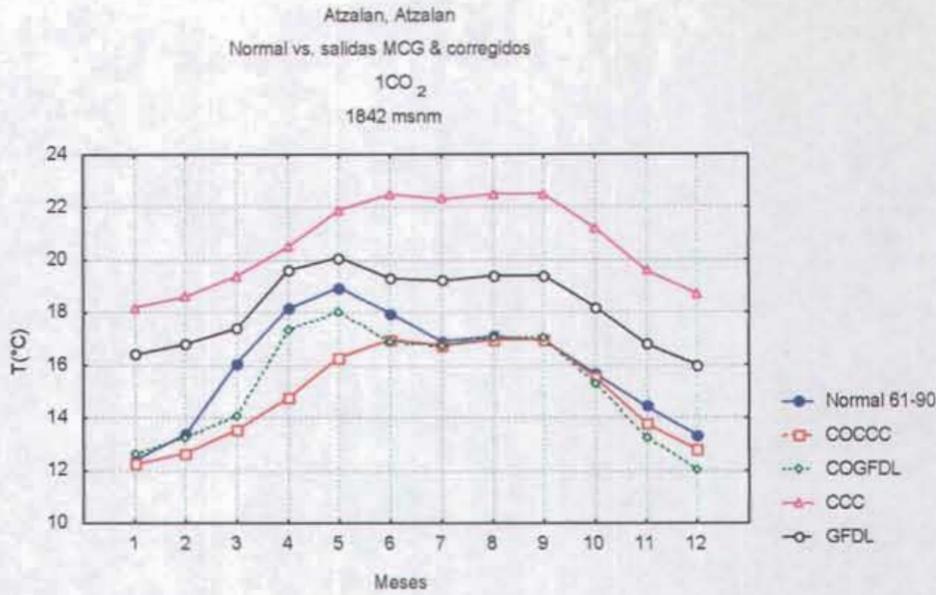


Figura 1.5.27. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Atzalan, Atzalan.

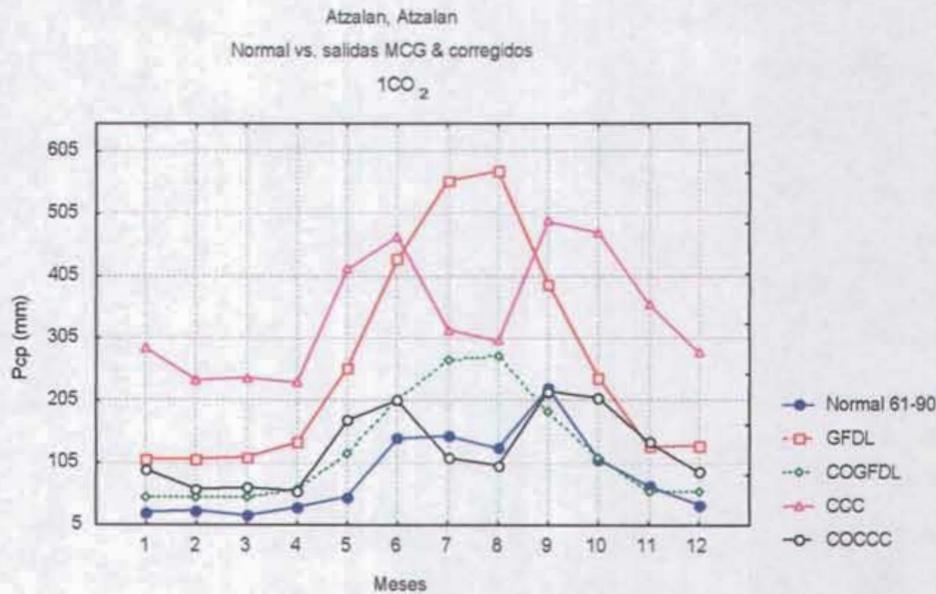


Fig. 1.5.28. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Atzalan, Atzalan. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

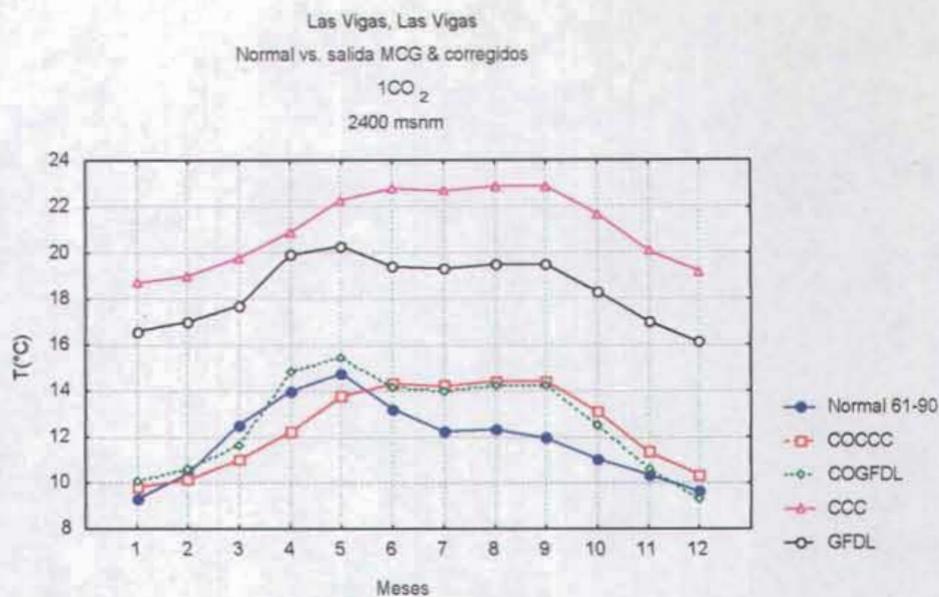


Figura 1.5.29. Comparación entre la temperatura normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Las Vigas, las Vigas.

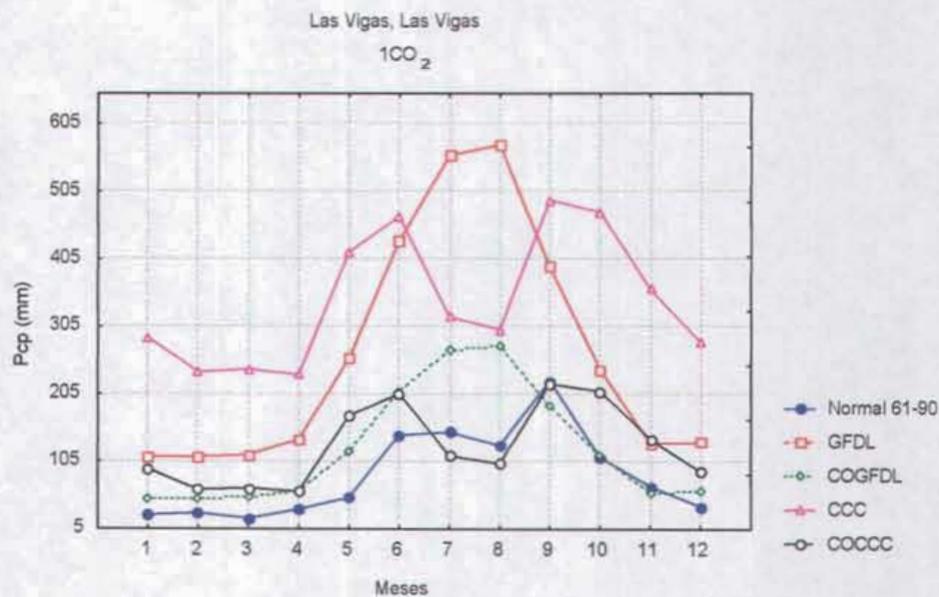


Fig. 1.5.30. Comparación entre precipitación normal mensual y las simulaciones de los modelos de acuerdo a la reducción de escala para condiciones de 1CO₂ para Las Vigas, Las Vigas. El modelo GFDL-R30 no presenta la disminución de la precipitación en agosto.

Anexo

ABREVIATURAS

Abreviaturas	SIGNIFICADO
GEI	Gases de efecto invernadero
O ₃	Ozono
CO ₂	Bióxido de carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Oxido nitroso
IPCC	Panel intergubernamental de cambio climático (por sus siglas en inglés)
TIE	Tercer informe del panel intergubernamental de cambio climático
MGCS	Modelos de circulación general
ALACCLA-29	Proyecto "Evaluación Integrada de la Vulnerabilidad Social y la Adaptación a la Variabilidad y los Cambios Climáticos de los Agricultores de México y Argentina"
GFDL	Geophysical Fluids Dynamics Laboratory
CCC	Canadian Climate Center
MCG	Modelo de Circulación General
WGII	Grupo de Trabajo 2 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático (por sus siglas en inglés)
SIE	Segundo Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático
PIE	Primer informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático
A ₂	Escenario de Desarrollo Socioeconómico: No dependencia regional, conservación de identidades locales, aumento continuo en la población, crecimiento económico a nivel regional
CAM	Centroamérica
B ₂	Escenario de Desarrollo Socioeconómico: Soluciones locales a problemas económicos y medioambientales, crecimiento poblacional menor que A ₂
IE-EE	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones
ECHAM4	German Climate Research Center/Hamburg Model # 4
HadCM2	Hadley Centre usando la segunda versión del UK Met. Office's Unified Model
INIREB	Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos
INEGI	Instituto Nacional de Geografía y Estadística
R27	Región Hidrológica 27 de la Comisión Nacional del Agua
R28	Región Hidrológica 28 de la Comisión Nacional del Agua
FAO	Food and Agriculture Organization
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
CNA	Comisión Nacional del Agua
CLICOM	Programa para obtener datos de variables climáticas Base de Datos Climáticos del SMN
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
SMM	Servicio Meteorológico Nacional
DAT 322	Base de Datos Climáticos
mm	Milímetros

Apexo

msnm	Metros Sobre el Nivel del Mar
°C	Grados Celsius
r	Coefficiente de correlación
r ²	Coefficiente de determinación
ESR	Error de estimación
SC	Sistema Climático
WGIII	Grupo de Trabajo 3 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre cambio climático (por sus siglas en inglés)
SERES	Reporte Especial de Escenarios de Emisiones
W	Componente vertical de viento
U	Componente zonal del viento
v	Componente meridional del viento
σ	Coordenada “sigma”
USGCRP	Programa de Investigación sobre Cambio Climático de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
USNA	Comité Nacional de Evaluación de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
ENSO	El Niño / Oscilación del Sur (por sus siglas en inglés)
CGCM	Modelo de Circulación General del Centro Canadiense (por sus siglas en inglés)
ΔT	Incremento en la temperatura
ΔP	Incremento en la precipitación