



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Posgrado en Ciencias de la Tierra
Centro de Ciencias de la Atmósfera

RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN
DE LA TEMPERATURA EN MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)

P R E S E N T A

NORMA IRENE CARRASCO MIJAREZ

DIRECTOR DE TESIS:
DRA. ROSARIO DE LOURDES ROMERO CENTENO
Centro de Ciencias de la Atmósfera

MÉXICO, D.F. JUNIO DE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Agradecimientos:

Agradezco infinitamente a la Dra. Rosario Romero Centeno por todos los conocimientos que me transmitió, por su paciencia y orientación en el desarrollo de esta tesis y también por su comprensión y apoyo moral en situaciones difíciles para mi.

A los miembros del jurado:

Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez

Dra. Rosalía Vidal Zepeda

Dr. Ricardo Prieto González

M. en C. Manuel René Garduño López

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada y al Dr. Jorge Zavala Hidalgo por el apoyo becario otorgado para concluir esta tesis.

A Maria Eugenia Allende, Nydia Taylor y Oscar Calderon por las asesorías computacionales que me proporcionaron.

*A la memoria de mi querido hermano
Eduardo Martín*

CONTENIDO

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	4
Capítulo 1: GENERALIDADES DEL CLIMA.....	7
1.1 El clima.....	8
1.2 La atmósfera y los elementos del clima.....	10
1.3 Factores que determinan el clima de la Tierra.....	13
1.4 Variabilidad climática.....	14
1.5 Temperatura del aire y gradiente térmico.....	15
1.5.1 La temperatura del aire.....	15
1.5.2 El gradiente térmico.....	17
Capítulo 2: EL CLIMA DE MÉXICO.....	19
2.1 Clasificación climática de Köppen.....	19
2.2 Clasificación climática para México.....	22
2.3 Factores que afectan el clima de México.....	25
2.3.1 Relieve, latitud, altitud, tierra y mares.....	25
2.3.2 Sistemas meteorológicos.....	26
Capítulo 3: EVENTOS EXTREMOS.....	28
3.1 Fenómeno meteorológico extremo.....	28
3.2 Cambios en los eventos extremos de temperatura.....	29
3.3 Índices de eventos extremos.....	30
Capítulo 4: EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR.....	33
4.1 Definición.....	33
4.2 Desarrollo del fenómeno ENOS.....	34
4.3 Intensidad del ENOS.....	36
4.4 Impactos de El Niño en el clima de México.....	38

Capítulo 5: DATOS, PROCESAMIENTO Y MÉTODOS DE ANÁLISIS	39
5.1 Datos.....	39
5.1.1 Reanálisis regional de Norteamérica.....	39
5.1.2 Datos del Servicio Meteorológico Nacional y estaciones de los E.U.A.....	41
5.2 Procesamiento de los datos para la obtención de mapas diarios de temperatura de alta resolución espacial.....	42
5.2.1 Descripción del método.....	42
5.3 Métodos de análisis.....	44
5.3.1 Estadísticos calculados para evaluar el producto generado.....	44
5.3.2 Diagramas de caja.....	45
5.3.3 Cálculo de la tendencia.....	47
Capítulo 6: MAPAS DE TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA DE ALTA RESOLUCIÓN	49
6.1 Mapas diarios de temperaturas máximas y mínimas.....	49
6.2 Mapas mensuales.....	52
6.3 Climatologías mensuales.....	56
6.3.1 Climatologías de la temperatura máxima.....	56
6.3.2 Climatologías de la temperatura mínima.....	63
Capítulo 7: EVALUACIÓN DEL PRODUCTO GENERADO Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA	69
7.1 Características geográficas y climáticas en los sitios seleccionados.....	69
7.2 Evaluación del producto generado.....	74
7.3 Análisis del ciclo estacional.....	83
7.3.1 Temperatura máxima.....	83
7.3.2 Temperatura mínima.....	88
7.4 Análisis de eventos extremos.....	93
7.4.1 Valores extremos absolutos.....	93
7.4.2 Valores extremos por percentiles.....	96
7.5 Análisis de tendencias.....	114

7.6 Análisis de las anomalías debidas al fenómeno ENSO.....	119
Conclusiones.....	128
Trabajo futuro.....	131
Anexo A.....	132
Métodos de interpolación.....	119
Anexo B.....	134
I. Medidas de dispersión.....	134
II. Medidas de posición.....	136
III. Medidas de forma.....	137
Referencias.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Perfiles verticales de temperatura en la atmósfera para distintas latitudes del Hemisferio Norte, durante Enero (arriba) y Julio (abajo).....	17
Figura 2.1.1: Recorte para México de la superficie climática mundial de Köppen-Geiger para el periodo 1951-2000 (http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificación_climática_de_Köppen).....	22
Figura 2.2.1: Clasificación climática de Köppen modificada y adaptada para México (García, 1988).....	24
Figura 2.3.1: Mapa del relieve de la República Mexicana.....	26
Figura 3.2.1: Efecto de los cambios en el promedio y varianza de la distribución de la temperatura sobre los valores extremos (tomada de Stephenson 2010).....	30
Figura 4.2.1: Esquema de la capa superficial del océano y de la atmósfera a través del Océano Pacífico ecuatorial durante: a) condiciones normales, b) un episodio de El Niño, y c) un episodio de La Niña.....	36
Figura 4.3.1: Región Niño 3.4 (5°N - 5°S, 120°-170°W).....	40
Figura 5.1.1: Dominio del NARR y su topografía con resolución de 32 km. La escala de colores indica la elevación del terreno en metros (tomada de Mesinger et al, 2006).....	40
Figura 5.1.2: Ubicación de las estaciones climatológicas de la base de datos del SMN en la República Mexicana (azul) y de las estaciones cercanas a la frontera con los E.U.A. (rojo).....	42
Figura 5.3.1: Ejemplo de un diagrama de caja (box-plot).....	46
Figura 5.3.2: Representación de distintas formas de la distribución de datos mediante diagramas de cajas.....	47
Figura 6.1.1: Mapas de temperatura mínima para el 1o. de Enero de 1979 con datos del NARR (arriba) y con el producto generado (abajo).....	50
Figura 6.1.2: Mapas de temperatura máxima para el 1o. de Junio de 1979 con datos del NARR (arriba) y con el producto generado (abajo).....	51
Figura 6.2.1: Mapas de temperatura mínima promedio del producto obtenido para enero de 1979, 1980, 1990 y 2009.....	53
Figura 6.2.2: Mapas de temperatura máximapromedio del producto obtenido para junio de 1979, 1980, 1990 y 2009.....	54
Figura 6.2.1: Mapas de temperatura mínima promedio del producto obtenido para Enero de 1979, 1980, 1990 y 2009.....	53

Figura 6.2.1: Mapas de temperatura máxima promedio del producto obtenido para Junio de 1979, 1980, 1990 y 2009.....	54
Figura 6.3.1: Condiciones térmicas con base en la temperatura máxima para el mes de Enero (arriba) y Febrero (abajo) considerando el período 1979-2009.....	56
Figura 6.3.2: Condiciones térmicas con base en la temperatura máxima para el mes de Marzo (arriba) y Abril (abajo) considerando el período 1979-2009.....	57
Figura 6.3.3: Condiciones térmicas con base en la temperatura máxima para el mes de Mayo (arriba) y Junio (abajo) considerando el período 1979-2009.....	58
Figura 6.3.4: Condiciones térmicas con base en la temperatura máxima para el mes de Julio (arriba) y Agosto (abajo) considerando el período 1979-2009.....	59
Figura 6.3.5: Condiciones térmicas con base en la temperatura máxima para el mes de Septiembre (arriba) y Octubre (abajo) considerando el período 1979-2009.....	60
Figura 6.3.6: Condiciones térmicas con base en la temperatura máxima para el mes de Noviembre (arriba) y Diciembre (abajo) considerando el período 1979-2009.....	61
Figura 6.3.7: Condiciones térmicas con base en la temperatura mínima para el mes de Enero (arriba) y Febrero (abajo) considerando el período 1979-2009.....	63
Figura 6.3.8: Condiciones térmicas con base en la temperatura mínima para el mes de Marzo (arriba) y Abril (abajo) considerando el período 1979-2009.....	64
Figura 6.3.9: Condiciones térmicas con base en la temperatura mínima para el mes de Mayo (arriba) y Junio(abajo) considerando el período 1979-2009.....	65
Figura 6.3.10: Condiciones térmicas con base en la temperatura mínima para el mes de Julio(arriba) y Agosto (abajo) considerando el período 1979-2009.....	66
Figura 6.3.11: Condiciones térmicas con base en la temperatura mínima para el mes de Septiembre (arriba) y Octubre (abajo) considerando el período 1979-2009.....	67
Figura 6.3.12: Condiciones térmicas con base en la temperatura mínima para el mes de Noviembre (arriba) y Diciembre (abajo) considerando el período 1979-2009.....	68
Figura 7.1.1: Ubicación de las estaciones seleccionadas en las regiones norte, centro y sureste del país.....	71
Figura 7.2.1: Comparación entre la serie de temperaturas máximas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Norte. La línea negra representa la diferencia entre ambas series.....	76
Figura 7.2.2: Comparación entre la serie de temperaturas máximas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Centro. La línea negra representa la diferencia entre ambas series.....	77

Figura 7.2.3: Comparación entre la serie de temperaturas máximas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Sureste. La línea negra representa la diferencia entre ambas series.....	78
Figura 7.2.4: Comparación entre la serie de temperaturas mínimas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Norte . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.....	79
Figura 7.2.5: Comparación entre la serie de temperaturas mínimas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Centro . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.....	80
Figura 7.2.6: Comparación entre la serie de temperaturas mínimas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Sureste . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.....	81
Figura 7.3.1: Diagramas de cajas para las series de TMax diaria en los sitios de la región Norte.....	85
Figura 7.3.2: Diagramas de cajas para las series de TMax diaria en los sitios de la región Centro.....	86
Figura 7.3.3: Diagramas de cajas para las series de TMax diaria en los sitios de la región Sureste.....	87
Figura 7.3.4: Diagramas de cajas para las series de TMin diaria en los sitios de la región Norte.....	90
Figura 7.3.5: Diagramas de cajas para las series de TMin diaria en los sitios de la región Centro.....	91
Figura 7.3.6: Diagramas de cajas para las series de TMin diaria en los sitios de la región Sureste.....	92
Figura 7.4.1: Ejemplo de los percentiles P90 para la TMax (arriba) y P10 para la TMin (abajo) del trimestre de verano durante los años de 1979 a 1981 en el sitio correspondiente a la estación 19024 (N.L.).....	97
Figura 7.4.2: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Sonora (arriba) y Chihuahua (abajo).....	99
Figura 7.4.3: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Coahuila (arriba) y Nuevo León (abajo).....	100
Figura 7.4.4: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90	

de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en el Edo. Mex. (arriba) y D.F. (abajo).....	101
Figura 7.4.5: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Puebla (arriba) y Tlaxcala (abajo).....	102
Figura 7.4.6: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Tabasco (arriba) y Campeche (abajo).....	103
Figura 7.4.7: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Yucatán (arriba) y Quintana Roo (abajo).....	104
Figura 7.4.8: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Sonora (arriba) y Chihuahua (abajo).....	106
Figura 7.4.9: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Coahuila (arriba) y Nuevo León (abajo).....	107
Figura 7.4.10: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en el Edo. de México (arriba) y el Distrito Federal (abajo).....	109
Figura 7.4.11: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Puebla (arriba) y Tlaxcala (abajo).....	110
Figura 7.4.12: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Tabasco (arriba) y Campeche (abajo).....	112
Figura 7.4.13: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Yucatán (arriba) y Quintana Roo (abajo).....	113
Figura 7.5.1: Gráficas de los promedios anuales (1979-2009) con tendencia para la región Norte.....	116
Figura 7.5.2: Gráficas de los promedios anuales (1979-2009) con tendencia para la región Centro.....	117

Figura 7.5.3: Gráficas de los promedios anuales (1979-2009) con tendencia para la región Sureste.....	118
Figura 7.6.1 : Anomalías de la temperatura máxima para los meses de Noviembre y Diciembre de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).....	120
Figura 7.6.2 : Anomalías de la temperatura máxima para los meses de Enero y Febrero de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).....	121
Figura 7.6.3 : Anomalías de la temperatura máxima para los meses de Marzo y Abril de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).....	122
Figura 7.6.4 : Anomalías de la temperatura mínima para los meses de Noviembre y Diciembre de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha)	124
Figura 7.6.5 : Anomalías de la temperatura mínima para los meses de Enero y Febrero de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).....	125
Figura 7.6.6 : Anomalías de la temperatura mínima para los meses de Marzo y Abril de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha)	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Grupos climáticos según la clasificación de Köppen (Ayllón, 2003).....	20
Tabla 2.2: Clasificación de los climas secos (Grupo B). Las letras S y W se refieren al grado de aridez y la tercera letra está relacionada con la temperatura.....	20
Tabla 2.3: Subgrupos de la clasificación climática de Köppen que sintetizan el régimen de lluvias.....	21
Tabla 2.4: Sistema de clasificación climática de Köppen.....	21
Tabla 3.1: Índices basados en percentiles relacionados con la temperatura.....	31
Tabla 2.3: Subgrupos de la clasificación climática de Köppen que sintetizan el régimen de lluvias.....	21
Tabla 4.3.1: Definición de la intensidad del evento ENOS según el ONI.....	36
Tabla 4.3.2: Año e intensidad de los eventos de El Niño y La Niña ocurridos en el período de 1979-2009 (ONI, 2012).....	37
Tabla 7.1.1: Datos de las doce estaciones seleccionadas de la base de datos del SMN para realizar la comparación con el producto generado.....	70
Tabla 7.2.1: Estadísticos calculados para evaluar el desempeño del producto generado, tanto para las temperaturas máximas (TMax) como las mínimas (TMin): Coeficiente de correlación, error absoluto medio (MAE) y raíz del error cuadrático medio (RMSE).....	75
Tabla 7.4.1: Valores extremos de temperatura máxima en los doce sitios seleccionados, su fecha de ocurrencia y la condición ENSO y/o evento especial presente en tal fecha.....	94
Tabla 7.4.2: Valores extremos de temperatura mínima en los doce sitios seleccionados, su fecha de ocurrencia y la condición ENSO y/o evento especial presente en tal fecha.....	95
Tabla 7.4.3: Períodos de tiempo en que fue dividido el año para el análisis de eventos extremos.....	96
Tabla 7.5.1. Tendencias de temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN) considerando los promedios anuales para el período de 1979 a 2009 en las regiones norte, centro y sureste del país. Se indica si la tendencia resultó significativa.....	114
Tabla 7.6.1: Años con condiciones neutras durante el mes correspondiente según el índice ONI para el período 1979-2009.....	119

RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN MÉXICO

RESUMEN

A partir de observaciones diarias registradas en más de 5,000 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la base de datos del reanálisis de Norteamérica (North American Regional Reanalysis, NARR) y de algunas estaciones localizadas en los estados fronterizos de los Estados Unidos, se generaron mapas diarios de alta resolución espacial (aprox. 1.9 km) de las temperaturas máximas y mínimas para toda la República Mexicana durante el período de 1979 a 2009. Para la obtención de los mapas se utilizaron algoritmos de interpolación (lineal y de distancias inversas) y la teoría del gradiente térmico, es decir, la relación entre la temperatura del aire y la altitud, haciendo uso de los datos de elevación del terreno de la base General Bathymetric Chart of the Oceans de un minuto de resolución. El procesamiento de los datos de temperatura también incluye un control de calidad simple, eliminando las observaciones cuya diferencia con un mapa suavizado difiere en más de 1.5 desviaciones estándar. Mediante una comparación entre las series de tiempo de las temperaturas máximas y mínimas obtenidas a partir de los mapas diarios reconstruidos y las de los datos observados en 12 estaciones del SMN, elegidas de modo que representaran distintos regímenes climáticos a lo largo del país y que tuvieran al menos el 50% de las observaciones en el período considerado, se observó que el producto generado reproduce adecuadamente las variaciones de temperatura observadas en algunos de los sitios escogidos, mientras que en otros subestima o sobrestima los valores observados. Aún cuando el método empleado “corrige” algunos errores en las observaciones, en ocasiones el procedimiento no elimina ciertos registros dudosos y el método de interpolación se ve afectado por ellos; asimismo, el producto obtenido muestra algunas deficiencias en regiones donde hay escasez de estaciones, como en el norte del país y en las penínsulas de Baja California y Yucatán, o durante los períodos en los que no hay registros. El producto obtenido se utilizó para analizar las climatologías mensuales de las temperaturas máximas y mínimas en el territorio nacional; el ciclo estacional, la ocurrencia de eventos extremos y las tendencias durante el período 1979-2009 en los doce sitios seleccionados, y las anomalías mensuales durante los años Niño intensos de 1982-1983 y 1997-1998.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Para realizar un análisis detallado de las condiciones meteorológicas, sería idóneo contar con series de tiempo largas, continuas y confiables de observaciones diarias en los sitios de interés, lo cual permitiría documentar sus variaciones en distintas escalas de tiempo, incluyendo por ejemplo las variaciones mensuales, estacionales, interanuales o decadales. Las series de tiempo de mediciones de largo plazo son cruciales para caracterizar la variabilidad natural y para detectar posibles tendencias en su comportamiento. Asimismo, son útiles para analizar las diferencias entre un año y otro y relacionarlas con distintos fenómenos, ya sea naturales o de origen antropogénico. Estos datos son también de importancia para el estudio de eventos extremos, los cuales impactan severamente las actividades cotidianas y la economía de una región. Si además agregáramos una alta resolución espacial en las observaciones, la cual permite apreciar los factores topográficos y biológicos que influyen en el clima de cierto lugar, obtendríamos una representación confiable de condiciones meteorológicas a nivel global, regional o local.

Las variables que afectan más directamente la vida cotidiana son: la temperatura promedio, la máxima y la mínima, el viento cerca de la superficie terrestre, la precipitación en sus diversas formas, la humedad, el tipo y la cantidad de nubes y la radiación solar. Estas son variables que se registran cada hora mediante un gran número de estaciones meteorológicas alrededor del planeta. Pero éstos son solamente parte de los factores que determinan el estado del tiempo y del clima. La evolución de los sistemas meteorológicos depende también de la estructura vertical de la atmósfera, de la influencia del suelo y el mar subyacentes y muchos otros factores que los seres humanos no experimentamos de manera directa. El clima está determinado por la circulación atmosférica y sus interacciones con las corrientes oceánicas de gran escala y las características del terreno tales como el albedo, la vegetación y la humedad del suelo. Asimismo el clima terrestre depende de los factores que influyen sobre el balance radiativo, tales como la composición de la atmósfera, la radiación solar o las erupciones volcánicas. Para entender el clima de nuestro planeta y sus variaciones, y para entender y posiblemente predecir los cambios del clima provocados por las actividades humanas, no se puede ignorar ninguno de los factores y componentes que lo determinan, la gran cantidad de interacciones mutuas entre ellos y la gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro y entre estos componentes. El “clima” en un sentido amplio se refiere al estado del sistema climático como un todo, incluyendo una descripción estadística de sus variaciones (IPCC, 2007).

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local, cuenta con más de 5,000 estaciones de superficie distribuidas en todo el país, en las que se realizan registros de las temperaturas máximas y mínimas diarias, entre otras variables ambientales. Sin embargo, estas series de tiempo tienen varias deficiencias, como datos registrados que no son confiables, la ausencia de registros durante ciertos períodos o *huecos* o series muy cortas y no actualizadas. Estas deficiencias son debidas a diversas causas, como un posible cambio de ubicación de las estaciones, el mal funcionamiento de los instrumentos de medición y la falta de personal capacitado, entre otras. Esto representa una dificultad para el análisis de los datos y un problema grave para el mejoramiento de los pronósticos de los eventos climáticos y meteorológicos que afectan a México.

En este sentido, existe una necesidad urgente de contar con una base de datos diarios de las variables meteorológicas más relevantes para el estudio del clima en nuestro país, que sea razonablemente confiable y útil tanto para el usuario común como para aquéllos que realizan investigación. El presente trabajo es un esfuerzo dirigido a satisfacer, en parte, esta necesidad mediante la generación de mapas diarios de las temperaturas máximas (TMax) y mínimas (TMin), con alta resolución espacial, contruidos a partir de las series de tiempo históricas del SMN.

El procesamiento de los datos incluye un método de interpolación y de estimación de las temperaturas que toma en cuenta la altura de cada punto y un control de calidad que elimina únicamente la información dudosa de una estación para un día determinado, reteniendo los días en los cuales la información es razonable. De esta manera, los mapas generados proporcionan series de tiempo completas y confiables para cualquier punto sobre la República Mexicana en una malla regular con resolución aproximada de 1.9 km, lo que los hace útiles para realizar diversos análisis estadísticos y estudios del clima tanto a nivel regional como local. Asimismo, pueden ser de gran utilidad en la validación y evaluación del desempeño de modelos de pronóstico numérico.

Cabe mencionar que el producto obtenido muestra algunas limitaciones debidas en gran medida, a las deficiencias de la base de datos del SMN, como la baja densidad de estaciones en varios de los estados del país y mediciones mal registradas.

OBJETIVO GENERAL:

El objetivo principal de la tesis es generar un producto de mapas diarios de las temperaturas máximas y mínimas para la República Mexicana, con una alta resolución espacial, basado en los datos históricos del SMN y realizar un análisis de la variabilidad climática durante los últimos 30 años.

OBJETIVOS PARTICULARES:

1. Crear mapas de temperaturas máximas y mínimas con alta resolución espacial (~1.9 km) y temporal (escala diaria) para el territorio Mexicano.
2. Realizar un análisis de tendencias y de eventos extremos de las temperaturas máximas y mínimas para las distintas regiones del país.
3. Caracterizar la variabilidad interanual y su relación con las fases del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur.

Capítulo 1

GENERALIDADES DEL CLIMA

Conocer cuáles son las características climáticas de un determinado lugar es de gran importancia porque éstas afectan directamente a las actividades humanas. Interesa saber, por ejemplo, a lo largo de un año, cuándo va a llover y con qué intensidad, que días serán los más cálidos o los más fríos, etc. Esta información es de utilidad para aprovechar la pesca, mejorar la actividad agrícola, para proveer de agua y alimento al ganado, para proteger y prevenir a las poblaciones de las consecuencias de los eventos extremos como sequías, lluvias intensas, ondas de calor, fríos intensos, entre otros. Los datos proporcionados por los instrumentos de medición que registran las condiciones atmosféricas, permiten realizar análisis estadísticos y generar mapas de distintas variables como la temperatura, la precipitación, la nubosidad, la magnitud y dirección de los vientos, la presión, etc., y son la base para la formulación de clasificaciones climáticas. Tal información es fundamental para los tomadores de decisiones en la planeación de actividades y proyectos con el objeto de reducir los riesgos y optimizar los beneficios socio-económicos para la población.

A continuación se presentan algunos conceptos relacionados con el clima y que fueron útiles para el desarrollo de este trabajo.

1.1 El clima

Un sistema climático está formado por subsistemas que interaccionan entre sí intercambiando masa, energía y cantidad de movimiento. Estos subsistemas son: la atmósfera, la hidrosfera (formada por todos los cuerpos de agua líquida que se encuentra sobre y bajo la superficie terrestre), la biosfera (flora y fauna), la criosfera (hielo y nieve) y la litosfera (capa superficial de la Tierra sólida). Cada subsistema tiene un tiempo de respuesta, esto significa que necesita tiempo para volver al equilibrio después de haber sido perturbado (Casas y Alarcón, 1999). El sistema climático se alimenta de la energía solar. Esta energía que penetra la atmósfera, es absorbida por el sistema y es transferida a los subsistemas, los cuales la transforman mediante diversos procesos. La cantidad de energía solar incidente depende de la hora del día y de la estación del año y, por lo tanto, no llega en la misma proporción a todos los puntos sobre la Tierra. Por esta razón, se realizan registros de datos atmosféricos de manera cotidiana en muchos lugares del planeta para hacer análisis estadísticos de los elementos del clima y conocer sus patrones de comportamiento a través del tiempo. El equilibrio del sistema climático trae como consecuencia: *El clima*.

Para poder determinar el clima de un sitio debemos considerar el “*tiempo atmosférico*”, llamado simplemente *tiempo*, que constantemente está cambiando de hora en hora o de un día a otro. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el *clima* puede definirse como el tiempo atmosférico promedio o, más rigurosamente, como la descripción estadística del tiempo en términos del promedio y la variabilidad de cantidades relevantes en un período de tiempo que puede ir de meses a millones de años (comúnmente se toma un período de 30 años, de acuerdo con la WMO). Dichas cantidades son variables superficiales tales como la temperatura, la precipitación y el viento (IPCC, 2001). Por su parte Peixoto y Oort (1992) definen el clima como el estado del sistema caracterizado por valores medios, extremos, medidas de dispersión y otras cantidades que caracterizan la estructura y comportamiento de la atmósfera, la hidrosfera y la criosfera sobre un período de tiempo. Estos elementos determinan el estado y dinámica del clima de la Tierra, aunque el clima puede ser estudiado de manera global o regional.

- ◆ **Clima Global.** Es el que describe el clima de todo el planeta con todas las variaciones regionales promediadas. Depende de la cantidad de energía solar entrante y de la cantidad de energía que queda en el sistema.

- ◆ **Clima Regional.** Es el que describe el clima de cierta extensión terrestre, tomando en cuenta su situación geográfica y relieve. Para regionalizar climáticamente un lugar se consideran los vientos dominantes en superficie, el régimen de lluvias, la oscilación anual de la temperatura, los climas dominantes por su humedad y los climas dominantes por su temperatura (Vidal, 2005).

1.2 La atmósfera y los elementos del clima

La atmósfera es la capa gaseosa que envuelve a la Tierra y en ella se llevan a cabo procesos dinámicos en un amplio rango de escalas que van desde la microscópica, de los procesos de evaporación y condensación, hasta los de gran escala, asociados con la circulación general de la atmósfera. Entre los procesos físicos que se dan en la atmósfera está incluida la transferencia de radiación solar hacia la superficie terrestre, así como procesos de dispersión y absorción de la energía que influyen sobre la variabilidad de la temperatura en el planeta. La atmósfera contiene partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire que están en continuo movimiento, transportándose y mezclándose mediante procesos advectivos, difusivos, convectivos y turbulentos. Los gases y partículas que se encuentran en la atmósfera varían en el tiempo y de un lugar a otro y, aunque algunos de ellos están presentes en pequeñas cantidades, influyen significativamente en el tiempo y el clima. El dióxido de carbono (CO_2), el ozono (O_3), el vapor de agua, los aerosoles y el metano (CH_4) son muy importantes en la actividad del *tiempo atmosférico*. Todos estos componentes intervienen en la transferencia radiativa. El CO_2 y el CH_4 están presentes en pequeñas cantidades y son eficientes absorbiendo la radiación emitida por la Tierra, modificando la temperatura a través del efecto invernadero (Sendiña y Perez, 2006).

Los *elementos climáticos*, entendidos como las condiciones o propiedades físicas de la atmósfera que se pueden medir y que se utilizan para describir el clima en un momento dado, se explican a continuación:

- ◆ **Radiación Solar.** Es el elemento básico. La energía solar absorbida por el suelo, los océanos y la atmósfera es la que dirige el sistema climático. El Sol suministra energía a la Tierra cediéndole parte de su masa mediante ondas radiantes de energía electromagnética. Esta energía está determinada por cuatro factores: la cantidad de energía que emite el Sol, la distancia Tierra-Sol, la latitud terrestre y la duración del día (Barry and Chorley, 2010). Debido a que la atmósfera y la superficie terrestre están continuamente absorbiendo y emitiendo energía, si consideramos períodos de tiempo muy largos la energía absorbida se iguala a la energía emitida, lo que provoca que la temperatura de la Tierra se mantenga en equilibrio a lo largo del tiempo. La naturaleza de la superficie terrestre, como los cuerpos de agua, la tierra, los bosques, etc., condiciona el balance de radiación solar debido a que cada tipo de superficie tiene un albedo¹ diferente y de esto también depende la temperatura alcanzada en un cierto lugar. A lo largo del año la máxima radiación se alcanza en el solsticio de verano (21-22 de junio) en el Hemisferio Norte.

1 Fracción de la radiación solar incidente que es reflejada por la superficie.

- ◆ **Temperatura.** En climatología la temperatura superficial se refiere a la temperatura del aire medida con un termómetro colocado a la sombra a una altura de entre 1.5 y 2 m. Para un sitio dado la temperatura depende de factores como la naturaleza de la superficie (tierra y agua), la cobertura de nubes, de la altura, de los vientos prevalecientes y de su lejanía o proximidad al mar (Stringer, 1972). En días despejados la temperatura máxima diaria no coincide con el momento de la máxima radiación, sino que la alcanza más tarde. La temperatura mínima se alcanza a la salida del Sol o un poco más tarde. Este retraso de temperaturas se debe al tiempo que se requiere para almacenar o perder calor. La temperatura máxima se alcanza en el momento en que el calor absorbido se iguala al calor perdido. Del mismo modo, cuando la cantidad de calor que se pierde supera la cantidad de calor que se absorbe, la superficie terrestre se enfría, hasta llegar a la mínima temperatura. En zonas continentales del Hemisferio Norte la temperatura máxima se alcanza generalmente en el mes de Agosto y la mínima en Enero.

- ◆ **Humedad.** Es la cantidad de agua en forma de vapor contenida en la atmósfera (Stringer, 1972). La cantidad de humedad depende de la temperatura. El aire caliente puede contener más humedad que el aire frío, lo que resulta en un aumento de la evaporación y una probabilidad más alta de nubosidad y precipitación. En regiones húmedas el rango de temperatura es más pequeño que en regiones áridas. En las zonas intertropicales el aire es cálido y húmedo, por tanto, contiene una gran cantidad de vapor de agua. Cerca de los polos, el aire es más seco y frío, por lo que el aire es menos húmedo. Los vientos ayudan a recoger humedad de los cuerpos de agua, por ejemplo, los *nortes*, que son vientos violentos que pasan sobre el Golfo de México durante la época más fría del año recogen abundante humedad que después es liberada en forma de lluvia.

- ◆ **Precipitación.** Las precipitaciones dependen de la humedad de la atmósfera. Cuando la temperatura aumenta, los cuerpos de agua comienzan a evaporar. El vapor se eleva hacia la atmósfera al mismo tiempo que disminuye su temperatura alcanzando su punto de saturación y el exceso de vapor de agua pasa de estado gaseoso a estado líquido condensándose en forma de nubes. Cuando la nube se enfría, precipita en forma de lluvia, nieve o granizo. Las precipitaciones ayudan a regular la temperatura para que no se eleve demasiado. Cuando la humedad del aire es baja, las precipitaciones escasean y la temperatura aumenta lo cual puede ocasionar veranos secos y cálidos. En la mayor parte de la República Mexicana la temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, excepto en una pequeña área del noroeste en donde predominan las lluvias de invierno (García E., 2003). Geográficamente, la lluvia aumenta de

norte a sur y está gobernada, en gran medida, por la proximidad al Océano Pacífico y al Golfo de México, a la orografía, a los rasgos de circulación atmosférica, así como a la conexión con el fenómeno de El Niño (Méndez, 2007). La región que abarca a la península de Baja California (B.C.), el noroeste de Sonora y el norte de Chihuahua es la que recibe menor precipitación durante el año, mientras que los estados cercanos a las costas del Golfo de México y Pacífico Sur, como Veracruz, Tabasco, Chiapas y parte de Hidalgo y Oaxaca, es donde más precipita (Méndez et. al., 2008).

- ◆ **Presión Atmosférica.** Es el peso de una columna de aire con área transversal unitaria que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta el límite exterior de la atmósfera. Es la suma del aire seco y la tensión del vapor de agua que contiene, y varía de un punto a otro de la atmósfera y en el transcurso del tiempo (Ayllon, 2003). La presión atmosférica no es uniforme en todo el planeta, sino que varía en función de la temperatura y altura del lugar. En regiones de altas temperaturas la presión es más baja, debido a que el aire que está sobre la superficie del suelo se calienta y al aumentar su temperatura se expande ocupando más espacio y ejerciendo menos presión.

- ◆ **Vientos.** Los vientos son masas de aire que se desplazan de un lugar a otro. Los desplazamientos están vinculados con las diferencias de presión debidas, en su mayor parte, a la diferencia de temperaturas. Cuanto mayor sea el gradiente de presión mayor será la intensidad del viento. La parte norte de México se encuentra dentro de la faja subtropical de alta presión, a lo largo de la cual se encuentran los anticiclones oceánicos del Atlántico y del Pacífico del norte, mientras que la parte sur está dentro de la zona de los vientos alisios (García, 1986), que soplan en dirección NE a SW en superficie. En la etapa más cálida del año, la zona subtropical de alta presión se desplaza hacia el norte y el país queda bajo la influencia de los vientos alisios, recogiendo humedad del Golfo de México (García, 1986).

- ◆ **Nubosidad:** Las nubes juegan un papel importante en el balance de la energía del planeta y en particular en el efecto invernadero natural. La nubosidad determina la cantidad de radiación solar que recibe la superficie terrestre y cuánta de la energía emitida por la superficie regresa al espacio (Stringer, 1972). Las nubes absorben y emiten radiación infrarroja y por lo tanto contribuyen al calentamiento de la superficie terrestre, igual que los gases de efecto invernadero. Por otra parte, la mayoría de las nubes reflejan la radiación solar y tienden a enfriar el sistema climático. Sin embargo, estos efectos son muy variables, dependiendo de la altura, el

tipo y propiedades ópticas de la nube. La presencia de nubes reduce las oscilaciones térmicas y el riesgo de heladas.

Todos estos elementos climáticos interactúan entre sí en la tropósfera, que es la capa de la atmósfera que está en contacto con la superficie de la Tierra, y en ella ocurren todos los fenómenos meteorológicos que influyen en los seres vivos.

1.3 Factores que determinan el clima de la Tierra

Los *factores climáticos* son los aspectos físicos, geográficos y biológicos que afectan a los elementos del clima en una región determinada (Lutgens, 2004). Entre los factores climáticos más relevantes podemos mencionar los siguientes:

- ◆ **Latitud.** Es el ángulo que se mide desde el ecuador hacia los polos (0° a 90°) en dirección norte o sur. Las temperaturas y las lluvias son mayores en latitudes bajas (cerca del ecuador) que en latitudes altas (cerca de los polos), debido a que cerca del ecuador la Tierra recibe mayor cantidad de radiación solar. Por esta razón, la temperatura aumenta en esa zona, haciendo que los cuerpos de agua se evaporen y formen nubes que precipitan. Latitudinalmente, casi la mitad de México se encuentra dentro de la zona intertropical y el resto en la parte extratropical, por esta razón la parte norte del país presenta temperaturas extremas a diferencia del centro donde las temperaturas son atenuadas por la altura o en el sureste donde son reguladas por la proximidad al mar.
- ◆ **Corrientes marinas.** En las capas superficiales, las corrientes marinas se forman por el esfuerzo que ejerce el viento sobre el mar. Las corrientes marinas desplazan las aguas cálidas hacia los polos y las aguas frías hacia el ecuador. Los vientos que soplan sobre estas corrientes aportan temperaturas cálidas o frías a las costas cercanas, lo que afecta el clima del lugar. La Corriente del Golfo, en el Atlántico, mantiene relativamente cálida la parte noroccidental de Europa en invierno. En México, la corriente fría de California y la cálida en el Golfo de México modifican el clima en los litorales del país.
- ◆ **Montañas y cordilleras (relieve).** Se forman por el desplazamiento de las placas terrestres. En general, el clima de montaña es frío y húmedo, debido a que la temperatura desciende con la

altura; sin embargo, la latitud es un factor que influye de manera importante en la temperatura y el régimen de lluvias de estos sitios. Por otra parte, las cadenas montañosas frenan los vientos impidiendo el paso de las masas de aire y de las nubes lo cual induce precipitaciones orográficas en la ladera costera (barlovento) y descenso de las precipitaciones en la ladera interior (sotavento), ya que la masa de aire desciende seca. Asimismo, la orientación del relieve con respecto al Sol provoca que haya mayor temperatura en la ladera que recibe mayor insolación. La disposición del relieve que bordea una meseta repercute con un descenso en las precipitaciones hacia el interior, por ejemplo, en la meseta del norte de México.

- ◆ **Altitud.** Es la altura vertical de un sitio con respecto al nivel medio del mar. A través de la troposfera la temperatura decrece con la altura, lo que se conoce como gradiente vertical de temperatura. La altitud es importante en el clima porque determina la división de las áreas cálidas, templadas y frías e influye en gran medida sobre el tipo de vegetación.
- ◆ **Distribución de tierras y aguas.** Los océanos tienen una fuerte influencia en la distribución de los climas. Los lugares más cercanos al mar presentan menor oscilación térmica y mayor humedad relativa en comparación con los ubicados en el interior del continente.

La interacción entre los elementos climáticos y la influencia de los factores del clima sobre ellos, es lo que define el clima de una región.

1.4 Variabilidad climática

La variabilidad climática es una de las características esenciales del comportamiento del sistema climático. Si se tiene una gráfica con una serie de valores promedio de cualquier variable climática, la variabilidad son las desviaciones que se encuentran hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la misma. Entre más grandes sean las desviaciones o anomalías, significa que los datos se alejan más de su comportamiento promedio y, por tanto, la variabilidad es mayor. En una gráfica de distribución de frecuencias, la variabilidad climática se refleja en las colas de la misma. La variabilidad puede evaluarse utilizando medidas de dispersión, como la desviación estandar y la varianza.

De acuerdo con el IPCC (2007), el concepto de variabilidad climática se refiere a las variaciones del estado medio y otras estadísticas del clima (como desviaciones típicas, ocurrencia de extremos, etc.)

en una amplia gama de escalas espaciales y temporales. La variabilidad puede deberse a procesos naturales internos del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa). La variabilidad climática se puede clasificar de tres formas:

- 1) Las variaciones que son directamente producidas por una fuerza externa puramente periódica, como el ciclo diario o estacional, y que son fáciles de predecir.
- 2) Las variaciones debidas a interacciones no-lineales de los retroalimentadores dentro del sistema climático. Por ejemplo, el retroalimentador hielo-albedo; si la temperatura desciende en el sistema, hará que la cantidad de hielo y nieve aumente, lo cual conducirá a un mayor enfriamiento debido a que el albedo se incrementa. Tales variaciones son difíciles de pronosticar (IPCC, 2001).
- 3) Las variaciones asociadas con fluctuaciones aleatorias de los factores físicos o químicos, las cuales son difíciles de predecir en cualquier escala de tiempo.

1.5 Temperatura del aire y gradiente térmico

1.5.1 La temperatura del aire

La temperatura es una cantidad física escalar que indica qué tan caliente o frío es un objeto con respecto a una medida estándar (Lutgens, 2004). También puede definirse como la energía cinética promedio de los átomos o moléculas en una sustancia. Cuando una sustancia gana (pierde) energía, sus partículas se mueven más rápido (lento) y su temperatura aumenta (disminuye). En particular, la temperatura del aire es una medida de que tan caliente o frío se encuentra y es el parámetro meteorológico que más comúnmente se mide.

La temperatura del aire varía en diferentes escalas de tiempo, como por ejemplo, estacional, diaria u horaria. Los datos de temperatura son registrados diariamente a través de miles de estaciones meteorológicas distribuidas alrededor del mundo y pueden ser registradas por un observador o por sistemas automatizados de observación que monitorean la atmósfera continuamente (WMO, 2006).

Para propósitos meteorológicos, la temperatura del aire debe medirse con un termómetro colocado en un sitio protegido de la radiación solar directa y de la lluvia, permitiendo la libre circulación del aire alrededor de él. La estación de observación debe colocarse en una área tan libre como sea posible, lejos de construcciones, árboles u otros obstáculos, a una altura de entre 1.5 y 2 metros sobre el nivel del terreno. A estas alturas el gradiente vertical de la temperatura es pequeño. Para mediciones de temperatura obtenidas de estaciones colocadas en grandes ciudades o zonas boscosas, debe considerarse que el gradiente vertical puede verse modificado por las características ambientales de estos sitios.

En México existen más de 5,000 estaciones meteorológicas operadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que registran la temperatura a lo largo del día. Estos registros son útiles para hacer análisis en distintas escalas de tiempo, como diarias, mensuales o anuales, y para realizar análisis de tendencias si se han tomado durante un período largo de tiempo. A continuación se presentan algunas definiciones útiles.

- **Temperatura Máxima.** Es la temperatura más alta que alcanza el aire en un lugar determinado durante un día (máxima diaria, que se presenta generalmente entre las 14:00 y las 16:00 hrs) (CONAGUA, 2011), un mes (máxima mensual) o un año (máxima anual). *También puede referirse a la temperatura máxima registrada en un lugar en un cierto período de tiempo (máxima absoluta), la cual depende de diversos factores como la insolación, la continentalidad, la humedad y los vientos, entre otros factores.*
- **Temperatura Mínima.** Es la temperatura más baja que alcanza el aire en un lugar determinado durante un día (mínima diaria, que se presenta generalmente entre las 6:00 y las 8:00 horas) (CONAGUA, 2011), un mes (mínima mensual) o un año (mínima anual). La temperatura mínima absoluta es la temperatura mínima registrada en un lugar considerando un período de tiempo largo.
- **Temperatura promedio diaria.** Se puede determinar promediando los registros de las 24 horas o, más comúnmente, promediando las temperaturas máxima y mínima diarias.
- **Amplitud de la temperatura diaria.** Es la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima de cada día.
- **Temperatura media mensual.** Se calcula sumando las temperaturas promedio diarias y dividiendo entre el total de días del mes.
- **Temperatura media anual.** Es el promedio de los 12 promedios mensuales.
- **Amplitud de la temperatura anual.** Es la diferencia entre las temperaturas medias del mes más cálido y del mes más frío.

1.5.2 El gradiente térmico

En la atmósfera baja (troposfera) la temperatura disminuye conforme la altitud aumenta, aunque la tasa de decrecimiento depende de factores geográficos y de las condiciones meteorológicas (Fig. 1.1). El enfriamiento del aire con la altura en la troposfera es debido a que la superficie de la Tierra es como una fuente de energía, que hace que una parcela de aire que está cerca de su superficie sea más caliente que una que está más alejada.

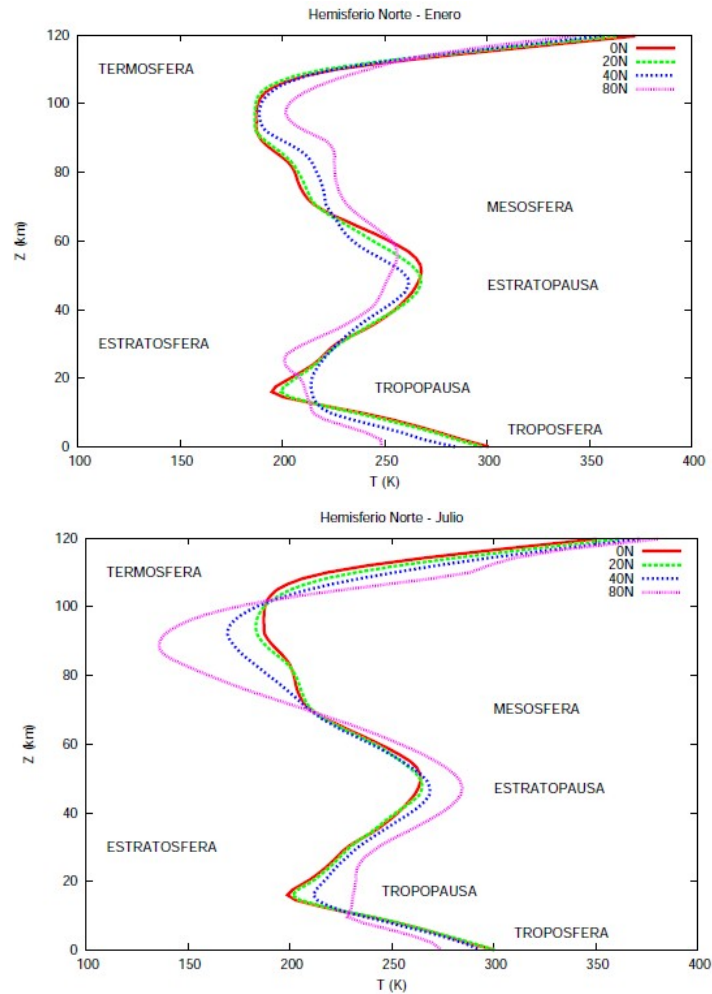


Figura 1.1: Perfiles verticales de temperatura en la atmósfera para distintas latitudes del Hemisferio Norte, durante Enero (arriba) y Julio (abajo)².

² <http://fisica.ehu.es/jsaenz/meteoclima>

Otra forma de cambiar la temperatura de la parcela de aire es mediante un proceso adiabático, esto es, sin que ocurra un intercambio de calor con los alrededores conforme la parcela asciende o desciende. Si se considera una parcela de aire que asciende a través de la troposfera y que no intercambia energía con sus alrededores, la parcela aumentará su volumen (expansión) a medida que asciende debido a que la presión también disminuye con la altura; en este caso, la parcela ejerce trabajo sobre sus alrededores³. Cuando se expande, las moléculas de aire dentro de ella se separan y colisionan con menos frecuencia y menos velocidad, causando que la temperatura de la parcela disminuya. Matemáticamente, el gradiente vertical de temperatura se expresa como:

$$\gamma = -\frac{dT}{dz}$$

donde γ es el gradiente de temperatura en unidades de [T/L], T es la temperatura y z la altitud. En una atmósfera estándar, estacionaria y sin contenido de humedad, se considera una tasa de cambio promedio o *gradiente ambiental de temperatura* (environmental lapse rate) de aproximadamente 6.5°C/1,000 m.

La velocidad a la que el aire se calienta o enfría depende de que tan húmedo esté. Si el aire está seco, la tasa de cambio de la temperatura con la altura es de aproximadamente 10°C/1,000 m y es llamada *tasa adiabática seca* (DAR, por sus siglas en inglés). Si el aire está saturado, la tasa de cambio varía fuertemente con la temperatura. Un valor típico es de alrededor de 5°C/1,000 m y es llamada *tasa adiabática húmeda* (SAR, por sus siglas en inglés), la cual varía según la saturación del aire. La diferencia entre las tasas SAR y DAR es la liberación de calor latente como resultado de la condensación. Conforme el aire saturado sube y se enfría, se da la condensación y se libera energía en forma de calor latente. Este calor se transfiere a otras moléculas de aire dentro de la misma parcela causando una disminución en la tasa de enfriamiento⁴.

3 http://www4.uwsp.edu/geO/faculty/ritter/geog101/textbook/atmospheric_moisture/lapse_rates_1.html

4 Idem

Capítulo 2

EL CLIMA DE MÉXICO

Describir y clasificar el clima de un sitio no es sencillo debido a que cada región posee factores climáticos que lo alteran, además de los fenómenos meteorológicos. El ruso-alemán Wladimir Peter Köppen fue quien clasificó el clima a nivel mundial hace más de un siglo, basándose en la idea de que la vegetación nativa es la mejor expresión del clima de una región, y su sistema sigue siendo el más utilizado en nuestros días⁵. A continuación se presenta, de forma muy general, la clasificación climática de Köppen, la cual fue modificada posteriormente para describir mejor los climas de México.

2.1 Clasificación climática de Köppen

En 1900, Köppen clasificó el clima del mundo utilizando una serie de letras mayúsculas y minúsculas para representar distintos intervalos de variación relacionados con las temperaturas medias anuales de cada lugar (WMO, 2012). Köppen estableció cinco zonas fundamentales del clima (A, B, C, D y E),

⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Köppen_climate_classification

cada una con características especiales de temperatura y humedad, como se muestra en las Tablas 2.1 y 2.2. Las letras mayúsculas que representan a los climas A, C, D y E pueden ir acompañadas por una letra minúscula (*f*, *m*, *s* ó *w*) que hace referencia al régimen de precipitación (ver Tablas 2.3 y 2.4). Los climas B (secos) se refieren a los lugares donde la evaporación excede a la precipitación y se dividen en dos tipos, donde la segunda letra indica el grado de aridez: BS (clima semidesértico o estepario), que representa regiones cuya temporada de lluvias es muy corta, y BW (clima desértico), que representa regiones climáticas casi sin lluvia (Ayllón, 2003). En particular, se asigna la letra *h* si la temperatura media anual es mayor o igual a 18°C ó *k* si la temperatura media anual es menor a 18°C.

GRUPO	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL Mes más cálido / Mes más frío (°C)	REGIMEN CLIMÁTICO
A	Mayor o igual a 18 / Mayor o igual a 18	Tropical lluvioso
C	Mayor a 10 / Entre 0 y 18	Templado lluvioso
D	Mayor a 10 / Menor a 0	Frío lluvioso
E	Menor a 10 / Menor a 10	Polar

Tabla 2.1: Grupos climáticos según la clasificación de Köppen (Ayllón, 2003).

Grupo B	Régimen climático
BS (Semiárido/estepario)	BSh semiárido cálido BSk semiárido frío
BW (Árido/desértico)	BWh árido cálido BWk árido frío

Tabla 2.2: Clasificación de los climas secos (Grupo B). Las letras S y W se refieren al grado de aridez y la tercera letra (h ó k) está relacionada con la temperatura.

LETRA	DESCRIPCIÓN
f	Lluvias todo el año.
w	Lluvias abundantes en verano, sequía invernal.
m	Lluvias monzónicas.
s	Lluvias en invierno, sequía veraniega.

Tabla 2.3: Subgrupos de la clasificación climática de Köppen que sintetizan el régimen de lluvias.

GRUPO CLIMÁTICO	SÍMBOLO	TIPO DE CLIMA	REGIÓN NATURAL
A	Af	Cálido con lluvias todo el año	Selva o bosque tropical
	Am	Cálido con lluvias de monzón	
	Aw	Cálido con lluvias en verano	Sabana
B	BS	Seco estepario	Estepa
	BW	Seco desértico	Desierto
C	Cf	Templado con lluvias todo el año	Bosque mixto
	Cw	Templado con lluvias en verano	Pradera
	Cs	Templado con lluvias en invierno	Bosque mediterráneo
D	Df	Frío con lluvias todo el año	Bosque de coníferas
	Dw	Frío con lluvias en verano	
E	ET	Polar de tundra	Tundra
	EF	Polar de hielos perpetuos	Hielos perpetuos
	EB	Polar de alta montaña	

Tabla 2.4: Sistema de clasificación climática de Köppen.

Como consecuencia de esta clasificación Köppen obtuvo una superficie climática mundial, considerando las coordenadas de latitud y longitud pero no la altitud. La figura 2.1.1 muestra un recorte para México del mapa mundial actualizado de los climas de Köppen-Geiger⁶, en donde podemos observar grandes zonas con un clima homogéneo según el color. Sin embargo, en la realidad, dentro de esas áreas extensas existen zonas con grandes diferencias climáticas debidas a las variaciones en la altitud.

⁶ http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificación_climática_de_Köppen

Por tal razón, la clasificación de Köppen fue modificada y adaptada para México, agregando otras subdivisiones en los regímenes de lluvia (García, 1988) (ver la Fig. 2.2.1 en la siguiente sección).

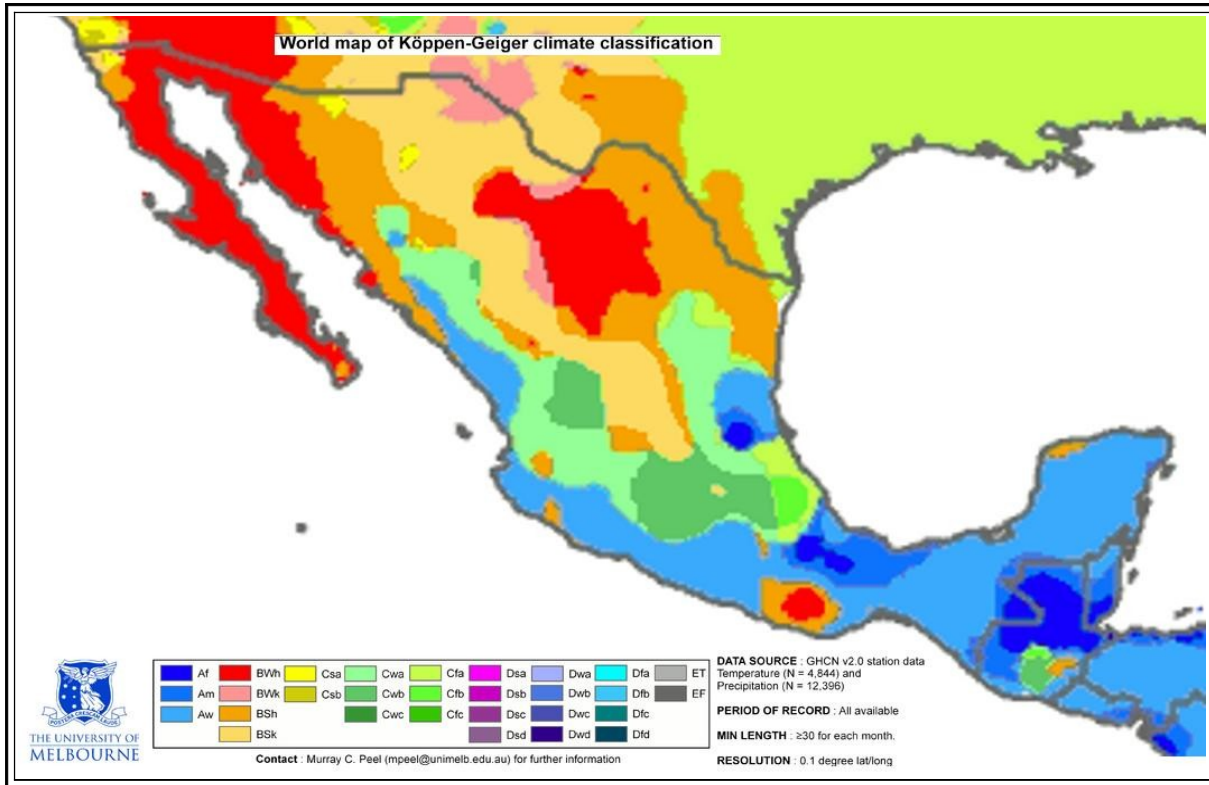


Figura 2.1.1: Recorte para México de la superficie climática mundial de Köppen-Geiger⁷ para el periodo 1951-2000 (http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificación_climática_de_Köppen).

2.2 Clasificación climática para México

La República Mexicana se localiza en el hemisferio Norte con respecto al Ecuador y en el hemisferio Occidental con respecto al meridiano de Greenwich. Se encuentra entre los paralelos 14° 33' N y 32° 43' N y entre los meridianos 86° 46' W y 118° 20' W. Al norte colinda con los Estados Unidos de América, al sureste con Belice y Guatemala, al oriente con el Golfo de México y el mar Caribe y al poniente con el océano Pacífico. Cuenta con una superficie cercana a los 2 millones de km², un relieve muy accidentado y con múltiples volcanes. El trópico de Cáncer divide al país en una zona tropical y una templada, pero el relieve y los océanos que lo rodean influyen enormemente en su climatología. Así,

⁷ Geiger fue uno de los alumnos de Köppen que le ayudó a revisar la clasificación climática.

encontramos desde climas fríos como en las altas montañas hasta climas calurosos como en las llanuras costeras.

Dada su ubicación geográfica, México se ve afectado por sistemas meteorológicos de latitudes medias durante el invierno y por sistemas tropicales en verano, cuando ocurren las lluvias más intensas. El invierno se caracteriza por ser seco en la mayor parte del país, excepto en el noroeste y en la vertiente del Golfo de México, y es la temporada en que se registran las temperaturas más bajas, principalmente en la región norte y en las zonas montañosas. Los veranos son extremos en las zonas semiáridas, en donde se registran temperaturas superiores a los 40 °C (Magaña, 1999).

México cuenta principalmente con climas de tipo A, B y C, los climas D no existen y los climas E existen sólo en montañas a una altitud superior a los 4,000 m (Fig. 2.2.1). A continuación se presenta un resumen de la modificación a la clasificación climática de Köppen para México, considerando el período de 1921 a 1980 (García, 1988).

- ◆ **Climas A (tropicales lluviosos):** Presentan una temperatura media del mes más frío de 18°C. Este clima se extiende a lo largo de las vertientes mexicanas de ambos mares. En la vertiente del Pacífico, se extiende desde el paralelo 24° N hacia el sur y desde el nivel del mar hasta una altitud de 800 a 1,000 m. Por el lado del Golfo de México se extiende desde el paralelo 23° N hacia el sur a lo largo de la llanura costera y la base de los declives correspondientes de la Sierra Madre Oriental y de las montañas del norte de Chiapas. También se encuentra en la Península de Yucatán y algunas zonas interiores como la Cuenca del Balsas y la Depresión Central de Chiapas, abarcando desde el nivel del mar hasta alturas de 1,300 m.

- ◆ **Climas B (secos):** En la mitad septentrional, existen amplias regiones con climas desérticos BW o BS. Los climas BW se localizan en la parte norte de la Altiplanicie Mexicana a altitudes menores a 1,500 m, así como en la porción de la llanura costera del Pacífico situada al norte del paralelo 25° N y en las zonas litorales de la Península de Baja California, exceptuando el extremo noroeste de la misma donde el clima es BS. Los climas BS se encuentran rodeando los climas BW en la parte norte de la altiplanicie, así como en los declives de la Sierra Madre Occidental; también se observan en algunas partes del centro y sur del país que se encuentran menos expuestas a la influencia de los vientos húmedos del mar.

- ◆ **Climas C (templados lluviosos):** Este clima se localiza en las zonas montañosas o llanuras de altitud mayor a 800 o 1,000 m.

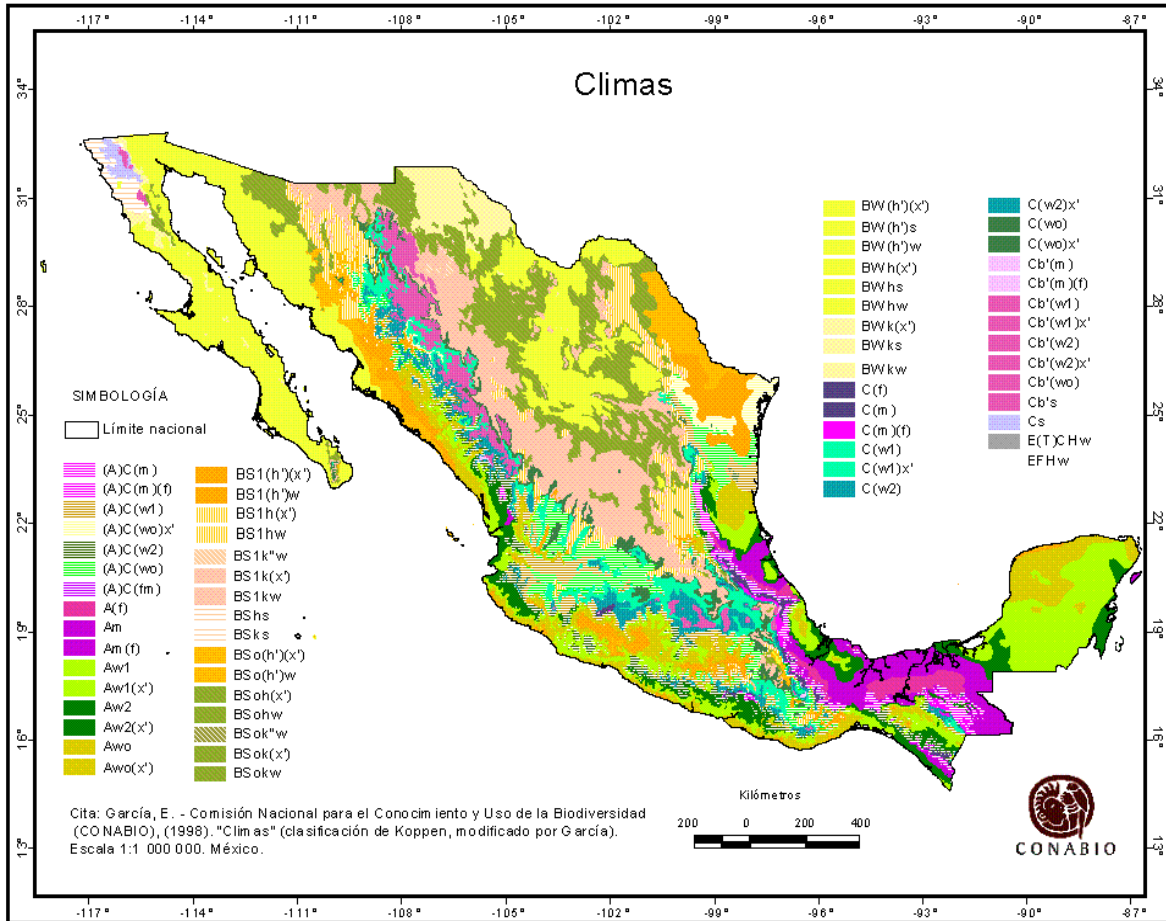


Figura 2.2.1: Clasificación climática de Köppen modificada y adaptada para México (García, 1988).

Para conocer con detalle todas las modificaciones hechas a la clasificación climática de México se recomienda consultar García (1988). Como se mencionó antes, las clasificaciones hechas fueron el resultado de aplicar ecuaciones empíricas que involucran las variables climáticas de temperatura y precipitación, por lo tanto, la superficie climática obtenida también es empírica. En nuestro caso de estudio, se construyeron superficies de las temperaturas máximas y mínimas diarias para México mediante un algoritmo de interpolación y tomando en cuenta la topografía del país.

2.3 Factores que afectan el clima de México

2.3.1 *Relieve, latitud, altitud, tierra y mares*

a) **Relieve**

Entre los rasgos fisiográficos de México destaca la enorme altiplanicie mexicana, que abarca gran parte de las regiones áridas y semiáridas de la zona norte (meseta del Norte) y centro (meseta Central) del país (Fig. 2.3.1). La altiplanicie se encuentra limitada al poniente por la Sierra Madre Occidental, que se extiende de noroeste a sureste desde la frontera norte del país hasta el paralelo 20° N y se inclina hacia las llanuras costeras del Golfo de California y el Océano Pacífico. Del lado del Golfo de México, la altiplanicie se encuentra limitada por la Sierra Madre Oriental que corre de norte a sur a lo largo de la costa y se cruza con la Sierra Madre Occidental en el Nudo Mixteco al sur del país, cerca del Istmo de Tehuantepec. Entre los 19° y 20° N, en el extremo sur de la altiplanicie, se encuentra el eje volcánico transversal o Eje Neovolcánico, cordillera que comprende las elevaciones más importantes del territorio mexicano (Fig. 2.3.2). Baja California está situada al noroeste del país en una península larga y angosta que va de noroeste a sureste; está separada del continente por el Golfo de California y sobre ella existen una serie de sierras. En los 15° N se encuentra la Sierra Madre de Chiapas, al norte de la cual se encuentra la Depresión Central, la Meseta Central, las montañas del Norte y la llanura Tabasqueña (García E., 1986). Por otra parte, los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo no sobrepasan los 310 metros sobre el nivel del mar.

b) **Latitud y altitud**

A escala mundial existe un gradiente térmico latitudinal, de tal forma que alrededor del Ecuador existe una franja de climas cálidos, rodeada de climas templados de latitudes medias en ambos hemisferios y estas a su vez por franjas de climas fríos (INEGI, 1997). Las franjas son irregulares debido a la desigual distribución de los océanos, tierra continental, corrientes marinas y la circulación general de la atmósfera. Por su latitud, la mayor parte del país se encuentra en la zona intertropical, pero lo que hace que las temperaturas no sean tan elevadas es debido a la altitud o elevación sobre el nivel del mar.

c) **Tierra y mares**

Los cuerpos de agua que rodean a México contribuyen a regular la temperatura en las costas, evitando

que se eleven. El Océano Pacífico y el Golfo de California influyen en el clima de las costas de Baja California, donde las temperaturas son más bajas que en el interior. La corriente de California ayuda a estabilizar los vientos e inhibe la precipitación en verano. Por otro lado, las aguas del Golfo de México influyen en la atenuación de las temperaturas de la región oriental del país y la península de Yucatán. El Golfo de México es un gran proveedor de humedad que contribuye a tener grandes precipitaciones en las laderas montañosas (García, 1988).

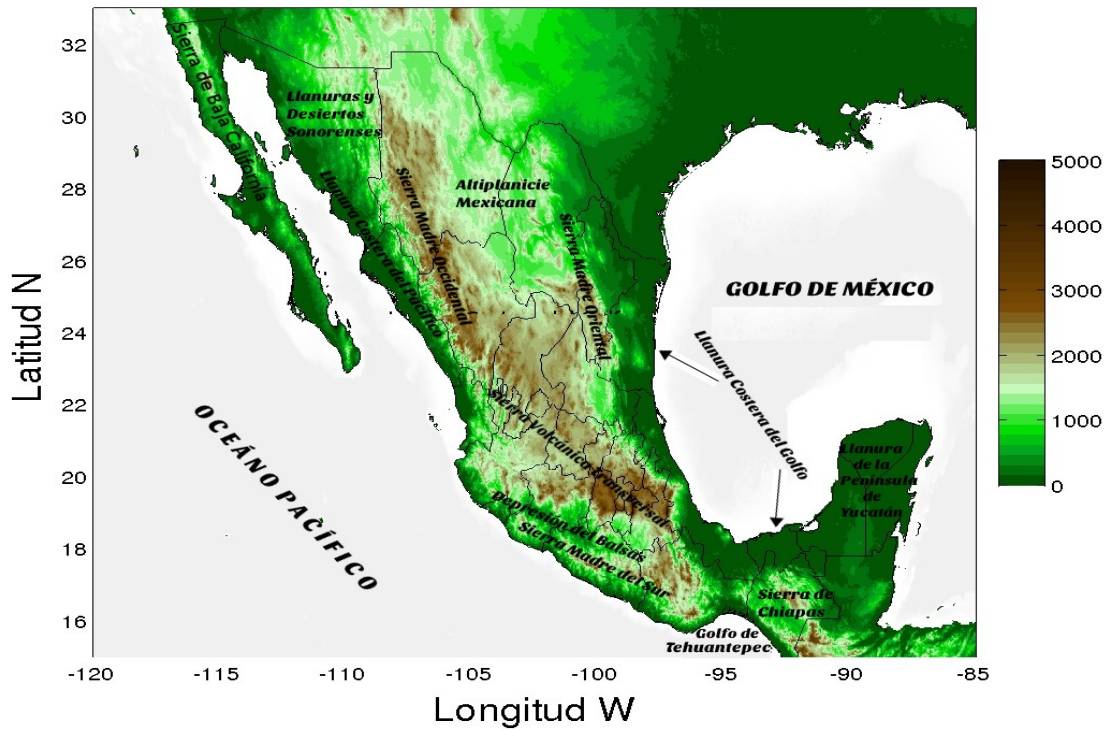


Figura 2.3.1: Mapa del relieve de la República Mexicana.

2.3.2 Sistemas meteorológicos

Varios sistemas meteorológicos influyen en el clima del país, como las tormentas tropicales en verano y otoño y los frentes fríos en invierno y primavera. Dinámicamente, una atmósfera subtropical presenta interacciones entre trópicos y extra-trópicos que determinan cambios en el tiempo atmosférico (Magaña, 1999). En el período de invierno se presentan frentes fríos en latitudes medias que afectan el norte del país y en ocasiones se propagan hacia el sur, mientras que durante el verano la dinámica de la atmósfera es afectada por la presencia de la Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC) en el Pacífico oriental. La posición, intensidad y densidad de la convección profunda de esta región puede resultar en períodos de fuertes lluvias o sequías severas en nuestro país (Magaña, 1999).

En años neutros (no influenciados por condiciones del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur) el clima del país está, en parte, modulado por los frentes fríos y lluvias invernales que afectan principalmente los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas. Cuando los frentes fríos alcanzan latitudes bajas, pueden producir vientos intensos que soplan de norte a sur sobre la vertiente del Golfo de México y la península de Yucatán, ocasionando lo que se conoce como “norte” (Magaña et. al., 1999a). Los *nortes* causan descensos de temperatura que van desde los 2° hasta los 15°C en 24 horas, nubosidad baja y algunas veces precipitación, principalmente en las cordilleras de México y Centroamérica. Otro fenómeno importante que afecta el clima de México son los huracanes ya que se encuentra ubicado en medio de dos regiones ciclogénicas muy activas: el Pacífico tropical nororiental y el mar Caribe. Los huracanes son esenciales en la época de lluvias (Mayo-Septiembre) porque favorecen la agricultura, la ganadería y la acumulación de agua en las presas. Cabe mencionar que la ocurrencia de tormentas tropicales y huracanes muestra una gran variabilidad interanual.

Durante los meses más calientes del año, la zona subtropical de alta presión se desplaza hacia el norte, por lo que los vientos alisios aumentan su intensidad y pasan sobre el Golfo de México recogiendo humedad. Estos vientos, al llegar a la Sierra Madre Oriental, producen abundantes lluvias de relieve en verano y parte del otoño (Ayllon, 2003). Los vientos alisios al encontrarse con las laderas montañosas, se ven obligados a ascender, se enfrían adiabáticamente y depositan su humedad en forma de lluvia, que es más abundante en verano debido a las perturbaciones ciclónicas. En la mitad fría del año, la zona subtropical de alta presión y la zona de influencia de los alisios se desplazan hacia el sur, dominando los vientos del oeste en la parte norte del país. Las cadenas montañosas que rodean la Altiplanicie Mexicana interceptan estos vientos, que son menos húmedos, y hacen que los inviernos sean más secos (García, 1988).

Capítulo 3

EVENTOS EXTREMOS

Existen diversos eventos climáticos extremos que afectan de manera muy importante las actividades cotidianas de la población y pueden ocasionar cuantiosas pérdidas materiales y humanas. Entre ellos podemos mencionar a las ondas de calor y ondas gélidas, las lluvias torrenciales y las sequías. El estudio de este tipo de eventos es sin duda de gran importancia y su pronóstico en el corto y largo plazos ha cobrado gran interés, sobre todo en relación a las condiciones asociadas con un posible cambio climático. Sin embargo, el análisis de eventos extremos es difícil, particularmente en México, debido a que su definición tiene una dependencia regional y no se cuenta con datos de calidad suficientes para estimar su significancia estadística, sus períodos de retorno, sus tendencias, etc. A continuación se presentan algunos conceptos y definiciones que se utilizaron en el análisis de los eventos extremos de temperatura en este trabajo.

3.1 Fenómeno meteorológico extremo

El *Panel Intergubernamental de Cambio Climático* (IPCC, 2001) define un fenómeno meteorológico extremo como un evento que es *raro*, en un lugar determinado, dentro de su distribución estadística de referencia. Aunque las definiciones de *raro* varían, un evento meteorológico extremo será generalmente tan raro o mayor (menor) que el percentil 90° (10°) de la función de densidad de probabilidad observada. Por definición, las características de un evento extremo pueden variar de un lugar a otro. Cuando una actividad atmosférica extrema persiste durante cierto tiempo (por ejemplo, durante una

estación), puede clasificarse como episodio climático extremo, especialmente si arroja un promedio o un total que es en sí mismo un valor extremo (por ejemplo, sequías o precipitaciones intensas a lo largo de una temporada).

Los siguientes criterios sirven para determinar cuándo un evento es extremo:

- ✓ **Rareza:** eventos que ocurren con muy poca frecuencia.
- ✓ **Intensidad:** eventos caracterizados por sus valores relativamente pequeños o grandes, es decir, los eventos que tienen una magnitud fuera de lo normal.
- ✓ **Impacto:** se refiere a eventos que resultan en pérdidas tanto para el medio ambiente como en el sector socio-económico, en términos de costos, daños y pérdida de vidas humanas (Beniston y Stephenson, 2004).

3.2 Cambios en los eventos extremos de temperatura

La frecuencia de los eventos extremos puede alterarse debido a cambios en la ubicación, escala y forma de la distribución de probabilidad de alguna variable como la temperatura, los cuales conducen a cambios grandes en las colas de la distribución. En la figura 3.2.1 se muestran tres casos posibles al ocurrir un cambio en el clima (López, 2009). La figura 3.2.1a representa un incremento en el promedio de la distribución de temperatura, lo que implicaría un ambiente más cálido con un ligero incremento en la frecuencia de eventos extremos cálidos y una disminución en la frecuencia de eventos extremos fríos. Pero un cambio en el promedio no significa un cambio en la variabilidad, en este caso el rango entre las temperaturas más altas y más bajas no cambia. Un incremento en la variabilidad (o varianza de la distribución), sin un cambio en el promedio, implicaría un ambiente más extremo, con un incremento en la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos tanto fríos como calientes (Fig. 3.2.1b). Un incremento tanto en el promedio como en la varianza de la distribución de temperatura implicaría un ambiente mucho más cálido, con un aumento significativo en la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos cálidos y una disminución en la ocurrencia de eventos fríos (Fig. 3.2.1c).

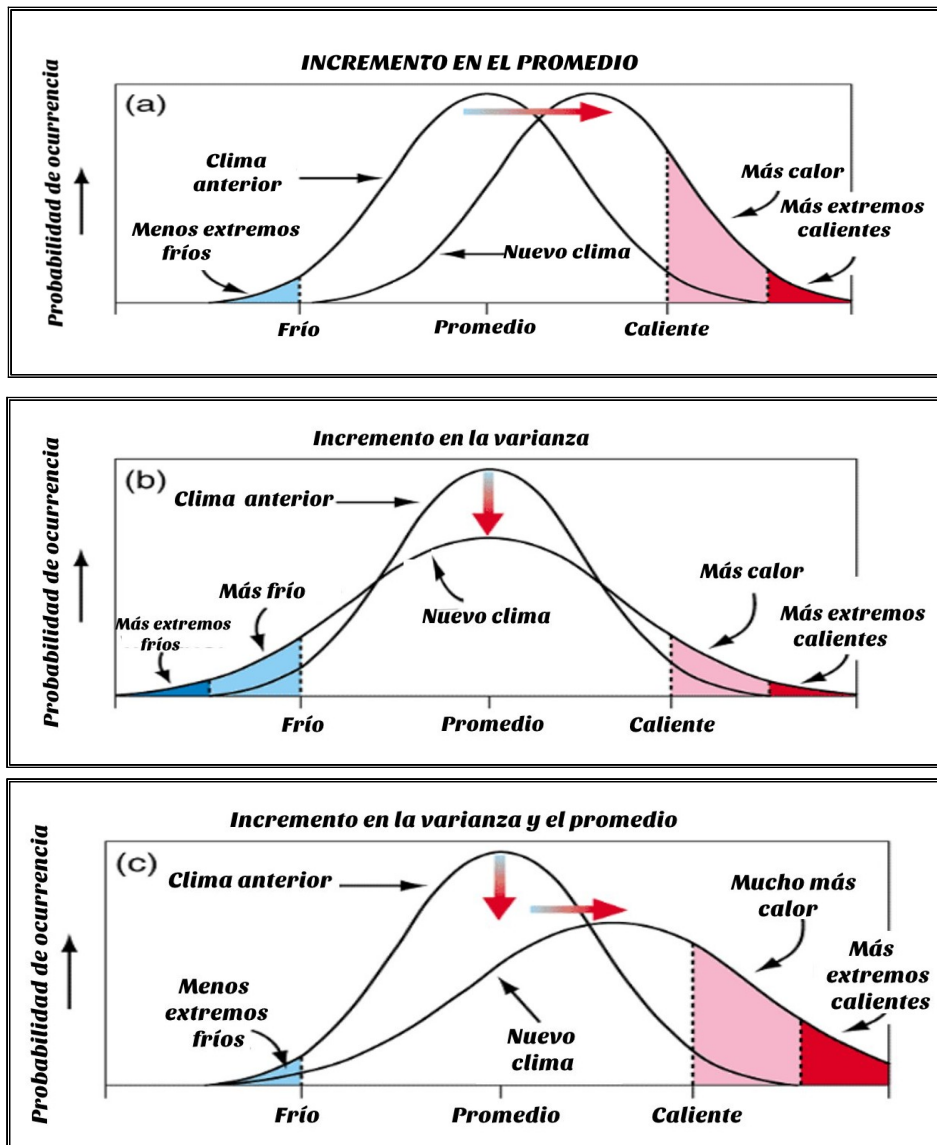


Figura 3.2.1: Efecto de los cambios en el promedio y varianza de la distribución de la temperatura sobre los valores extremos (tomada de Stephenson 2010).

3.3 Índices de eventos extremos

Con la finalidad de investigar si el clima estaba cambiando o no, se desarrollaron técnicas para analizar los eventos extremos y su variabilidad. El programa de investigación sobre Variabilidad y Predictibilidad del Clima (CLIVAR, por sus siglas en inglés) coordinó los estudios para establecer diversos índices de climas extremos, los cuales deben ser estadísticamente robustos (Frich et al., 2002).

Tales índices están basados en variables climáticas como la temperatura y la precipitación y las series de tiempo que son útiles para estimar sus valores deben ser de datos diarios y de período largo. El Equipo de Expertos en Índices y Detección de Cambio Climático (Expert Team on Climate Change Detection and Indices ETCCDI), respaldado por la Comisión Climatológica (CCI) de la OMM y el proyecto CLIVAR, definió 27 índices base para la temperatura y la precipitación. Los índices relacionados con la temperatura se pueden clasificar de la siguiente manera (López, 2009):

- ◆ **Índices basados en percentiles:** determinan los extremos de una distribución para un período de referencia. Por ejemplo, el percentil 10 o el 90 para las temperaturas máximas y mínimas.
- ◆ **Índices absolutos:** Son los valores máximos o mínimos en una temporada o año.
- ◆ **Índices basados en umbrales:** Es el número de días en que la temperatura cae por encima o por debajo de un umbral fijo. El umbral fijo depende de la región de estudio.
- ◆ **Índices de duración:** Definen períodos de calor o frío excesivo.
- ◆ **Otros índices:** Relacionados con impactos sociales significativos. Utilizan una combinación de las variables, como el rango diurno que es la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima diaria.

En esta tesis se realizó un análisis muy sencillo de eventos extremos de temperaturas máximas y mínimas para el período 1979-2009, mediante el cálculo de los índices que se enlistan en la tabla 3.1. Los resultados se presentan en el capítulo 7.

ÍNDICE	DEFINICIÓN
TN10p: noches frías	Porcentaje de días cuando TMin < 10° percentil
TX90p: días cálidos	Porcentaje de días cuando TMax > 90° percentil

Tabla 3.1: Índices basados en percentiles relacionados con la temperatura.

Para analizar los eventos extremos de las tempearturas máximas y mínimas, se tomaron en cuenta las siguientes definiciones (basadas en Zhang et al., 2007):

- Los *eventos calientes* son definidos como los días cuya temperatura máxima excede el percentil 90 durante un cierto intervalo de tiempo. Dicho intervalo puede ser una estación del año, por ejemplo, la temperatura máxima diaria en Junio, Julio y Agosto.
- La *frecuencia de eventos calientes* es el número de días cuya temperatura máxima diaria excede

el percentil 90.

- La *intensidad del calor* es el promedio de las temperaturas máximas diarias que exceden un cierto percentil umbral (90 en nuestro caso).
- Los *eventos fríos* son definidos como los días cuya temperatura mínima cae por debajo del 10° percentil durante un cierto intervalo de tiempo.
- La *frecuencia de eventos fríos* es el número de días cuya temperatura mínima diaria cae por debajo del percentil 10 durante un cierto intervalo de tiempo.
- La *intensidad del frío* es el promedio de las temperaturas mínimas diarias que caen debajo de un cierto percentil umbral (10 en nuestro caso).

Capítulo 4

EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR

En este capítulo se presenta una descripción general del fenómeno conocido como El Niño-Oscilación del Sur, sus características y los impactos que produce sobre el clima de México.

4.1 Definición

Uno de los procesos más importantes de interacción entre las capas superficiales del océano y la atmósfera se conoce como fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS o ENSO por sus siglas en inglés). El ciclo ENOS consiste de una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), que se manifiesta por el calentamiento o enfriamiento anormal de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Océano Pacífico ecuatorial central y oriental. Las variaciones de la TSM llegan a las costas del norte y sur de América y ocasionan alteraciones en los patrones climáticos. Hasta ahora se desconocen las causas precisas que originan un evento de esta naturaleza, pero sí se han detectado signos que lo identifican en sus componentes oceánica y atmosférica⁸. El Niño se refiere a la componente oceánica del sistema, la cual está asociada con un calentamiento anormal de las aguas superficiales costeras de Ecuador, Perú y Chile que va acompañado de un aumento considerable de las precipitaciones. La Oscilación del Sur se refiere a la componente atmosférica, la cual está asociada con

8 <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>

fluctuaciones de la presión atmosférica sobre las aguas del Pacífico tropical oriental y occidental. Cada episodio del fenómeno ENOS es diferente y único en su inicio, evolución e intensidad, pero su ciclo de vida es aproximadamente el mismo cada vez, lo que permite identificarlo (OMM, 1999). Este fenómeno está asociado con la variabilidad climática en gran parte del planeta, pudiendo causar condiciones extremas en muchas regiones del mundo. Cada ciclo del ENSO ocurre aproximadamente entre tres y siete años.

4.2 Desarrollo del fenómeno ENOS

La fase cálida del fenómeno ENOS, también conocida como El Niño, inicia cuando los vientos alisios, que forman parte de la circulación de Walker, se debilitan durante varios meses provocando que el agua cálida de las costas de Asia se desplace hacia el oriente hasta Sudamérica por medio de ondas de Kelvin⁹. El Niño se manifiesta en el Pacífico ecuatorial por medio del incremento en la anomalía de la temperatura del agua submarina entre los 50 y 350 metros de profundidad, la cual llega a cubrir la mayor parte del océano Pacífico tropical, desde aproximadamente 120° E hasta 80° W, como se muestra en los esquemas de la figura 4.2.1¹⁰. El desplazamiento hacia el Este del agua anómalamente cálida mueve consigo el centro de convección que acompaña a las precipitaciones, produciendo inundaciones en Perú y sequías en Indonesia y Australia¹¹. Asimismo, el debilitamiento de los vientos alisios suprime el afloramiento de la termoclina y del agua fría rica en nutrientes en el Pacífico tropical oriental (Fig. 4.2.1b), causando importantes daños con la disminución de la pesca de Perú y Ecuador, principalmente. Durante eventos de El Niño, el número de ciclones tropicales y huracanes muestra un incremento en el Pacífico oriental y una disminución en el Golfo de México y el Mar Caribe.

Por el contrario, la fase fría del fenómeno ENOS, conocida como La Niña, se caracteriza por temperaturas superficiales del mar inusualmente frías en el Pacífico ecuatorial (Fig. 4.2.1c). La señal del agua fría se extiende hacia el oeste más de lo que se observa usualmente en la “lengua de agua fría”. En general, los impactos sobre el clima global producidos por La Niña tienden a ser opuestos a los observados durante El Niño. En latitudes altas los impactos de estos eventos son más claramente observados durante el invierno.

9 <http://www.elnino.noaa.gov/>

10 http://en.wikipedia.org/wiki/El_Niño-Southern_Oscillation

11 <http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/el-nino-story.html>

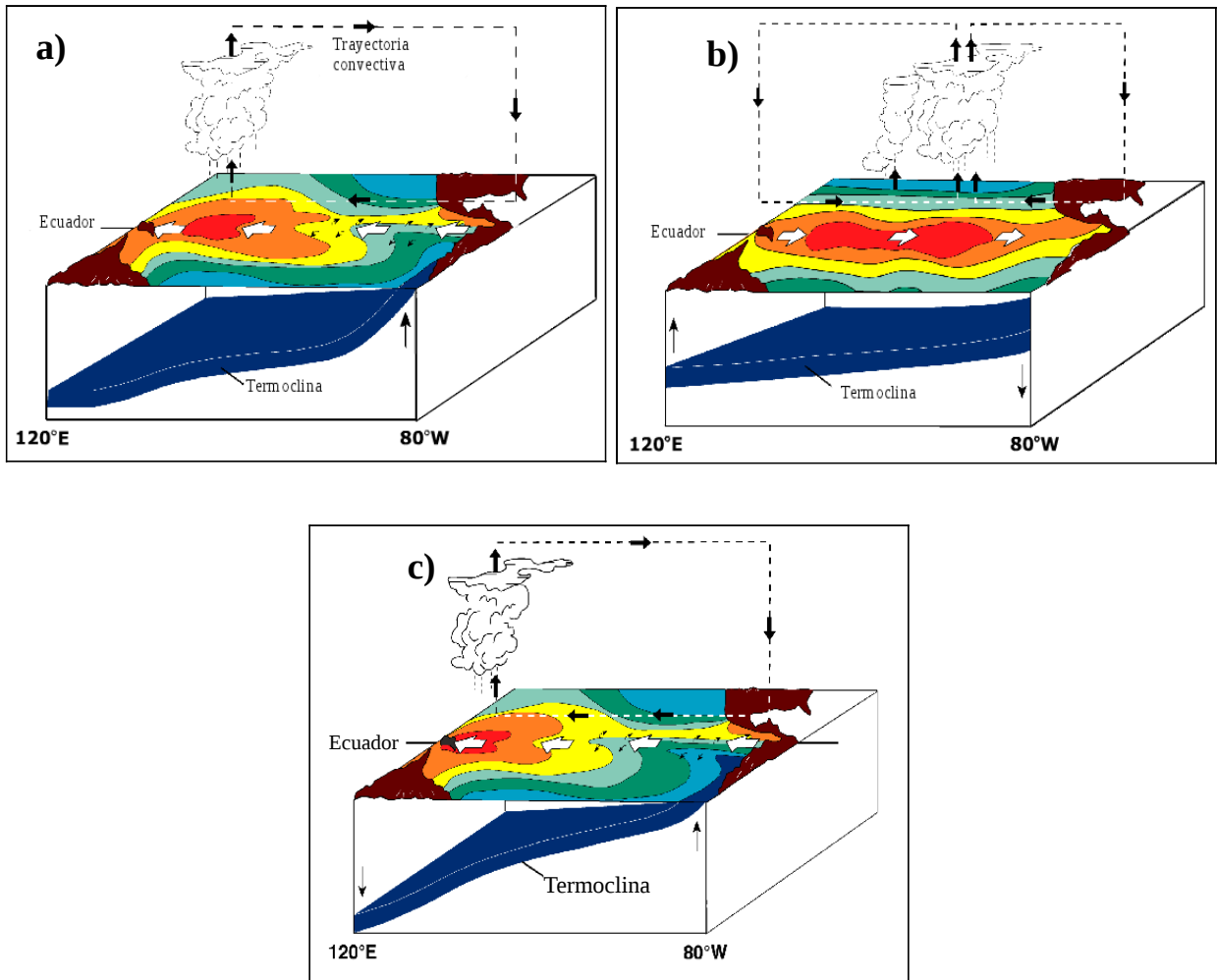


Figura 4.2.1: Esquema de la capa superficial del océano y de la atmósfera a través del Océano Pacífico ecuatorial durante: a) condiciones normales, b) un episodio de El Niño, y c) un episodio de La Niña.

4.3 Intensidad del ENOS

Existen diversos índices para identificar las condiciones asociadas con un evento ENOS y para determinar su intensidad. Uno de ellos, conocido como el Índice Oceánico El Niño (ONI¹², por sus siglas en inglés), se ha convertido en el índice estándar adoptado por la NOAA para identificar estos eventos. Consiste en la serie de medias móviles de 3 meses de las anomalías mensuales de TSM en la región Niño 3.4 (entre 5°N-5°S y 120°W-170°W) (Fig. 4.3.1).

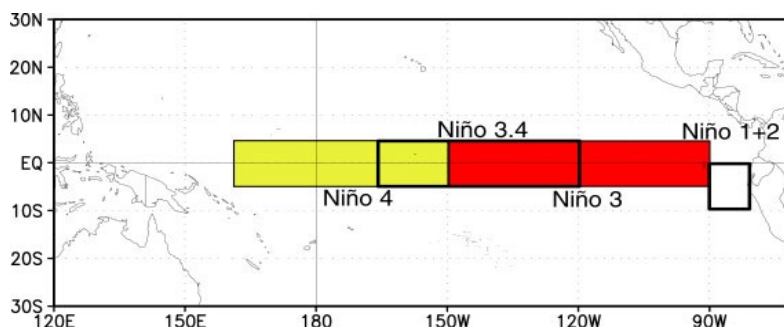


Figura 4.3.1: Región Niño 3.4 (5°N - 5°S, 120°-170°W)¹³.

Los eventos están definidos como 5 meses consecutivos con una anomalía igual o superior a +0.5°C para El Niño e igual o inferior a -0.5°C para La Niña. Se hace una división en los valores de las anomalías para establecer la intensidad de los eventos, como se muestra en la Tabla 4.3.1. Para que un evento sea considerado como *débil*, *moderado* o *intenso* debe haber igualado o excedido el límite al menos durante tres meses.

LÍMITES DE LA ANOMALÍA DE TSM	INTENSIDAD
0.5 – 0.9	Débil
1.0 – 1.4	Moderado
≥ 1.5	Intenso

Tabla 4.3.1: Definición de la intensidad del evento ENOS según el ONI.

¹² http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

¹³ (http://ggweather.com/enso/enso_regions.jpg)

En la Tabla 4.3.2 se presentan los años en los que ocurrió algún evento ENOS (El Niño o La Niña) y su intensidad para el período de 1979 a 2009 con base en el índice ONI. En esta tesis se realizó un análisis de las anomalías de las temperaturas máximas y mínimas únicamente para los eventos de El Niño intensos de 1982-1983 y 1997-1998, y los resultados se presentan en el Capítulo 7.

EL NIÑO		LA NIÑA	
AÑOS	INTENSIDAD	AÑO	INTENSIDAD
1982-1983	Fuerte	1984-1985	Débil
1986-1987	Moderado	1988-1989	Fuerte
1987-1988	Moderado	1995-1996	Débil
1991-1992	Moderado	1998-1999	Moderado
1994-1995	Moderado	1999-2000	Fuerte
1997-1998	Fuerte	2000-2001	Débil
2002-2003	Moderado	2007-2008	Moderado
2004-2005	Débil		
2006-2007	Débil		

Tabla 4.3.2: Año e intensidad de los eventos de El Niño y La Niña ocurridos en el período de 1979-2009 (ONI, 2012).

4.4 Impactos de El Niño en el clima de México

Las lluvias en nuestro país son muy importantes, principalmente para la agricultura, y éstas se ven alteradas durante eventos ENSO. Por ejemplo, en años Niño las lluvias se intensifican en el noreste y noroeste de México y van disminuyendo hacia el sur del país. En general, los inviernos de años Niño son más fríos en casi todo el país debido a un aumento en la ocurrencia de frentes fríos, llegando a nevar en las partes más altas e incluso en la parte central del país. Un ejemplo de ello fueron las nevadas en algunas partes de Jalisco, Guanajuato y el Distrito Federal en el invierno de 1997 (Magaña et al., 1999). Por el contrario, en los veranos de años Niño las lluvias disminuyen en la mayor parte del país, llegando a producir sequías. Por ejemplo, en 1998 hubo una gran cantidad de incendios en el país debido a los terrenos excesivamente secos (Magaña et al., 1999).

En veranos Niño disminuye la cantidad de nubes, por lo que una mayor cantidad de radiación entra a través de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, en consecuencia las temperaturas registradas son más altas de lo normal en gran parte del país. Este aumento de la temperatura tiene repercusiones en diferentes ámbitos; por ejemplo, ocasiona incendios forestales debido a la baja humedad; afecta la salud humana porque aumentan las infecciones respiratorias y estomacales; los cultivos que requieren de abundante agua como los granos, al no germinar se hechan a perder; causa migración o muerte de aves y peces; cambia la salinidad de los cuerpos de agua; disminuye los escurrimientos de agua, etc. Por otro lado, en el invierno las temperaturas son menores de lo normal y las lluvias se hacen presentes. La precipitación es en general, superior a lo normal en la región del Golfo de México y en el norte de México de octubre a marzo (OMM, 1998). El impacto de el Niño en las lluvias de invierno no es siempre el mismo, principalmente cuando se analizan los cambios a nivel regional (Conde, 1998). Los fríos intensos ocasionan que algunas plantas y árboles no florezcan en tiempo y en forma, disminuyendo la producción alimenticia.

Capítulo 5

DATOS, PROCESAMIENTO Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

En este capítulo se describen las bases de datos utilizadas para el desarrollo del trabajo de tesis, el procesamiento que se llevó a cabo para generar los mapas de alta resolución de las temperaturas máximas y mínimas diarias en la República Mexicana y los métodos que se utilizaron para realizar diversos análisis con los mapas y las series de tiempo obtenidas.

5.1 Datos

Los datos de temperatura utilizados en este trabajo se obtuvieron de dos fuentes principales: de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional y de la base de datos del reanálisis de Norte América (NARR, por sus siglas en inglés), cuyas características se describen a continuación. Asimismo, se utilizaron datos de topografía para la República Mexicana de la base General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (<http://www.gebco.net/>), con una resolución espacial de un minuto de arco en latitud y longitud (aproximadamente 1.9 km). Los mapas generados en este trabajo sirvieron de base para los productos mensuales que están actualmente disponibles a través del Atlas Climático de México.

5.1.1 Reanálisis regional de Norteamérica

Se conoce como “reanálisis” a una metodología de reprocesamiento de observaciones ambientales pasadas que, en combinación con pronósticos numéricos de corto plazo, permite obtener una mejor estimación del estado y la evolución de una gran cantidad de variables ambientales. La salida de los reanálisis está dada en una malla uniforme, sin datos faltantes, lo que permite realizar estudios del clima en muy poco tiempo, lo cual ha incrementado de manera sustancial nuestro entendimiento de la evolución de la atmósfera. Las evaluaciones que se han realizado muestran que los nuevos análisis de variables tales como la temperatura del aire, la humedad y los vientos en altura son mucho mejores que los mismos campos obtenidos de análisis operacionales hechos hasta hace pocos años (Reanalysis Workshop Report 2000). Entre las aplicaciones actuales de los reanálisis podemos mencionar las siguientes: monitoreo del clima y su predicción en escala estacional; estudios de variabilidad del clima; condiciones de frontera para modelos regionales o de mesoescala y verificación de modelos climáticos.

En particular, el North American Regional Reanalysis (NARR) surgió de la idea de contar con un reanálisis regional para el estudio del ciclo hidrológico, el ciclo diurno y otras características importantes de la variabilidad climática y del estado del tiempo para los E.U.A., pero como se puede observar en la figura 5.1.1, el dominio del NARR abarca completamente a la República Mexicana.

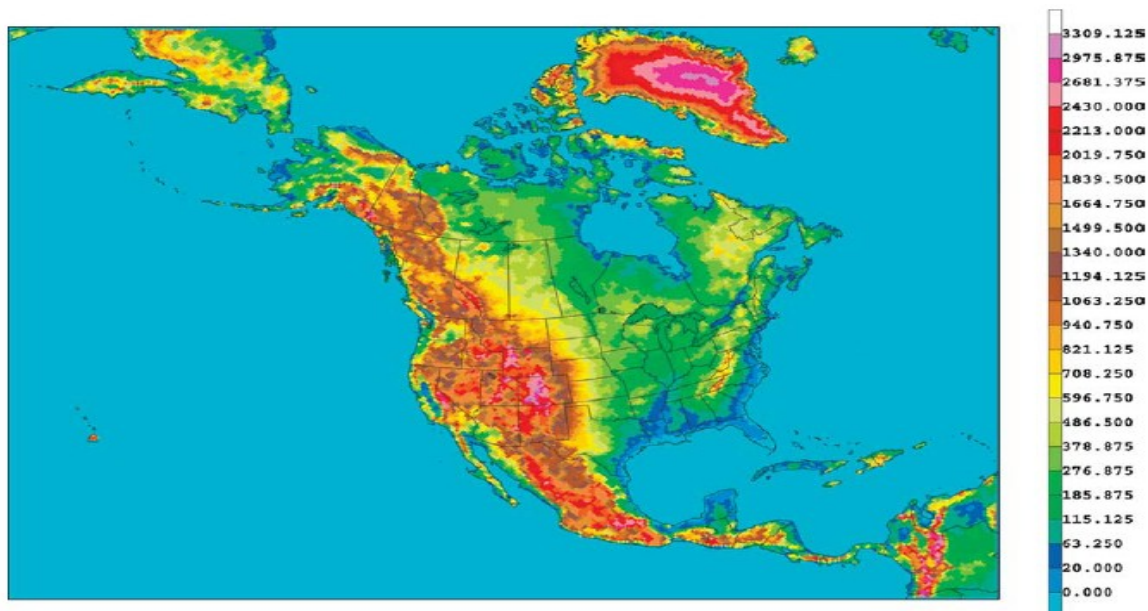


Figura 5.1.1: Dominio del NARR y su topografía con resolución de 32 km. La escala de colores indica la elevación del terreno en metros (tomada de Mesinger et al, 2006).

El NARR proporciona datos de diversas variables climáticas, como precipitación, temperatura del aire, presión y radiación, entre muchas otras, con una resolución temporal de tres horas a partir de 1979 y hasta la fecha. Los datos se encuentran en una malla horizontal de 349 x 277 puntos, que representa una resolución espacial de aproximadamente 0.3 grados (32 km de longitud y latitud), utilizando una proyección cónica conforme de Lambert, y en 45 niveles en la vertical. Para el trabajo de tesis se utilizaron los datos de temperatura a 2 m sobre la superficie para el período 1979-2010, a partir de los cuales se obtuvieron las temperaturas máximas y mínimas diarias. Los archivos con los datos son proporcionados en formato .grb, los cuales se procesaron para convertirlos al formato NetCDF (Network Common Data Form), el cual permite el acceso y la distribución de datos científicos en arreglos matriciales.

5.1.2 Datos del Servicio Meteorológico Nacional y estaciones de los E.U.A.

El SMN proporcionó al Centro de Ciencias de la Atmósfera una base de datos actualizada con información histórica diaria de precipitación acumulada (mm) y temperaturas máximas y mínimas (°C), registradas a una altura aproximada de 2 m sobre el suelo, de las más de 5,000 estaciones climatológicas operadas principalmente por la CONAGUA. Esta base contiene la siguiente información: identificador y nombre de la estación; estado y municipio donde se ubica; situación de operación; organismo encargado; clave de la OMM; coordenadas de latitud y longitud (en grados); altura (en metros) sobre el nivel medio del mar y fecha de emisión. La figura 5.1.2 muestra la ubicación de todas las estaciones en la base actualizada del SMN. El período de información varía para cada estación, habiendo algunas con registros desde 1903. Sin embargo, en este trabajo se usaron sólo aquellas estaciones con registros entre 1979 y 2009 por dos razones: 1) para que el año de inicio coincidiera con el de la base del NARR, y 2) debido a que hay muy pocas estaciones con datos en 2010.

Dado que existen pocas estaciones en algunos estados del norte de la República Mexicana, se decidió utilizar la información de algunas estaciones ubicadas en los estados fronterizos de los E.U.A. Los datos se obtuvieron de la página www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/climatedata.html#daily. La base contiene información como identificador y nombre de la estación; estado y ciudad de ubicación; período de registro; coordenadas de longitud y latitud (en grados) y elevación (metros) sobre el nivel medio del mar. La figura 5.1.2 muestra también la ubicación de las estaciones cercanas a la frontera entre México y E.U.A.

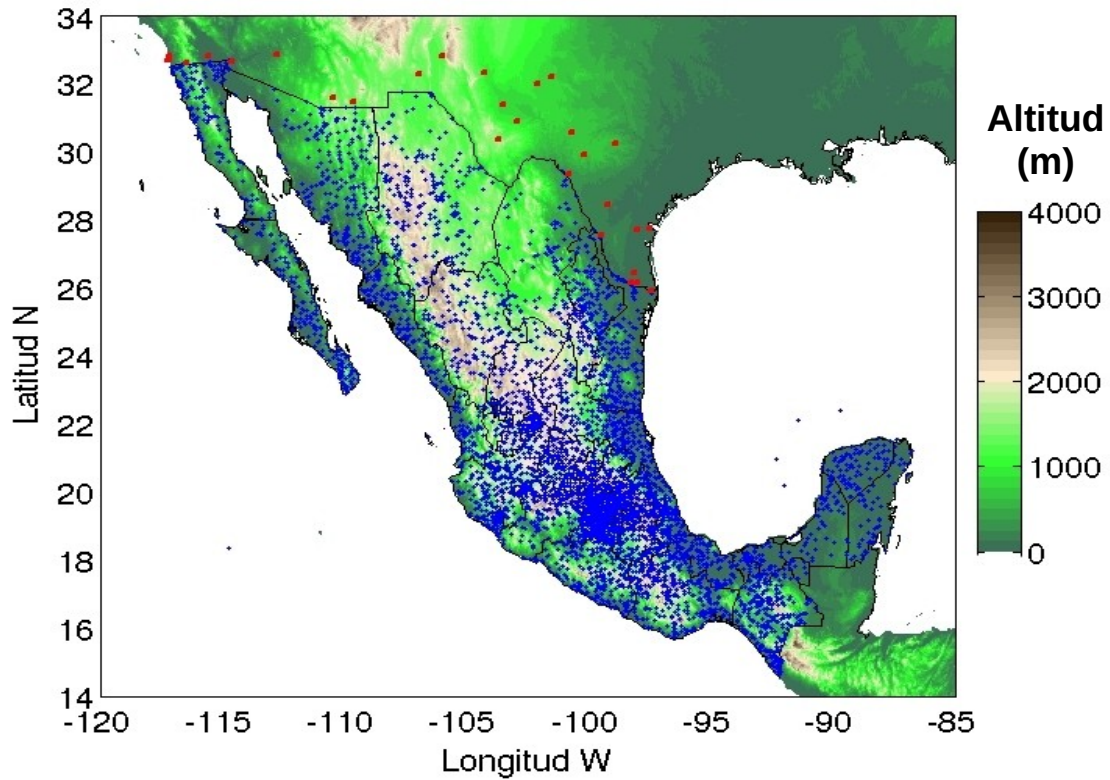


Figura 5.1.2: Ubicación de las estaciones climatológicas de la base de datos del SMN en la República Mexicana (azul) y de las estaciones cercanas a la frontera con los E.U.A. (rojo).

5.2 Procesamiento de los datos para la obtención de mapas diarios de temperatura de alta resolución espacial

A continuación se describe la metodología empleada en el procesamiento de los datos para la obtención de los mapas diarios de temperaturas máximas y mínimas de alta resolución espacial. Se utilizó el software *Matlab* para llevar a cabo el procesamiento y la visualización de los mapas generados.

5.2.1 Descripción del método

1. Preprocesamiento de los datos de la base climatológica diaria de las estaciones del SMN para generar archivos en formato NetCDF con la información relevante de cada estación, como identificador, nombre, estado, municipio, organismo, situación, altitud, latitud y longitud, y con los datos de temperatura estructurados en un arreglo matricial con dimensiones 5225 X 39447. La primera dimensión corresponde al número de estaciones y la segunda al número de días desde el 1o de Enero de 1903 hasta el 31 de Diciembre de 2010. A los días en los cuales no hay información se les asigna un 'NaN' (Not-a-Number). Cabe recordar que únicamente se trabajó con los datos del período 1979-2009.
2. Preprocesamiento de los datos tri-horarios del NARR a partir de los cuales se extrajeron los valores máximos y mínimos de la temperatura para cada día y se convirtieron de grados Kelvin a grados Centígrados. Se generaron archivos en formato NetCDF por año, conteniendo arreglos matriciales de dimensiones 12 X 31 X 123 X 218 (mes X día X lat X lon).
3. Se revisaron y escogieron 29 estaciones de los E.U.A., relativamente cercanas a la frontera con México, y se generaron archivos en formato NetCDF para las temperaturas máximas y mínimas, guardando la información en matrices de tamaño 29 X 39447. Esta información se agregó a la de las estaciones del SMN y será referida como SMN-USA.
4. Para cada día, se trabaja con los datos de las estaciones que tienen registro en esa fecha y con la información del NARR para el día en cuestión.
5. Se interpolan linealmente los datos de temperatura y topografía del NARR a los puntos donde se ubican las estaciones usando la función *griddata* de Matlab (basada en una triangulación de Delaunay).
6. Considerando un cambio vertical de temperatura para una atmósfera estándar de $\gamma = 0.0065^\circ\text{C}/\text{m}$ (ver la sección 1.5.2), se reducen al nivel del mar las temperaturas del NARR interpoladas a los sitios de las estaciones y las de las estaciones SMN-USA mediante la siguiente relación:

$$T_{i,est} = T_i + \gamma * z_i$$

donde el subíndice i se refiere a la i -ésima estación, z es la elevación en metros, T es la temperatura (máxima o mínima) observada y T_{est} es la temperatura del aire estimada al nivel del mar (Willmott and Matsuura, 1995).

7. Se calculan las diferencias entre las temperaturas reducidas al nivel del mar del NARR y de las estaciones SMN-USA.
8. Se interpolan las diferencias a la malla topográfica de alta resolución de GEBCO y se filtra el mapa obtenido para suavizar los valores.

9. Se calcula la diferencia entre el mapa de diferencias original y el suavizado y se hace una interpolación a los sitios de las estaciones SMN-USA.
10. Se calcula la desviación estándar de estos valores interpolados y se utiliza para eliminar del procesamiento aquellos registros cuya diferencia en valor absoluto es mayor o igual a 1.5 veces dicha desviación estándar y se determina la ubicación de las estaciones que no fueron eliminadas.
11. Se repiten los pasos 7 y 8 considerando únicamente los sitios que no fueron eliminados y realizando un suavizado con menos iteraciones.
12. Con el objeto de obtener valores más cercanos a los observados, al mapa de alta resolución de las temperaturas reducidas al nivel del mar del NARR se le suma el mapa de diferencias suavizado. A este nuevo mapa lo denotaremos como $T_{estNARR}$.
13. Por último, el mapa final de temperatura diaria se obtiene estimando los valores en la altura correspondiente, restándole al mapa obtenido en el punto anterior el producto entre el gradiente vertical de temperatura y los datos de elevación estimados a partir del modelo digital de elevación de alta resolución (z_j):

$$T_{j,final} = T_{j,estNARR} - \gamma * z_j$$

para el j -ésimo punto de malla.

5.3 Métodos de análisis

Una vez obtenidos los mapas diarios de las temperaturas máximas y mínimas de alta resolución para el período de 1979 a 2009, se procedió a realizar diferentes tipos de análisis. Como primer paso, se calcularon los mapas de promedios mensuales, anuales y climatológicos para ambas temperaturas, los cuales se describen en el Capítulo 6. Enseguida se realizó una evaluación del producto mediante el cálculo de diversos estadísticos y se analizó la variación de las temperaturas en distintos sitios de la República Mexicana. Los métodos empleados se describen a continuación.

5.3.1 Estadísticos calculados para evaluar el producto generado

Con el objeto de realizar una evaluación del producto obtenido, se compararon las series de tiempo de las temperaturas máximas y mínimas observadas en varias estaciones con las series de tiempo obtenidas a partir del producto mediante una interpolación en los sitios de ubicación de dichas estaciones. La evaluación del producto se realizó mediante el cálculo de los siguientes estadísticos (para cada sitio y para ambas temperaturas):

Coefficiente de correlación (r): Es una medida de la correspondencia entre los valores generados (P) y los valores observados (O). Es una buena medida de la asociación lineal entre las dos series de tiempo o del error de fase. Visualmente, la correlación mide qué tan cerca están los puntos de un diagrama de dispersión a una línea recta. Una correspondencia perfecta estaría indicada por un valor de $r = 1$. El coeficiente de correlación se calcula mediante:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

donde la barra superior indica el promedio o media aritmética.

Error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés): Estima la magnitud promedio de los errores absolutos, en nuestro caso del producto obtenido (P) en comparación con los datos observados (O), y se calcula mediante:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |P_i - O_i|$$

para los días (i) en los que existe observación. Un valor pequeño del MAE indica que los errores son relativamente pequeños, aunque no indica la dirección de las desviaciones.

Raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés): Representa la magnitud de la diferencia cuadrática media entre los valores del producto generado y los datos observados. Mide el error “promedio”, pesado de acuerdo al cuadrado del error. No indica la dirección de las desviaciones y se ve más influenciado por los errores grandes que por los pequeños, lo cual puede ser bueno si los errores grandes son especialmente indeseables. El RMSE se calcula como sigue:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

Los resultados se presentan en la sección 7.1.

5.3.2 Diagramas de caja

Para analizar el ciclo estacional de las temperaturas en los distintos sitios seleccionados (ver la sección 7.2), se utilizaron diagramas de caja (box-plot). Estos diagramas están representados por cajas cuyos límites superior e inferior son el primer (Q_1) y tercer cuartil (Q_3), o percentiles 25 y 75 respectivamente, y la mediana o percentil 50 (Q_2) es la línea horizontal que está dentro de la caja. Las prolongaciones en los extremos inferior y superior de la caja (también nombrados “bigotes” o “brazos”) representan las colas de la distribución. Hay distintos criterios para definir los extremos de estas prolongaciones; el criterio utilizado en Matlab es el de aquellos valores de la serie que no rebasan las cantidades $Q_1 - (1.5) \cdot IQR$, para el brazo inferior, y $Q_3 + (1.5) \cdot IQR$, para el brazo superior, donde IQR denota el rango intercuartil ($Q_3 - Q_1$) (Fig. 5.3.1). Cualquier valor inferior o superior a estas cantidades se considera como *outlier* o valor atípico de la distribución y se grafican usando algún símbolo especial. El valor de 1.5 corresponde aproximadamente a 2.7 desviaciones estándar, lo que significa una cobertura del 99.3% de los datos si estuvieran distribuidos en forma gaussiana.

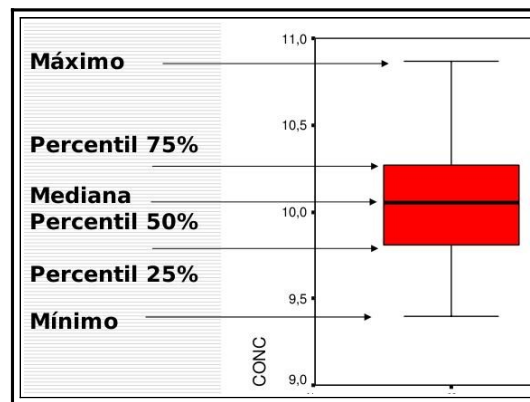


Figura 5.3.1: Ejemplo de un diagrama de caja (box-plot).

Los diagramas de caja proporcionan una idea de la forma de la distribución de los datos, como se muestra a continuación:

- ◆ **Distribución simétrica:** Los brazos de la caja son de la misma longitud y la mediana divide a la caja en dos partes iguales (Fig. 5.3.2a).
- ◆ **Distribución sesgada a la izquierda (sesgo negativo):** Se caracteriza por tener el brazo izquierdo (o inferior) más largo que el derecho (o superior), lo cual implica que los datos en la cola izquierda presentan una mayor dispersión que los de la cola derecha y la mediana está desplazada del centro

de la caja (Fig. 5.3.2b).

- ◆ **Distribución sesgada a la derecha (sesgo positivo):** Tiene el brazo derecho (o superior) más largo que el izquierdo (o inferior), lo cual implica una mayor dispersión de los datos en la cola derecha de la distribución y una mediana desplazada del centro de la caja (Fig. 5.3.2c).
- ◆ **Distribución rectangular:** En este caso cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad de ocurrir, por lo que el diagrama de caja presentará los brazos y las dos partes en que está dividida la caja de la misma longitud (Fig. 5.3.2d).

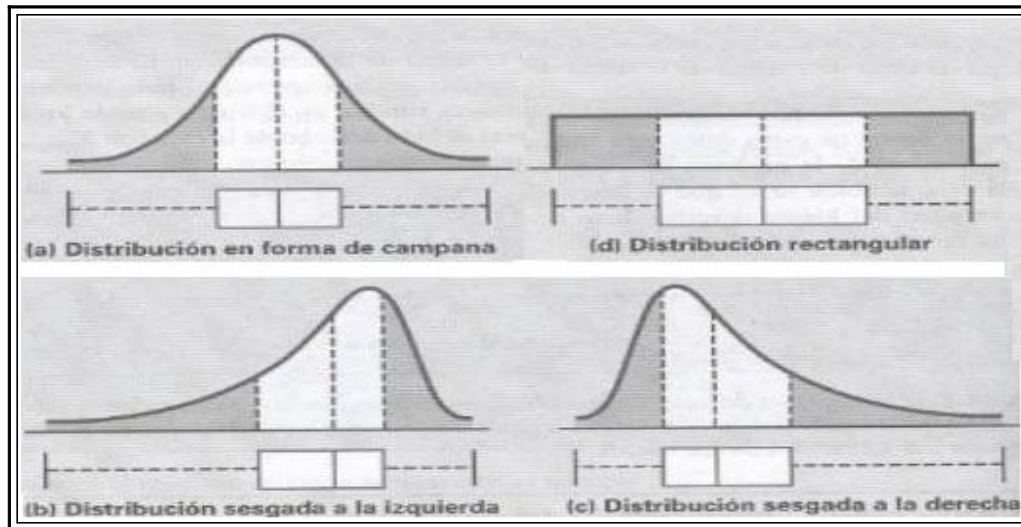


Figura 5.3.2: Representación de distintas formas de la distribución de datos mediante diagramas de cajas.

5.3.3 Cálculo de la tendencia

En este trabajo se realizó un análisis de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas en los doce sitios seleccionados en la República Mexicana para el período 1979-2009 (ver sección 7.4). El cálculo de las tendencias se hizo con base en los promedios anuales de estas variables mediante el ajuste de una recta por medio de mínimos cuadrados, cuya ecuación podemos representar mediante:

$$T_{reg} = mt + T_0 \quad (5.1)$$

donde T_{reg} es la temperatura estimada con el modelo, t es el tiempo en años, m es la pendiente de la recta o tendencia estimada y T_0 es la ordenada al origen. Para determinar si la tendencia (o pendiente de la recta ajustada) es significativamente distinta de cero en sentido estadístico, se procedió a estimar su

desviación estándar por medio de la siguiente ecuación (Wilks, 2006):

$$s_m = \frac{s_e}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}$$

en donde n (=31) es el número de años, \bar{t} es el promedio del tiempo y s_e representa la desviación estándar de los errores o residuales, que está dada por:

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{reg,i})^2}{n-2}}$$

Para obtener un intervalo de confianza del 95% para m , el valor de s_m es multiplicado por la t de Student con $n-2$ (=29) grados de libertad, cuyo valor aproximado es 2.04. Entonces, consideramos que la tendencia es estadísticamente significativa si $0 \notin [m - 2.04s_m, m + 2.04s_m]$. Los resultados se presentan en la sección 7.4.

Capítulo 6

MAPAS DE TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA DE ALTA RESOLUCIÓN

En este capítulo se presentan algunos ejemplos de los mapas de alta resolución de las temperaturas máximas y mínimas diarias y mensuales que se generaron con el procedimiento explicado en el capítulo anterior y se comparan con los correspondientes mapas obtenidos con los datos del NARR. En la última sección se describen las climatologías mensuales calculadas con los mapas diarios generados para el período 1979-2009.

6.1 Mapas diarios de temperaturas máximas y mínimas

Como resultado del procedimiento descrito en el capítulo anterior, se obtuvieron los mapas de las temperaturas máximas y mínimas diarias con una resolución espacial de un minuto (~ 1.9 km) para el período de 1979 a 2009, lo cual hace un total de 11,322 mapas diarios para cada una de estas variables. Como ejemplo, se muestra una comparación entre los mapas de alta resolución obtenidos en este trabajo y los mapas del NARR para los días 01/01/1979 y 01/06/1979 (Figs. 6.1.1 y 6.1.2, respectivamente). Recordemos que los datos del NARR tienen una resolución espacial de ~ 32 km y una resolución temporal de 3 horas, siendo ocho datos por cada día. De entre los ocho datos diarios se tomó el valor más alto y el más bajo como representativos de la temperatura máxima y de la temperatura mínima, respectivamente. Estas dos características del NARR marcan las diferencias que se observan en comparación con los mapas obtenidos, los cuales presentan mucho mayor detalle relacionado con la topografía. También pueden observarse algunas regiones en donde hay diferencias en los valores, tanto de las temperaturas máximas como de las mínimas, debido a la influencia de los datos observados.

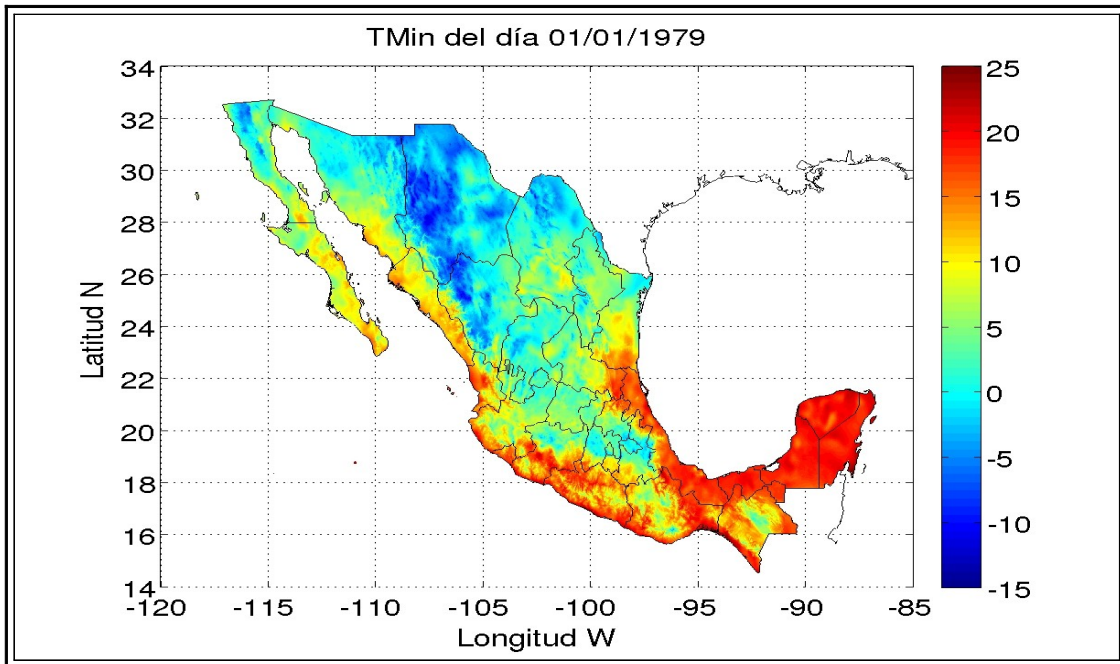
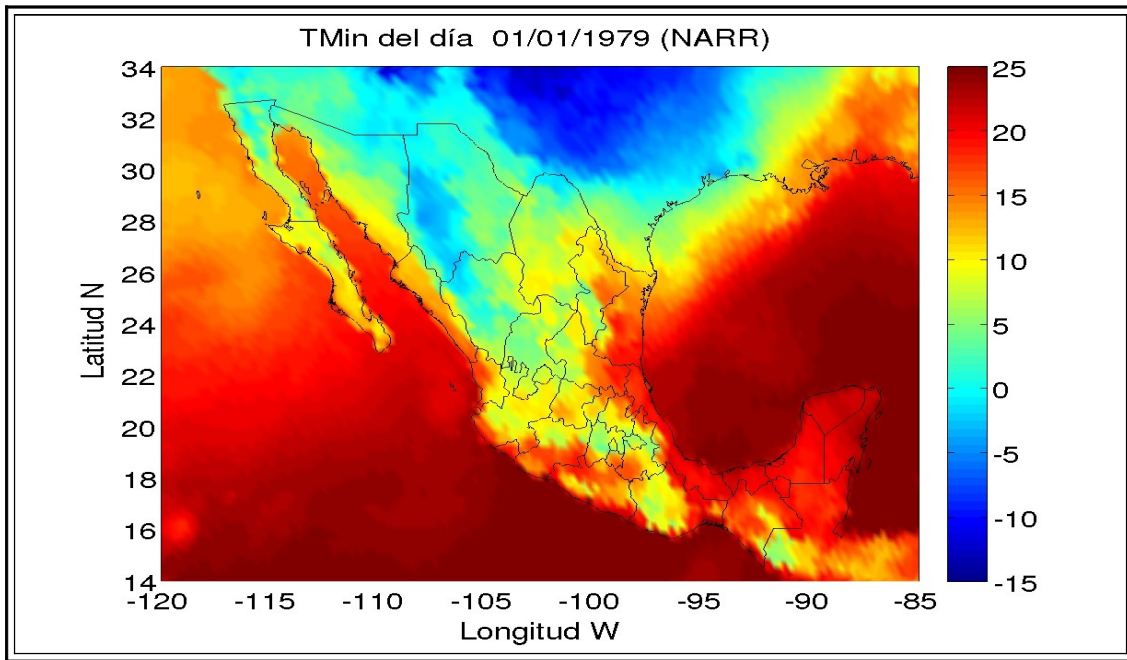


Figura 6.1.1: Mapas de temperatura mínima para el 1o. de Enero de 1979 con datos del NARR (arriba) y con el producto generado (abajo).

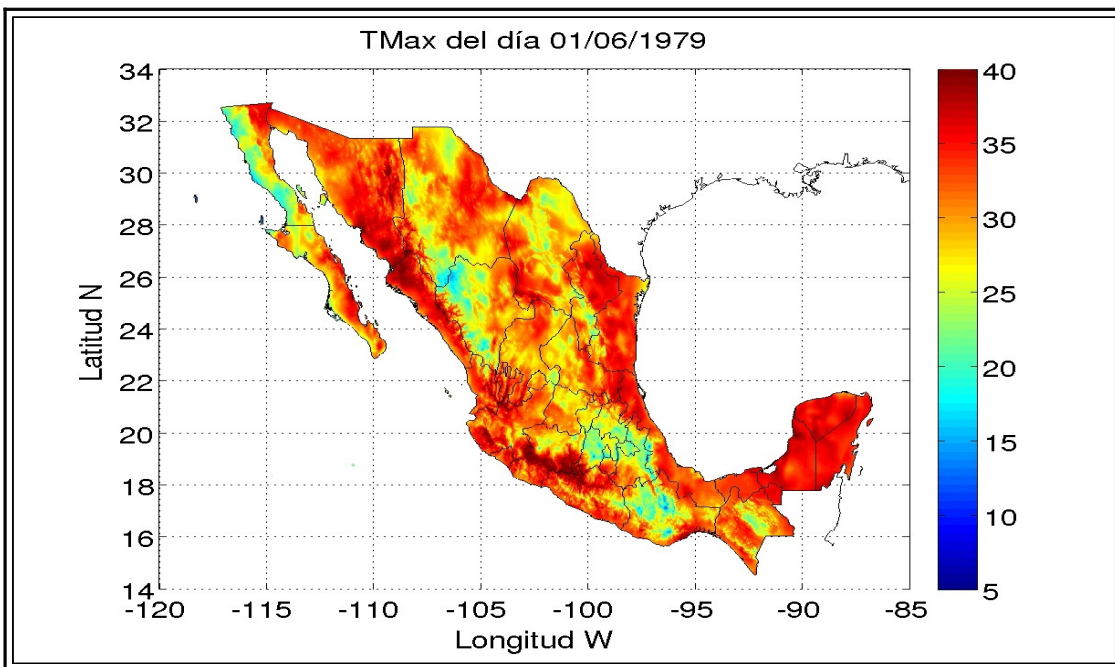
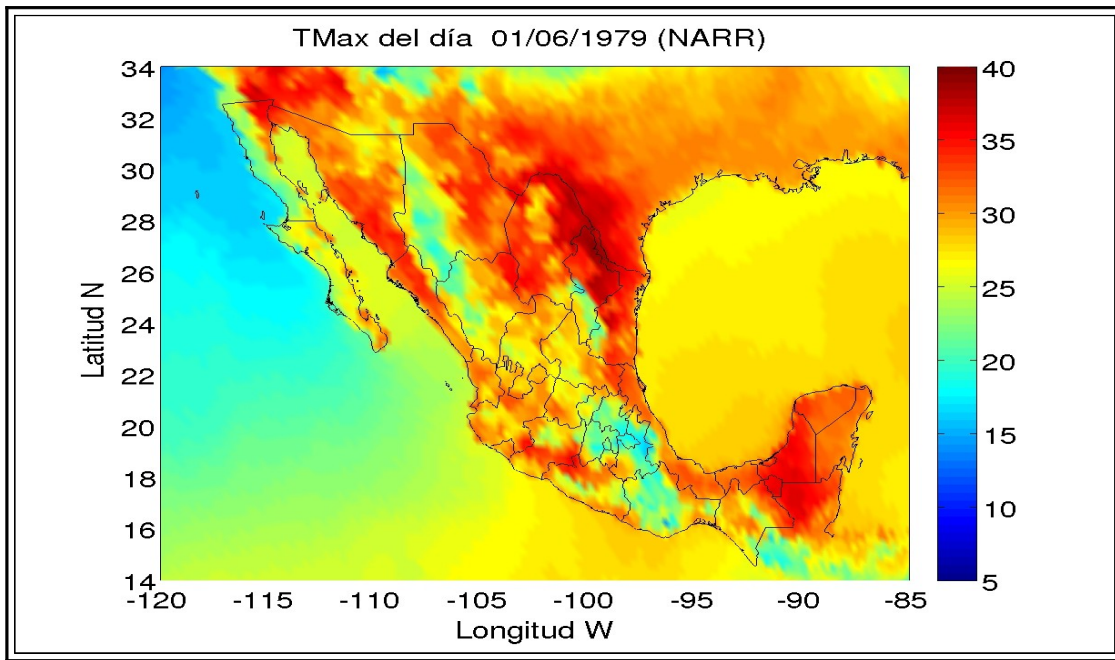


Figura 6.1.2: Mapas de temperatura máxima para el 1o. de Junio de 1979 con datos del NARR (arriba) y con el producto generado (abajo).

6.2 Mapas mensuales

Los mapas de los promedios mensuales fueron construidos promediando las temperaturas diarias para cada mes de cada año. Por lo tanto, se obtuvieron 372 mapas mensuales para el período analizado de 31 años, tanto para la temperatura máxima (TMax) como para la temperatura mínima (TMin). Como ejemplo, en la figura 6.2.1 se muestran las TMin promedio para los meses de Enero de varios años y en la figura 6.2.2 se muestran las TMax promedio para los meses de Junio de esos mismos años.

En estos mapas se puede observar claramente la variabilidad interanual de estas variables. En el caso de los promedios para los Eneiros (Fig. 6.2.1), el de 1990 muestra valores más altos de TMin en el sureste del país en comparación con los años de 1979, 1980 y 2009; mientras que en Enero de 2009 los estados de Chihuahua y Baja California Sur muestran valores más altos y la península de Yucatán valores más bajos de TMin con relación a los otros tres años. En el caso de los promedios para los Junios (Fig. 6.2.2), se puede ver que en 1980 toda la parte norte del país muestra valores más elevados de TMax y la región de la depresión del Balsas muestra valores más bajos de TMax en 1990 en comparación con los otros años.

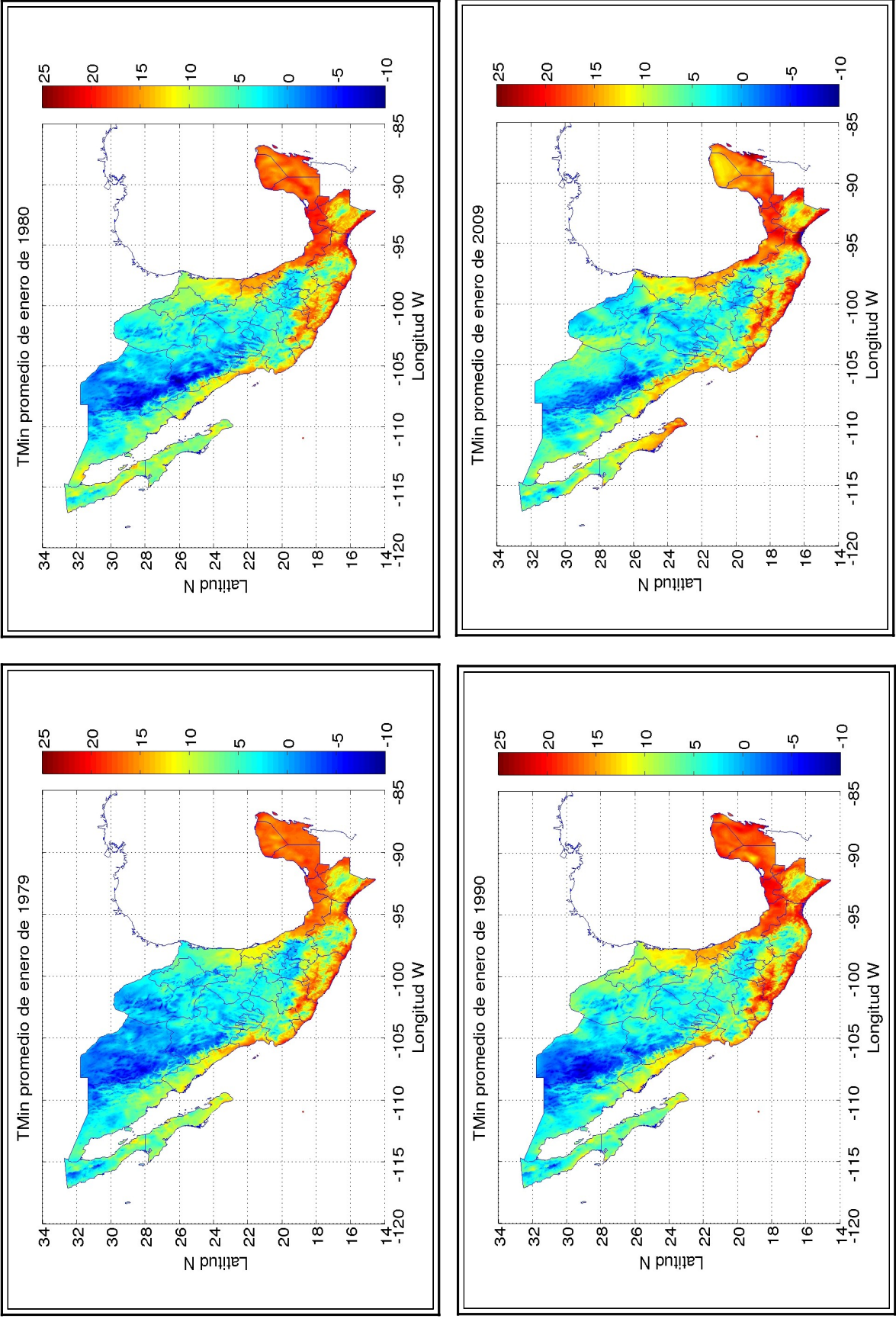


Figura 6.2.1: Mapas de temperatura mínima promedio del producto obtenido para Enero de 1979, 1980, 1990 y 2009.

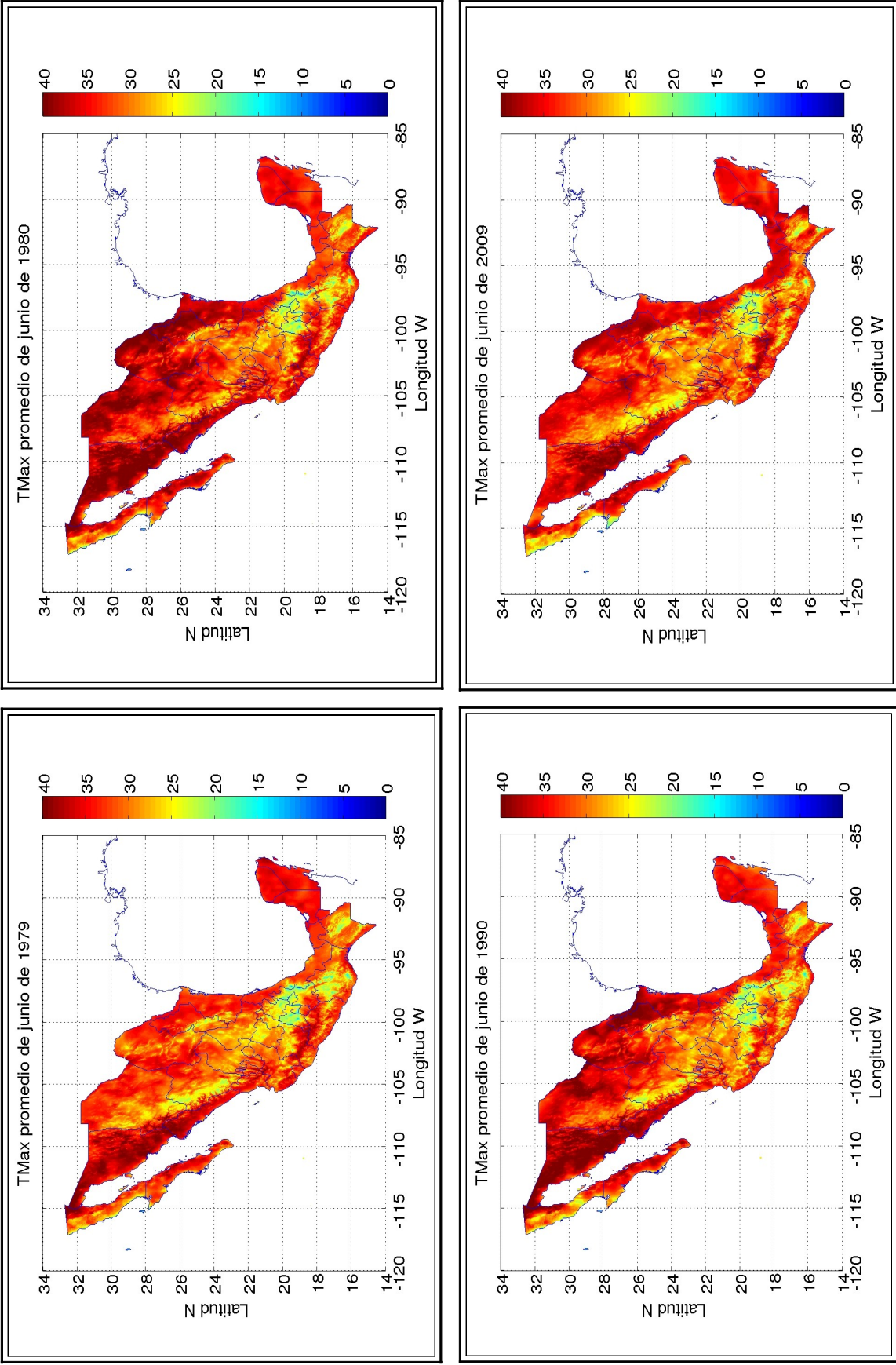


Figura 6.2.2: Mapas de temperatura máxima promedio del producto obtenido para Junio de 1979, 1980, 1990 y 2009.

6.3 Promedios climatológicos mensuales de temperatura (condición térmica)

Los promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima y la temperatura mínima se calcularon usando los promedios para cada mes del año a lo largo del período de 1979 a 2009.

En las figuras 6.3.1 a 6.3.6 se muestran los 12 promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima en la República Mexicana. En ellos se aprecia claramente la evolución anual de esta variable, con los valores más altos durante primavera-verano y los más bajos durante otoño-invierno, así como la influencia de la altura sobre el nivel del mar. Sobresalen regiones bajas como la península de Yucatán, la depresión del Balsas y algunas zonas costeras del Pacífico mexicano que muestran valores relativamente altos a lo largo de todo el año, mientras que las partes altas del eje neovolcánico muestran temperaturas máximas relativamente bajas durante todo el año. Durante los meses de Junio a Agosto, la región de la Sierra Madre occidental y la parte central del país muestran temperaturas máximas más bajas que el resto del territorio, siendo la región noroccidental donde se alcanzan las temperaturas máximas más elevadas de todo el territorio en esta temporada.

6.3.1 Climatologías de la temperatura máxima

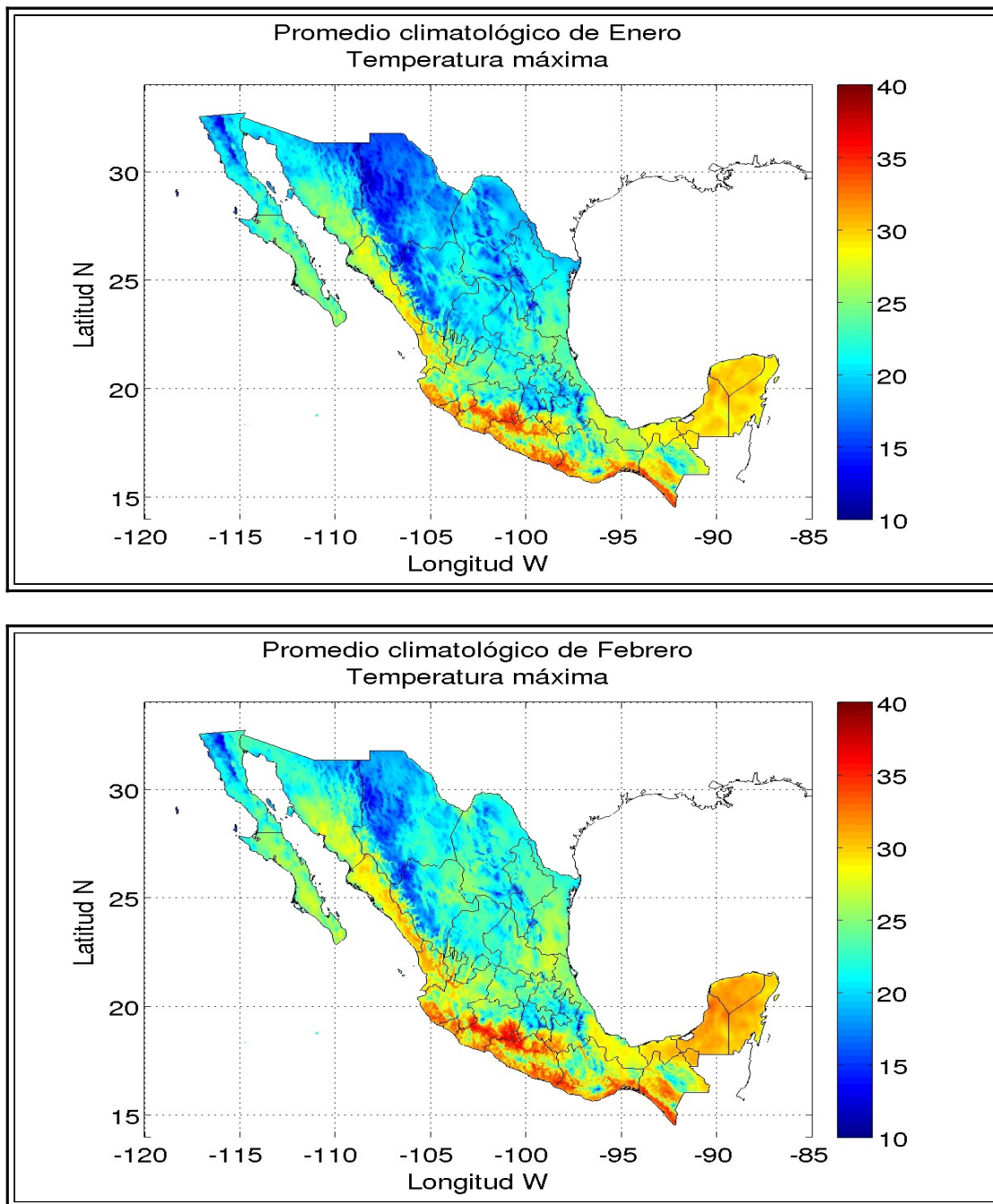


Figura 6.3.1: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima (°C) para los meses de Enero (arriba) y Febrero (abajo) considerando el período de 1979-2009.

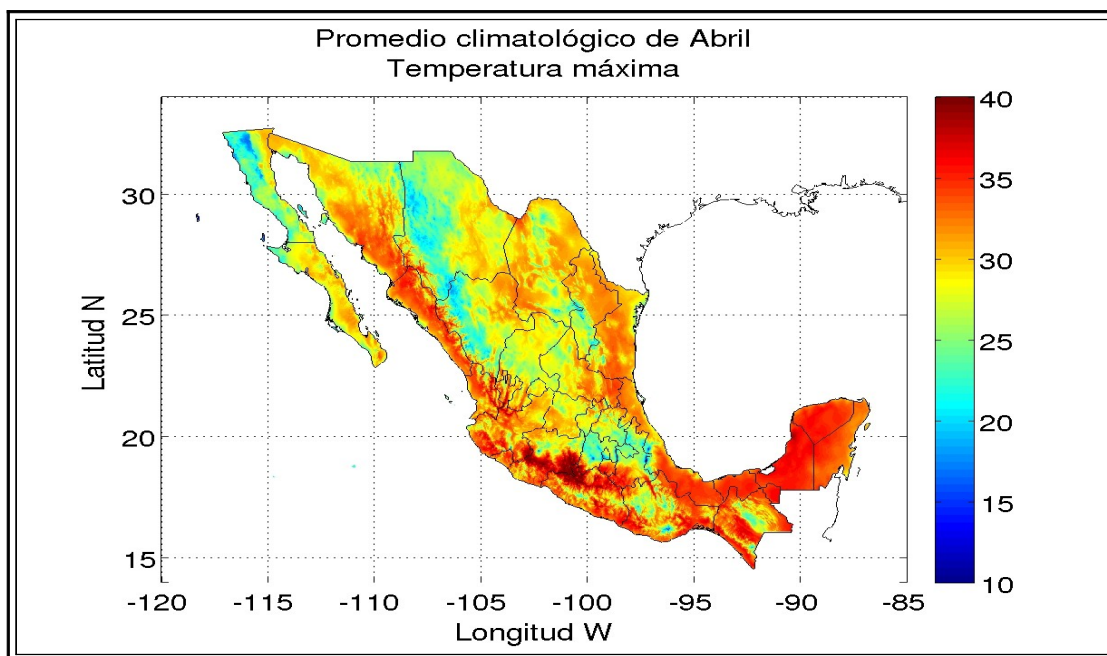
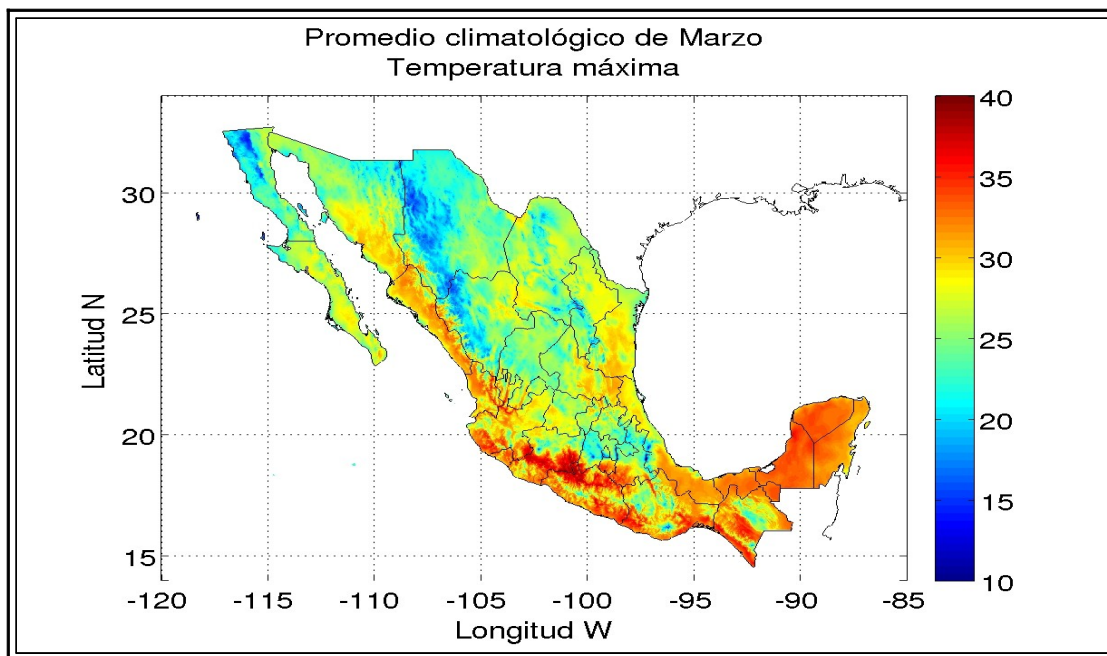


Figura 6.3.2: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima (°C) para los meses de Marzo (arriba) y Abril (abajo) considerando el período de 1979-2009.

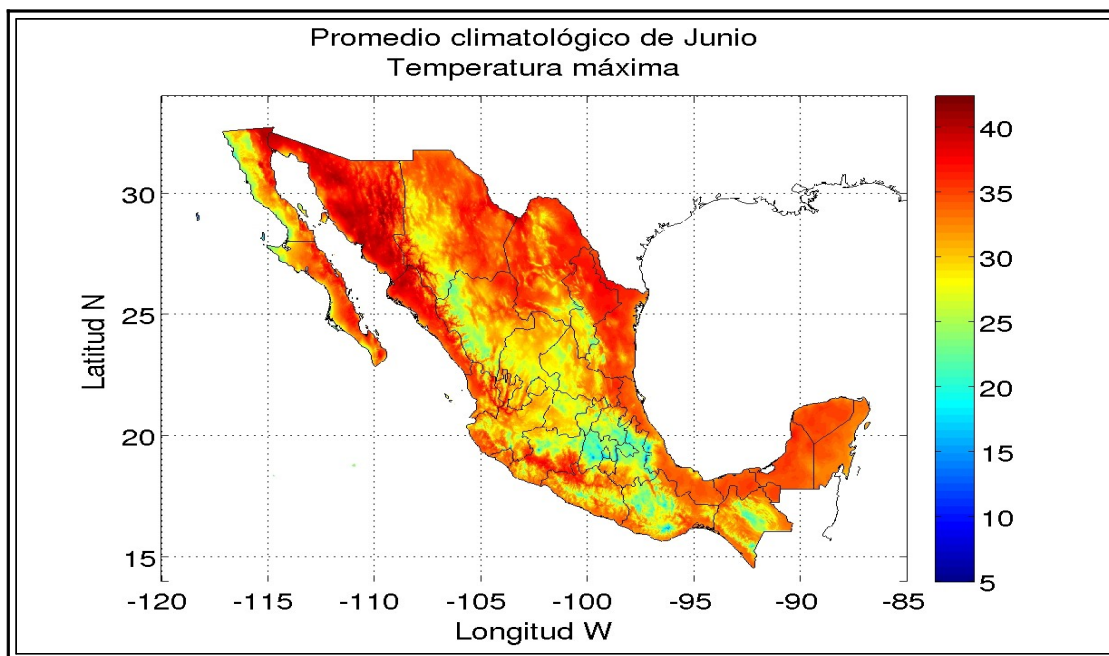
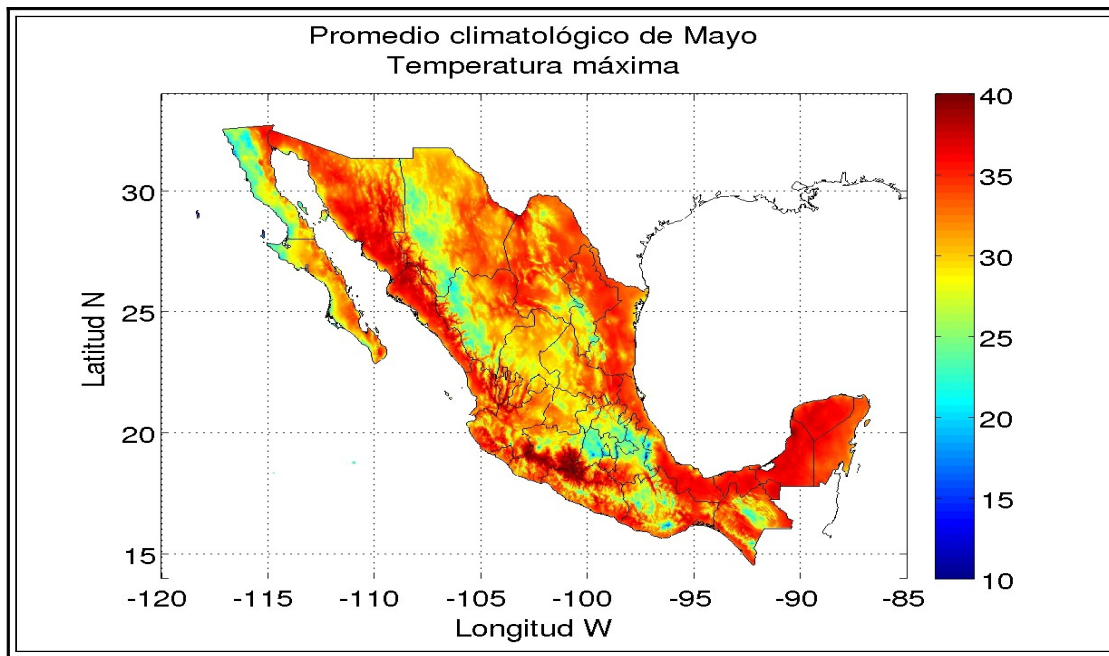


Figura 6.3.3: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima (°C) para los meses de Mayo (arriba) y Junio (abajo) considerando el período de 1979-2009.

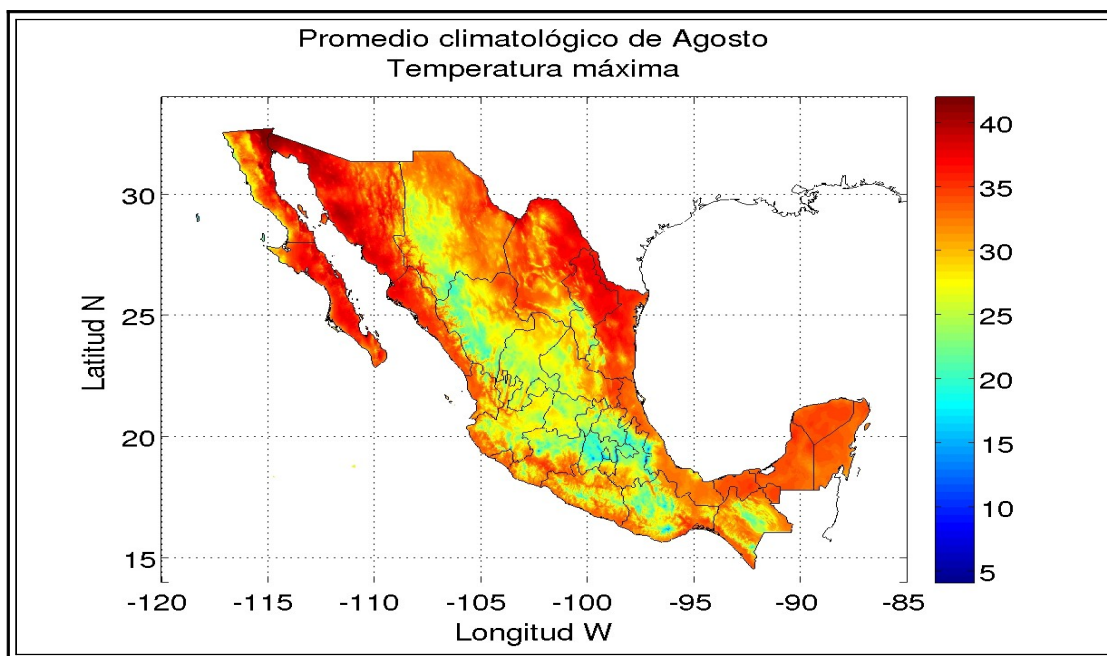
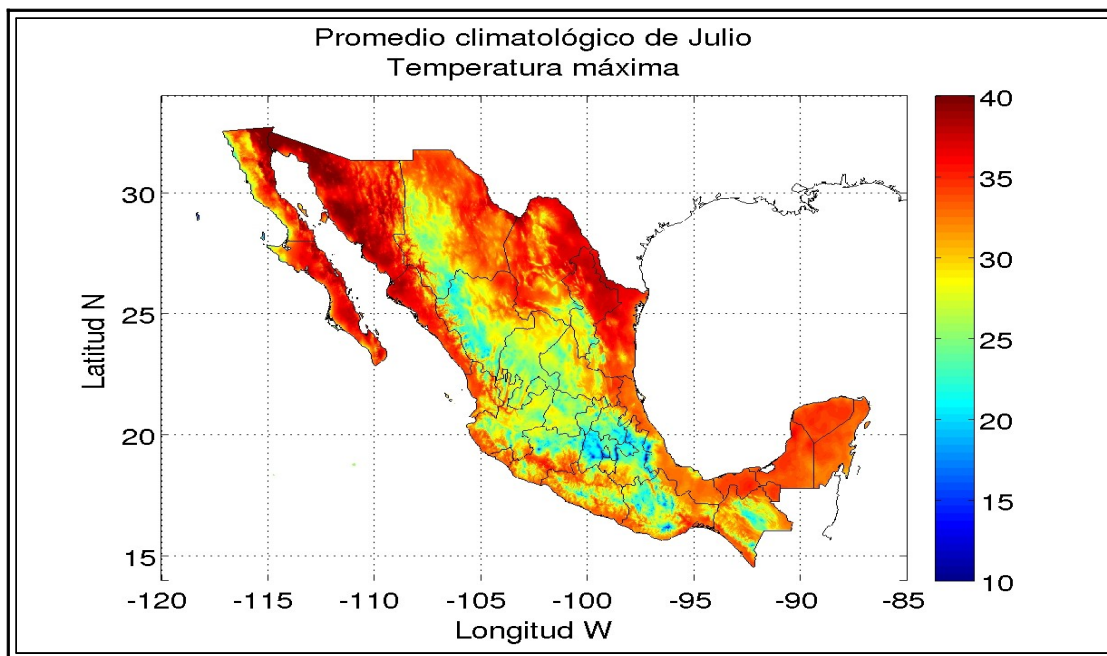


Figura 6.3.4: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima (°C) para los meses de Julio (arriba) y Agosto (abajo) considerando el período de 1979-2009.

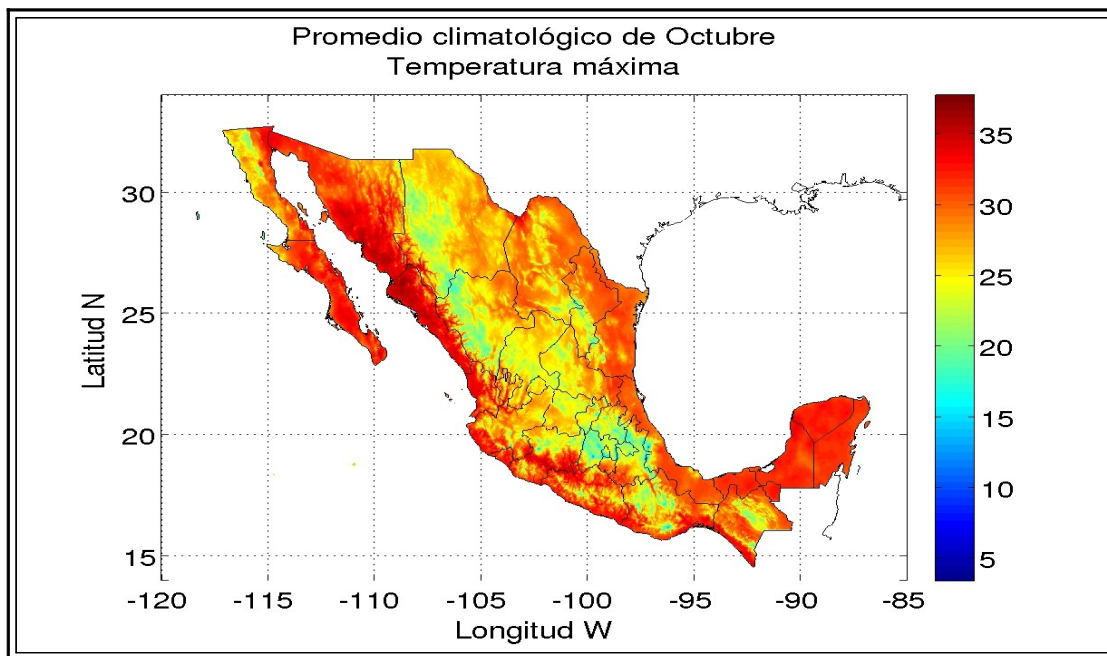
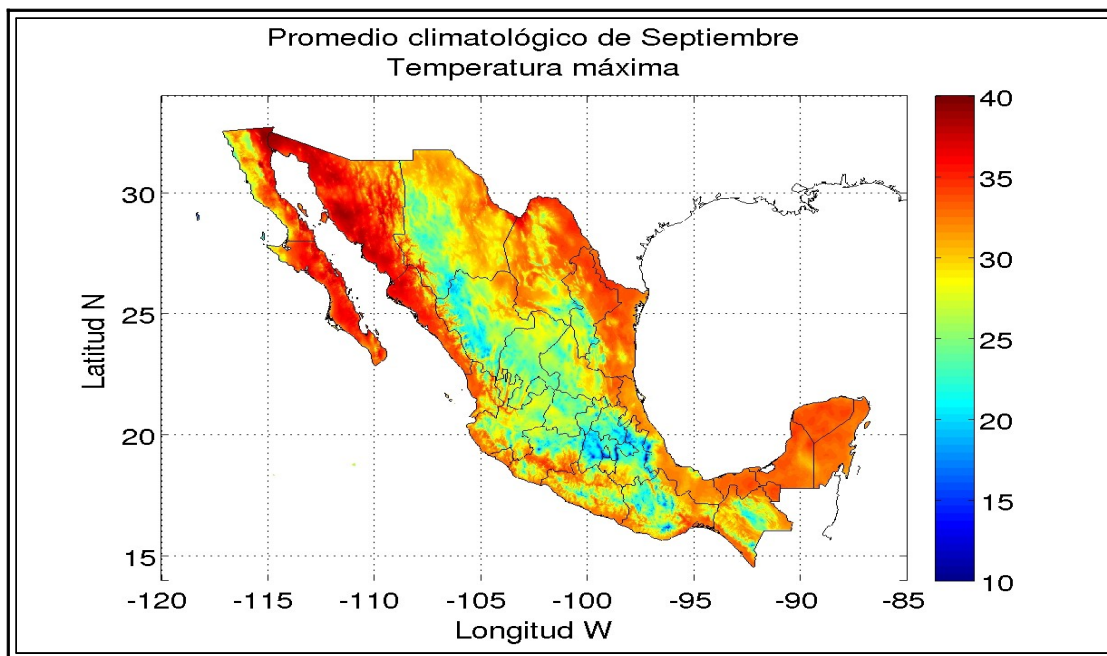


Figura 6.3.5: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima (°C) para los meses de Septiembre (arriba) y Octubre (abajo) considerando el período de 1979-2009.

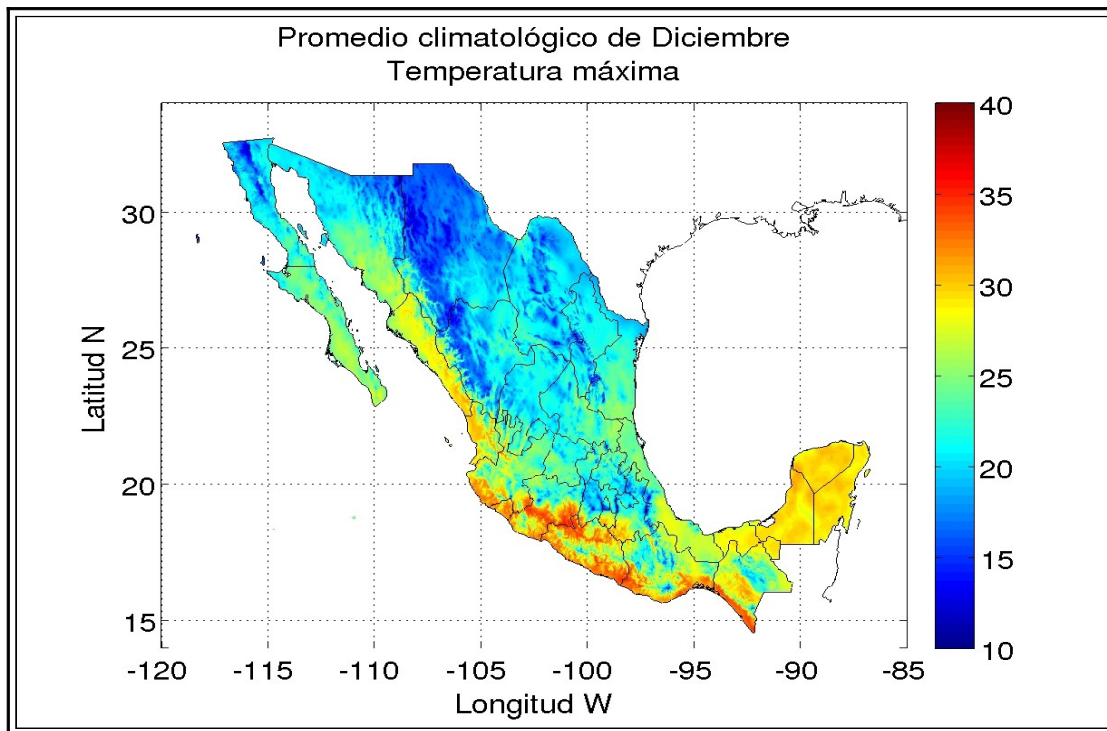
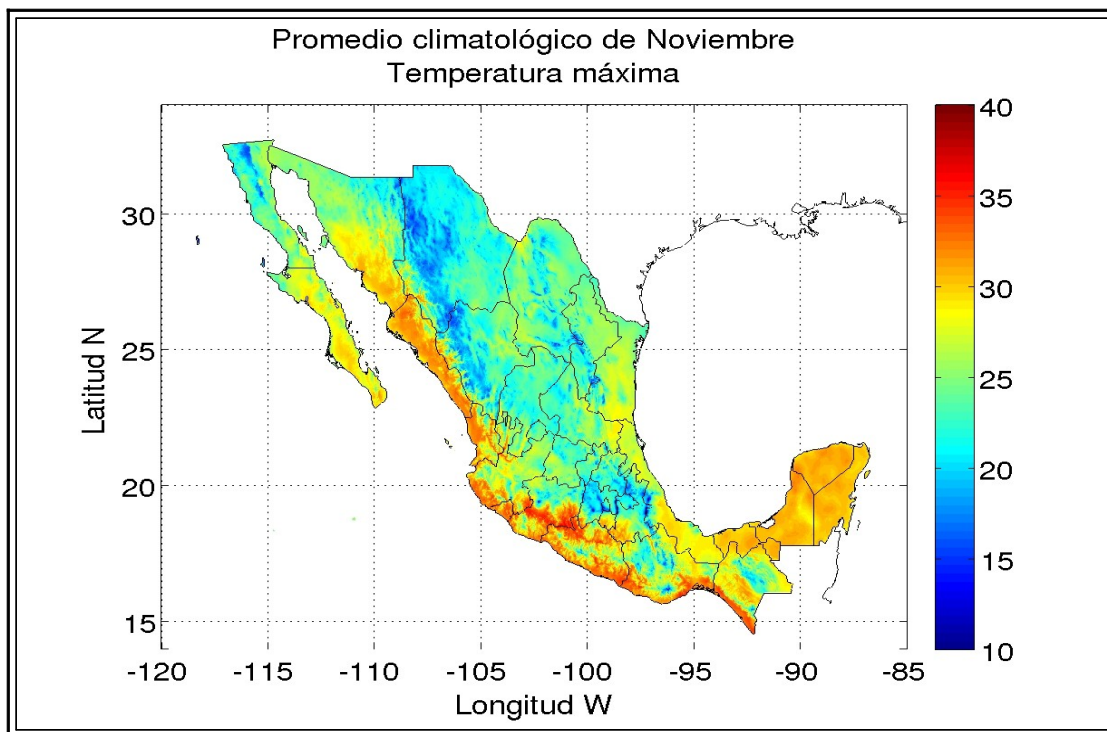


Figura 6.3.6: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura máxima (°C) para los meses de Noviembre (arriba) y Diciembre (abajo) considerando el período de 1979-2009.

En las figuras 6.3.7 a 6.3.12 se muestran los 12 promedios climatológicos mensuales de la temperatura mínima. Estos promedios muestran la evolución de esta variable a lo largo del año y su distribución espacial. En las figuras se observa que, en general, las temperaturas mínimas más bajas ocurren en los meses de Diciembre, Enero y Febrero, principalmente en las zonas altas de la región norte y centro del país, en donde se alcanzan valores promedio de alrededor de -10°C , en tanto que la región sureste y la Depresión del Balsas mantienen valores más altos. Las temperaturas mínimas más altas ocurren entre Junio y Septiembre, alcanzando los valores más elevados en los estados costeros del Golfo de México, Sonora y Sinaloa del lado del Pacífico, algunas partes del norte y la región del Istmo de Tehuantepec, mientras que los valores más bajos en estos meses se presentan en las Sierras Madre Occidental y Oriental y en la Sierra Volcánica Transversal.

6.3.2 Climatologías de la temperatura mínima.

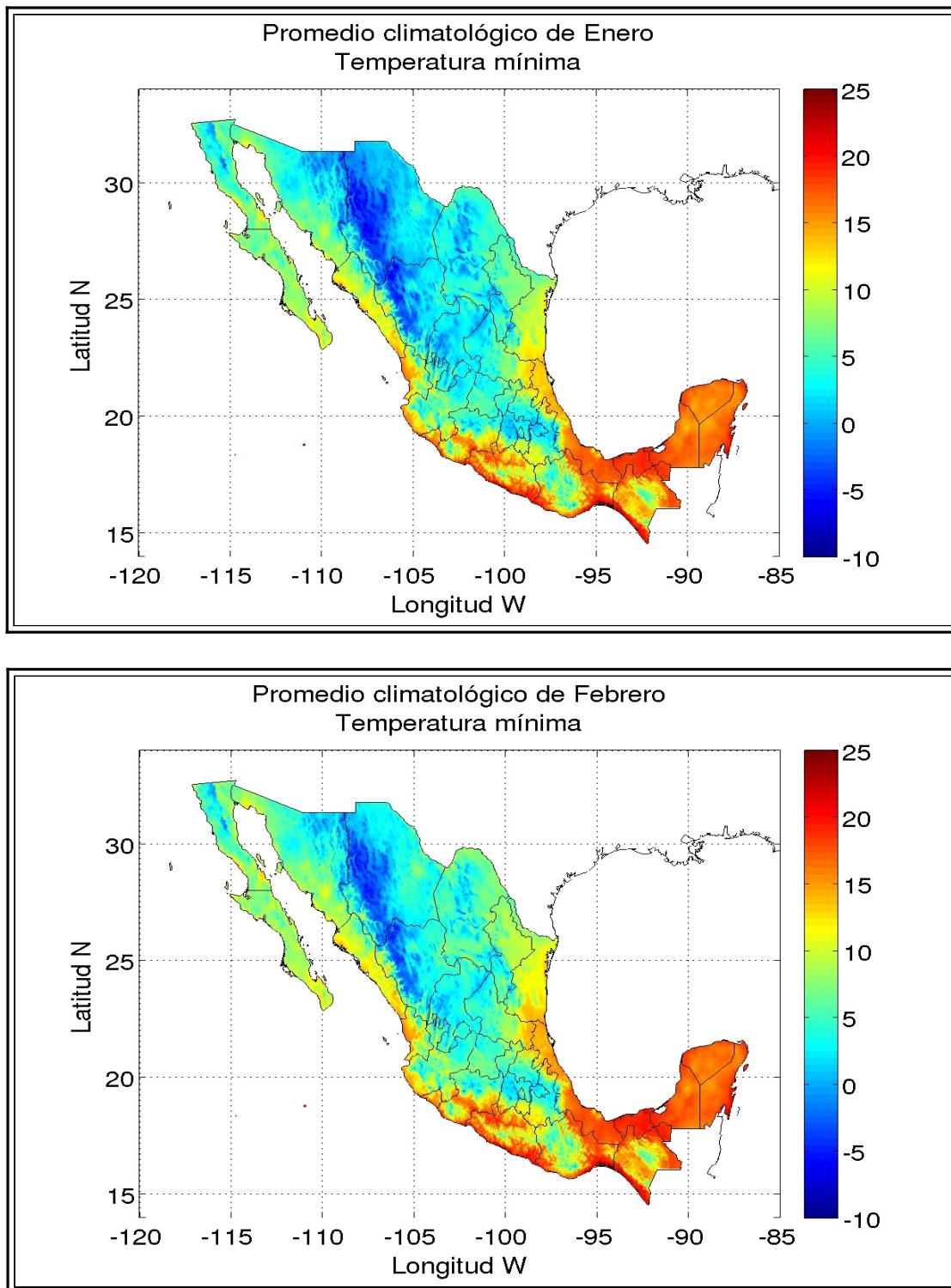


Figura 6.3.7: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura mínima (°C) para los meses de Enero (arriba) y Febrero (abajo) considerando el período de 1979-2009.

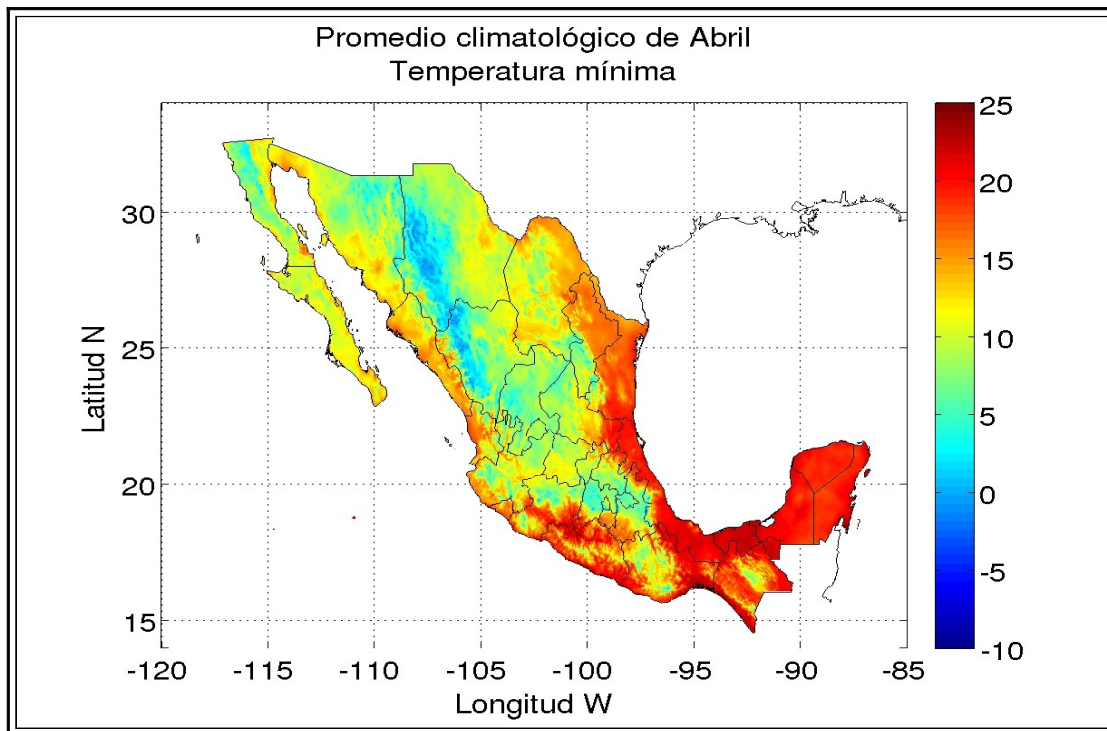
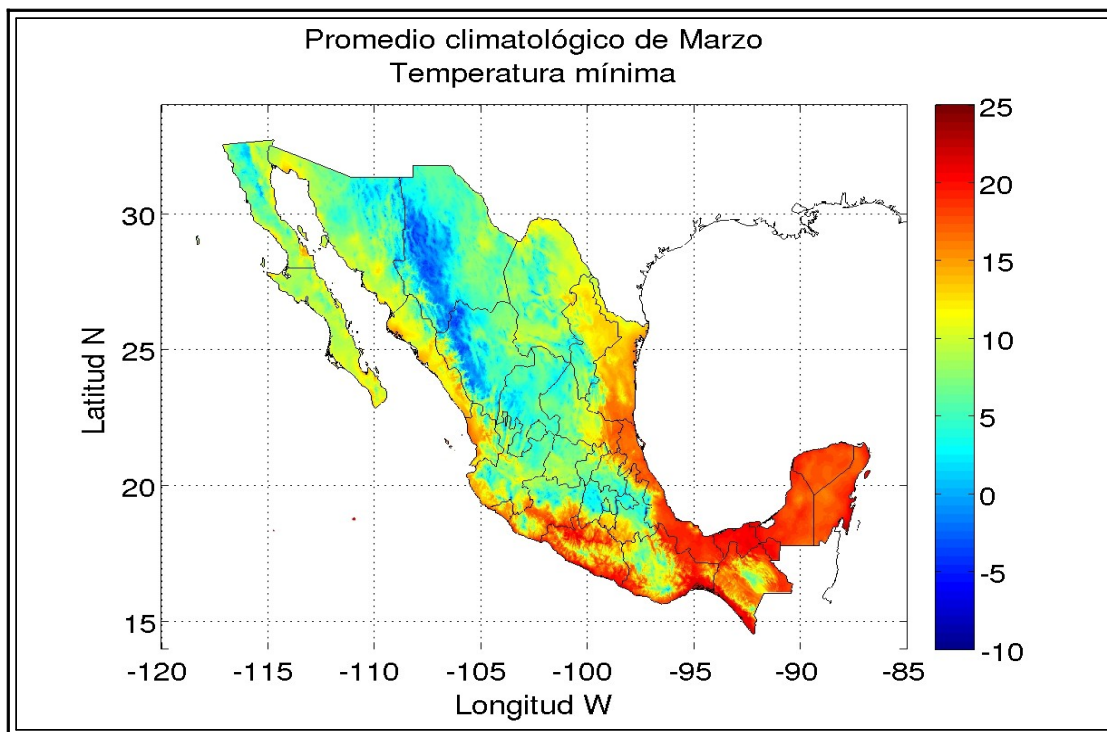


Figura 6.3.8: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura mínima (°C) para los meses de Marzo (arriba) y Abril (abajo) considerando el período de 1979-2009.

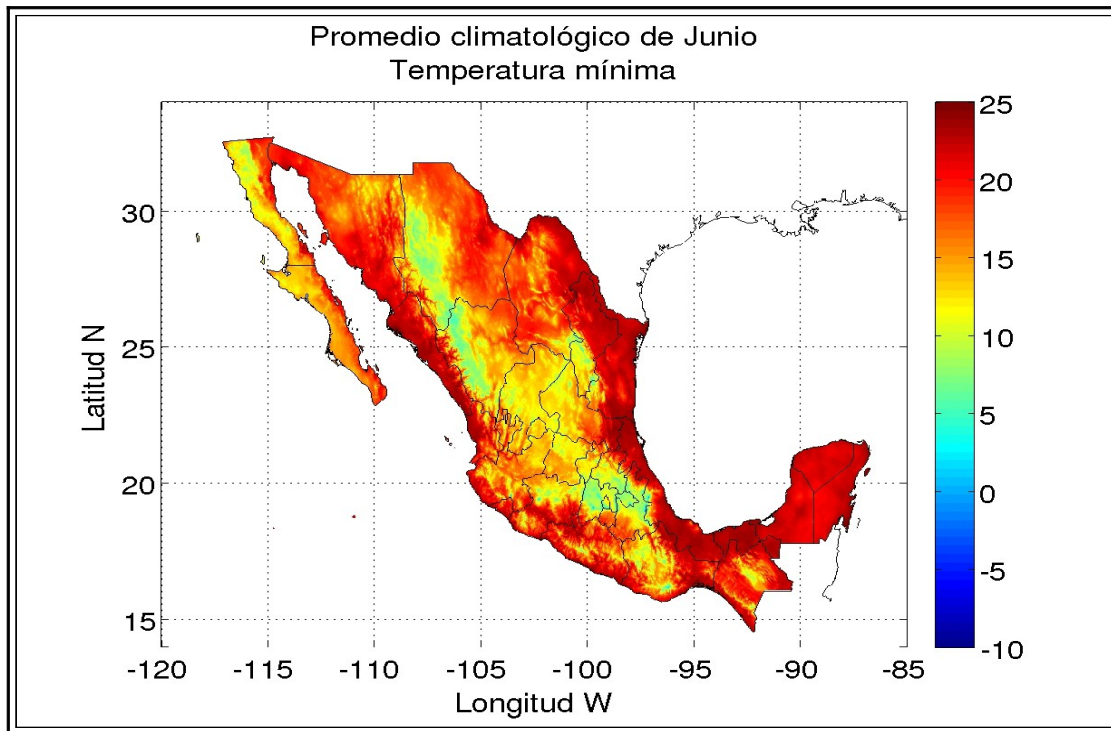
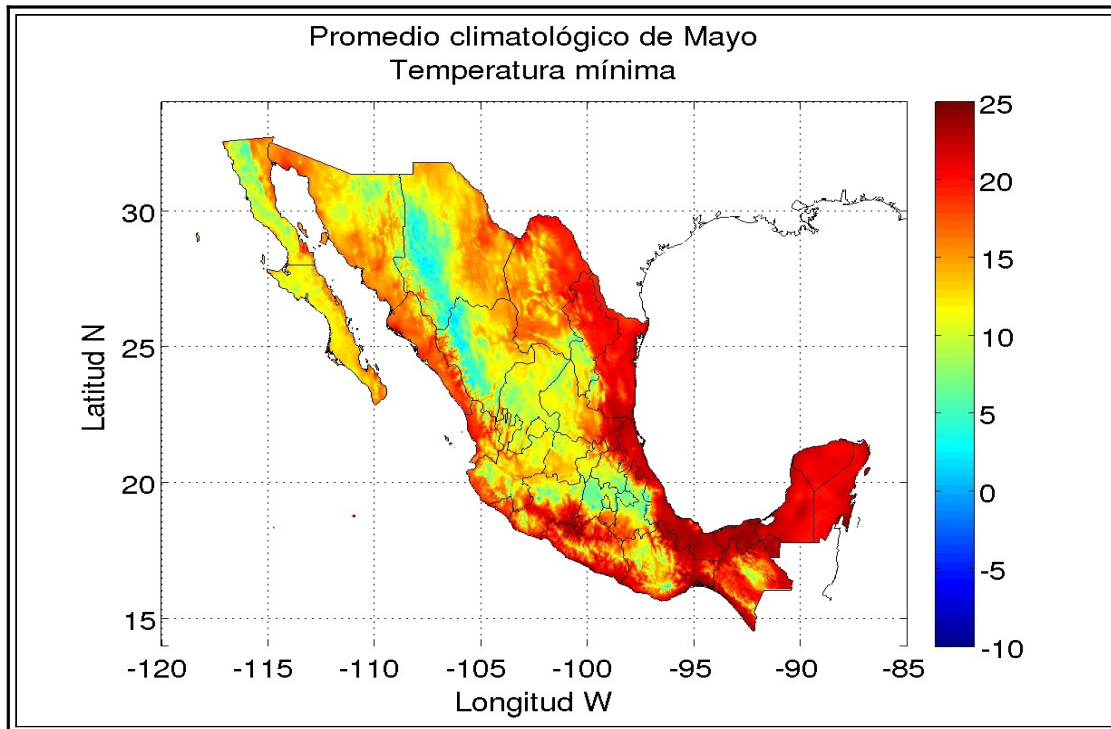


Figura 6.3.9: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura mínima (°C) para los meses de Mayo (arriba) y Junio (abajo) considerando el período de 1979-2009.

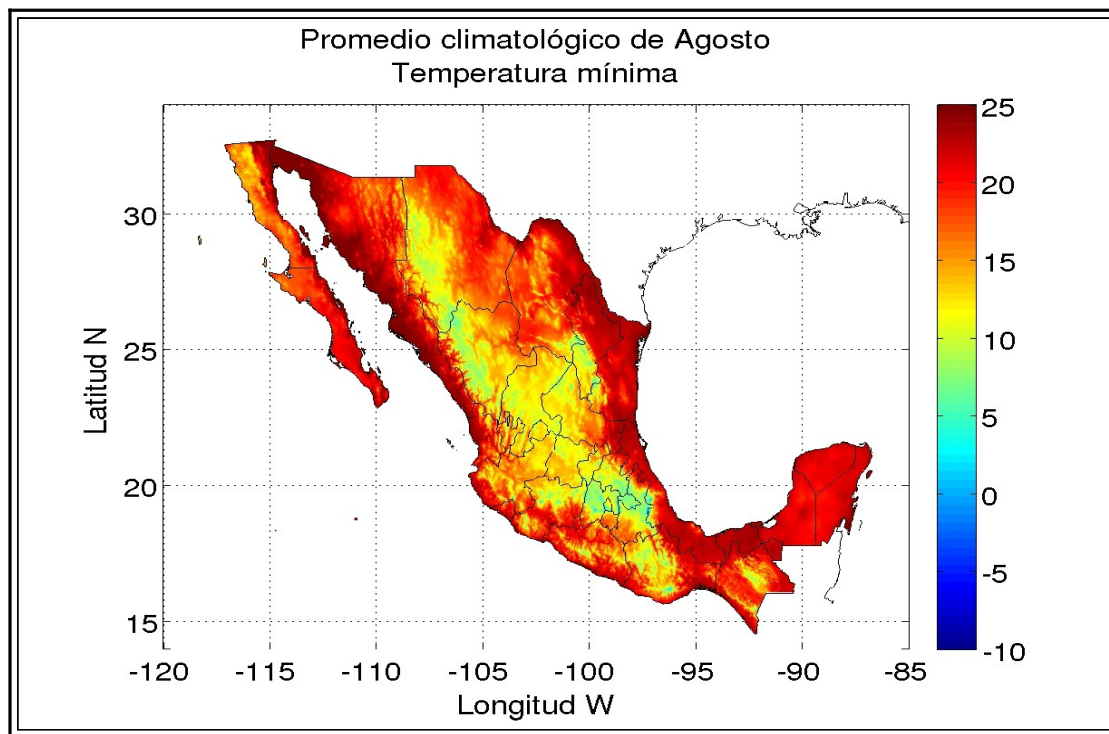
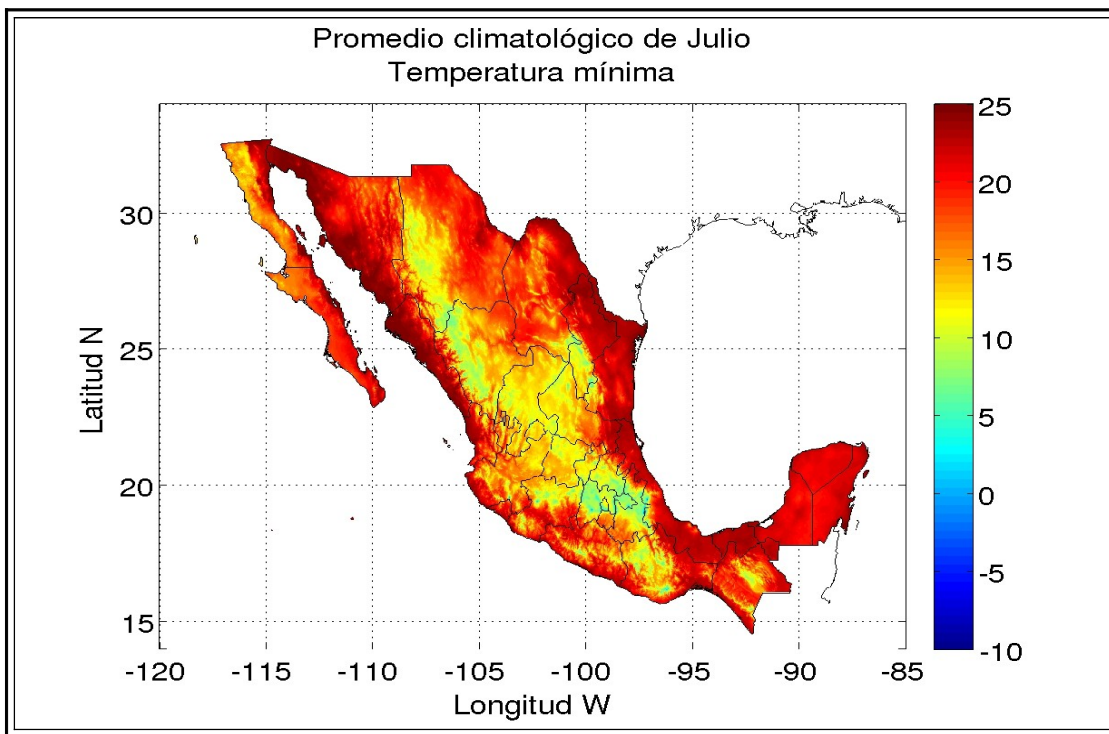


Figura 6.3.10: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura mínima (°C) para los meses de Julio (arriba) y Agosto (abajo) considerando el período de 1979-2009.

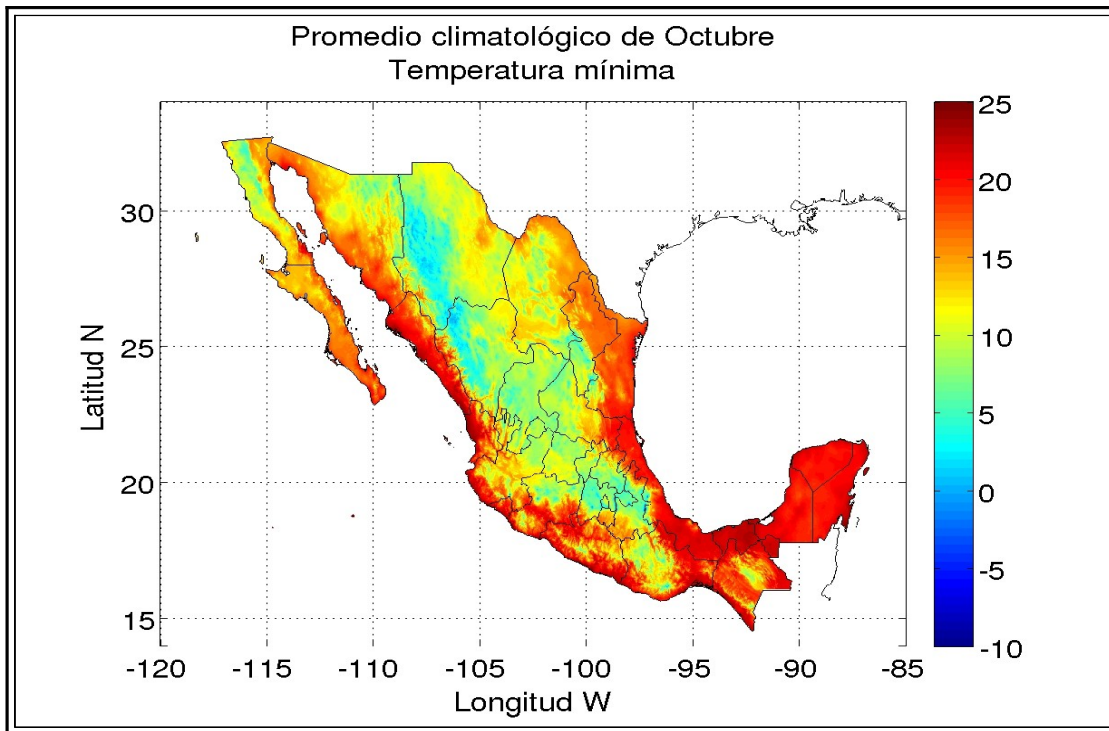
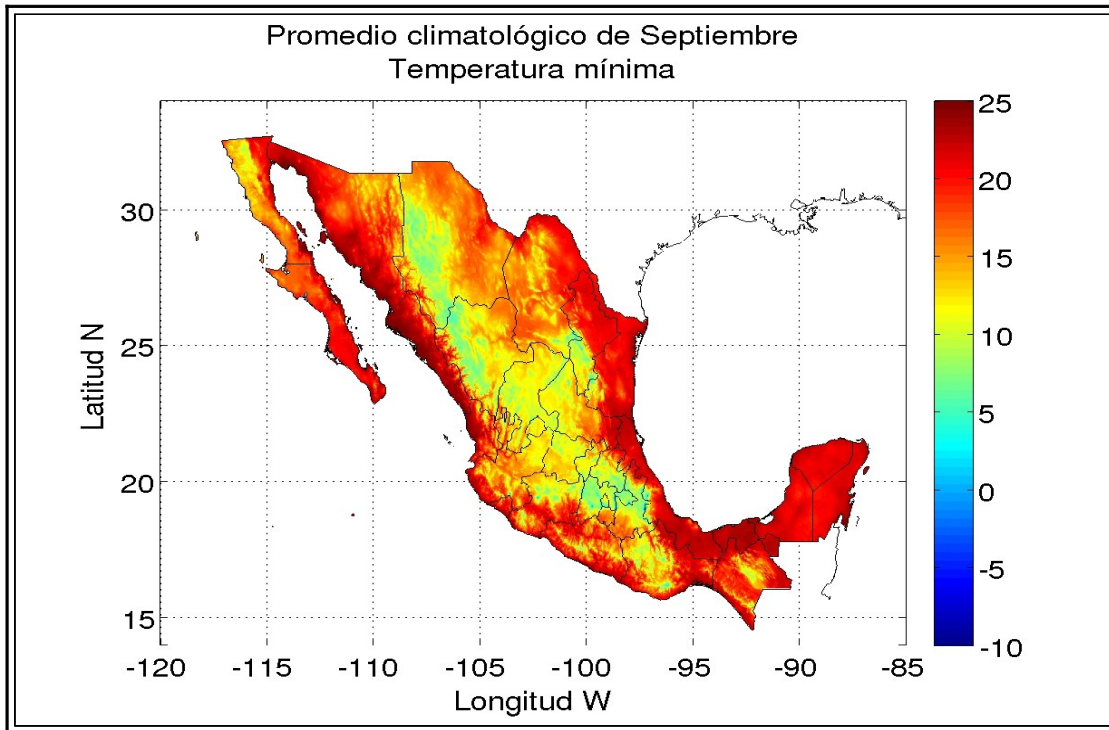


Figura 6.3.11: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura mínima (°C) para los meses de Septiembre (arriba) y Octubre (abajo) considerando el período de 1979-2009.

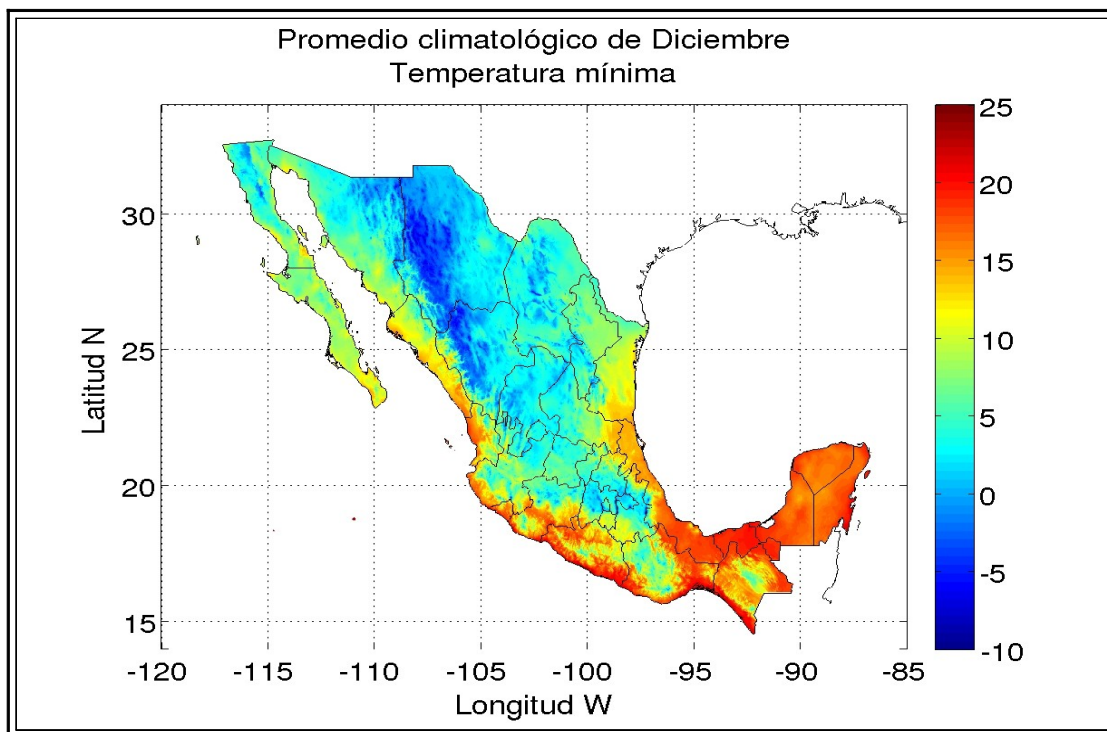
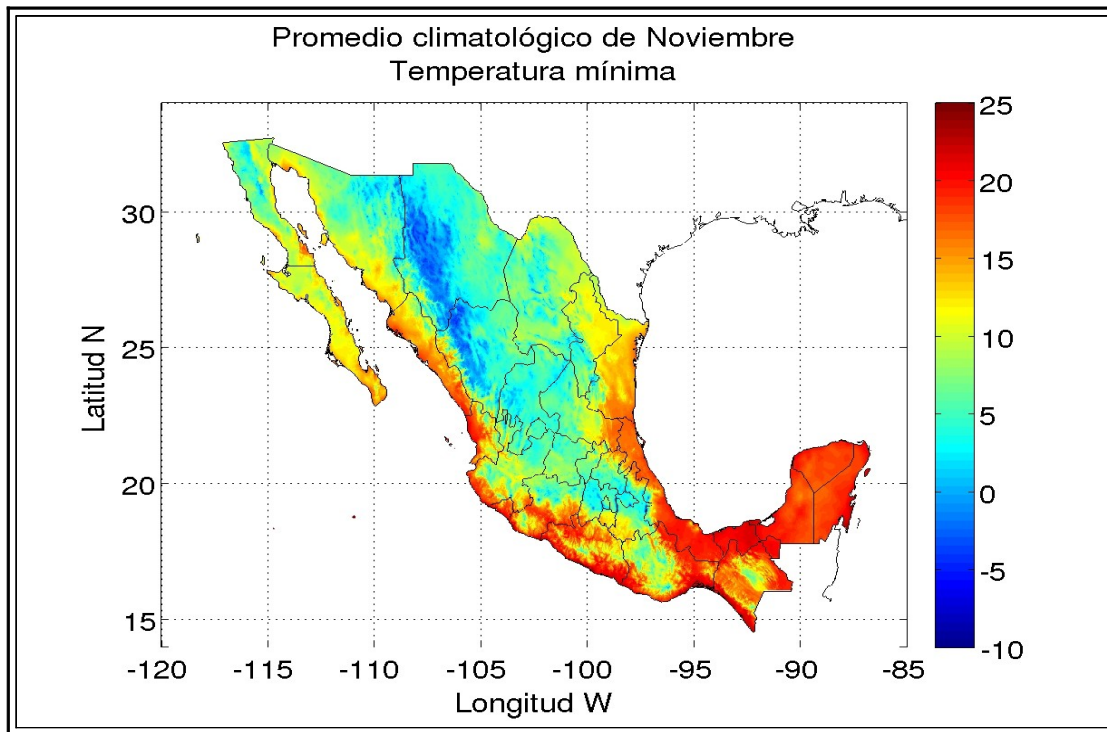


Figura 6.3.12: Promedios climatológicos mensuales de la temperatura mínima (°C) para los meses de Noviembre (arriba) y Diciembre (abajo) considerando el período de 1979-2009.

Capítulo 7

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO GENERADO Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

Una vez obtenidos los mapas diarios con alta resolución espacial de las temperaturas máximas y mínimas para la República Mexicana, se procedió a realizar una evaluación del producto generado mediante la comparación con las series de tiempo de datos observados en varias estaciones de la base del SMN. Para ello, se escogieron 12 estaciones que representaran distintos regímenes climáticos a lo largo del país y que tuvieran al menos el 50% de las observaciones en el período reconstruido: 4 en la región norte, 4 en la parte central y 4 en distintos estados del sureste mexicano. La tabla 7.1.1 muestra los datos generales de las estaciones seleccionadas y en el mapa de la figura 7.1.1 se muestra su ubicación. A continuación se describen las características geográficas y climáticas alrededor de los sitios donde se ubican cada una de las doce estaciones seleccionadas. Parte de la información en el lugar preciso de ubicación de las estaciones se obtuvo de <http://maps.google.com.mx/>.

7.1 Características geográficas y climáticas en los sitios seleccionados

Región Norte

26028 Sonora (Hermosillo): La estación se localiza a 2 horas de Hermosillo sobre un terreno plano, desértico y muy seco. Durante casi todo el año las temperaturas son calurosas, con un promedio anual de 25°C. Las temperaturas máximas extremas se presentan en los meses de Junio a Agosto, llegando a

alcanzar los 49°C, y las mínimas extremas, de hasta -3°C, se registran de Diciembre a Febrero. Lluve principalmente durante el monzón, que ocurre entre julio y septiembre, y registra una precipitación anual total de aproximadamente 365 mm. El invierno (entre Diciembre y Febrero) es agradable con noches frescas y días tibios; no escarcha ni nieva.¹⁴

8001 Chihuahua (Ascensión): La estación se encuentra aproximadamente a 200 m de una zona urbanizada, sobre un terreno plano y muy árido. El municipio de Ascensión está situado al norte del estado, en la región del desierto, con un clima árido extremoso y lluvias escasas. Se llegan a presentar temperaturas máximas extremas diarias superiores a los 46°C y mínimas extremas diarias por debajo de los -20°C; la precipitación promedio anual es de 200 a 300 mm.¹⁵

ID ESTACIÓN	ESTADO	MUNICIPIO Y NOMBRE	LON W	LAT N	ALT (m)
REGIÓN NORTE					
26028	SONORA	HERMOSILLO – EL CARRIZAL	-111.73	29.09	49
8001	CHIHUAHUA	ASCENSIÓN – ASCENSIÓN	-108.00	31.09	1300
5009	COAHUILA	CUATRO CIÉNEGAS – CUATRO CIÉNEGAS (DGE)	-102.07	26.97	730
19024	NUEVO LEÓN	ANÁHUAC – ANÁHUAC	-100.13	27.24	194
REGIÓN CENTRO					
15001	ESTADO DE MÉXICO	ACAMBAY - ACAMBAY	-99.84	19.95	2544
9029	DISTRITO FEDERAL	GUSTAVO A. MADERO – GRAN CANAL	-99.09	19.48	2239
21034	PUEBLA	PUEBLA – ECHEVERRÍA	-98.27	18.95	2066
29030	TLAXCALA	TLAXCALA – XICOTÉNCATL (DGE)	-98.24	19.32	2230
REGIÓN SURESTE					
27053	TABASCO	CENTLA - VICENTE GUERRERO	-92.88	18.39	6
4010	CAMPECHE	ESCÁRCEGA – ESCÁRCEGA	-90.74	18.60	80
31005	YUCATÁN	MUNA – C.I.A.P.Y.	-89.75	20.42	50
23012	QUINTANA ROO	SOLIDARIDAD – COBA	-87.73	20.48	5

Tabla 7.1.1: Datos de las doce estaciones seleccionadas de la base de datos del SMN para realizar la comparación con el producto generado.

14 <http://es.wikipedia.org/wiki/Hermosillo#Clima>

15 [http://es.wikipedia.org/wiki/Ascensi3n_\(municipio\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Ascensi3n_(municipio))

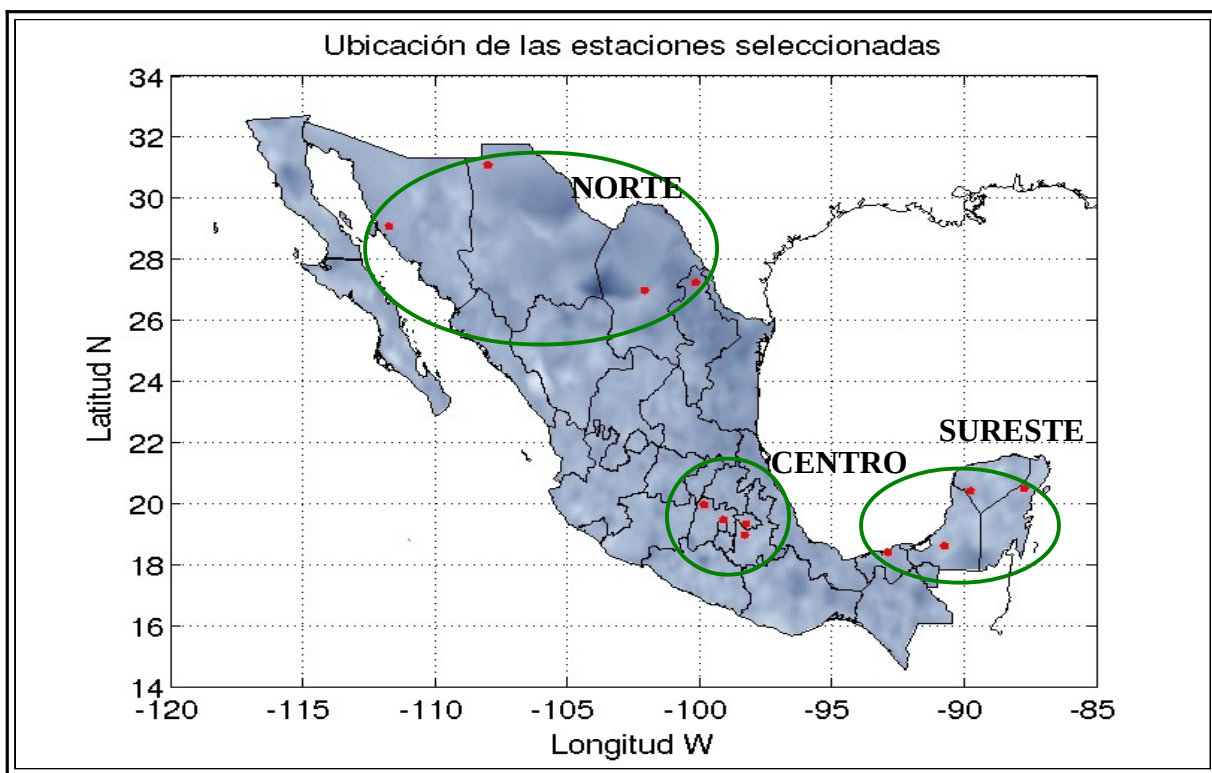


Figura 7.1.1: Ubicación de las estaciones seleccionadas en las regiones norte, centro y sureste del país.

5009 Coahuila (Cuatro Ciénegas): La estación se ubica sobre un terreno plano en un entorno estepario cálido. En general, el municipio presenta una temperatura media anual entre los 18°C y 22°C y precipitaciones durante los meses de Mayo, Junio, Julio, Noviembre, Diciembre y Enero, con una media anual entre los 100 y 200 mm. La frecuencia de las heladas es de 20 a 40 días y de uno a dos días con granizadas.¹⁶ Las temperaturas máximas extremas diarias que se han registrado en la estación rebasan los 44°C entre Mayo y Junio, mientras que las mínimas extremas diarias han alcanzado los -6°C entre Diciembre y Febrero.

19024 Nuevo León (Anáhuac): La estación se encuentra en una colonia urbanizada. El municipio donde se localiza posee un clima semidesértico, con lluvias escasas y temperatura extrema. La humedad es escasa en casi todas las estaciones del año. Las temperaturas más altas, que alcanzan de 44°C a 46°C, se presentan en los meses de Junio, Julio y Agosto, y las más bajas, de 2°C o menos, en Diciembre y Enero.¹⁷ El terreno de Anáhuac es mayoritariamente plano. Su hidrología se encuentra dominada por el

¹⁶ http://depuebloenpueblo.com.mx/ciudad/coahuila_cuatro-cienegas.html

¹⁷ [http://es.wikipedia.org/wiki/Anáhuac_\(Nuevo_León\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Anáhuac_(Nuevo_León))

río Salado que proviene del estado de Coahuila cruzando el municipio en direcciónnoroeste-sureste y continúa hacia Tamaulipas desembocando en el río Bravo. El río el Salado se encuentra aproximadamente a 1 km de la estación.

Región Centro

15001 Estado de México (Acambay): La estación se encuentra dentro de un gran terreno abierto y plano donde se practica la agricultura de temporal y está rodeado de pequeñas poblaciones. A unos 200 m al este se encuentra un gran terreno accidentado, no muy elevado, con bosque de coníferas y encino. El clima del municipio está clasificado como templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de aproximadamente 14°C, con máximas mensuales entre Marzo y Junio que alcanzan a rebasar los 30°C, y mínimas mensuales de Noviembre a Febrero con valores por debajo de 0°C.¹⁸

9029 Distrito Federal (Gustavo A. Madero): La estación se encuentra en una zona totalmente urbanizada y muy poblada de la ciudad de México. La delegación Gustavo A. Madero se encuentra al norte del Distrito Federal, con un territorio que es en su gran mayoría plano y en la parte de la sierra de Guadalupe es accidentado. El uso del suelo en la delegación es habitacional, industrial y comercial. La temperatura media anual es de aproximadamente 15°C, con máximas extremas diarias que pueden rebasar los 34°C de Marzo a Junio y mínimas extremas diarias por debajo de los -3°C de Noviembre a Febrero.¹⁹

21034 Puebla (Puebla): El municipio de Puebla se encuentra en la región centro-oeste del Estado de Puebla. La estación se encuentra al sur, en las afueras de la ciudad de Puebla, sobre un terreno abierto, plano, no urbanizado, con escasa vegetación y muy cerca del río Atoyac. El clima de la región se clasifica como templado subhúmedo con lluvias en verano, el cual está regulado por la altitud. El promedio anual de la temperatura es de aproximadamente 17°C, alcanzando máximas extremas de entre 35°C y 36.5°C entre Marzo y Mayo, y mínimas extremas de hasta -6°C en el invierno. La ciudad de Puebla está delimitada por varias cadenas de cerros como la Sierra Mixteca, en el sur del estado, por la Sierra Nevada al poniente; la Sierra Madre Oriental al este; y al norte el Volcán Malintzin. La vegetación de la ciudad se ha degradado debido a la alta deforestación y pastoreo.²⁰

18 <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=pdzp&ent=15&mun=001;>
<http://www.smn.conagua.gob.mx>

19 <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM09DF/delegaciones/09005a.html>;
<http://www.smn.conagua.gob.mx>

20 http://es.wikipedia.org/wiki/Puebla_de_Zaragoza

29030 Tlaxcala (Tlaxcala): La estación se encuentra en una zona urbanizada, dentro de un lote frente al cual pasa el río Atoyac. El municipio al que pertenece es mayoritariamente plano y urbanizado, forma parte del Valle de Puebla-Tlaxcala, pero con algunas formaciones de relieve principalmente en el extremo norte del territorio, donde se encuentran el Cerro Ostos de 2,460 msnm y el Cerro Tepepan de 2,320 msnm. En el municipio de Tlaxcala el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, aunque en el extremo norte hay mayor humedad que en el resto del territorio. Los meses más calurosos van de Marzo a Junio, con temperaturas máximas diarias que pueden rebasar los 34°C, y los más fríos van de Noviembre a Febrero, con mínimas diarias que pueden rebasar los -4°C.²¹

Región Sureste

27053 Tabasco (Centla): La estación se ubica sobre un terreno de tipo sabana tropical (donde existen plantas pequeñas llamadas herbáceas y arbustos), abierto y plano. Aproximadamente un kilómetro al sur se encuentra el lago Santa Anita y alrededor de 6.5 km hacia el norte está el Golfo de México. Los terrenos de sabana tropical son utilizados para actividades agrícolas de roza (eliminación de la parte superior de la vegetación), quema y tala de algunas especies. Parte del municipio de Centla cuenta con depresiones pantanosas y anegadizas (que se inundan con frecuencia), tanto por la avenida de los ríos como por las aguas que traen perturbaciones ciclónicas y las abundantes lluvias. El suelo del municipio se beneficia por contar con los ríos Grijalva y Usumacinta. En general, el municipio posee un clima tropical con lluvias regulares durante 6 meses y alcanza temperaturas máximas diarias de 42°C durante la primavera-verano y mínimas de 12°C en invierno.²²

4010 Campeche (Escárcega): La estación se localiza dentro de una colonia urbanizada con construcciones en su mayoría de uno o dos niveles y donde abundan los árboles no muy altos. En general, el municipio de Escárcega posee un clima clasificado como cálido subhúmedo con lluvias en verano, registrándose una temperatura media anual superior a los 26°C en la mayor parte de la región y precipitaciones que van de alrededor de 1,500 mm anuales en la parte occidental a alrededor de 1,100 mm en la parte oriental. Más del 70% del municipio está cubierto por selva, con un terreno fundamentalmente plano. La práctica de agricultura nómada (actividades agrícolas que se mueven de lugar por temporadas) ha ocasionado deforestación y daño ecológico en la región.²³

21 [http://es.wikipedia.org/wiki/Tlaxcala_\(municipio\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Tlaxcala_(municipio))

22 [http://es.wikipedia.org/wiki/Centla_\(municipio\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Centla_(municipio))

23 [http://es.wikipedia.org/wiki/Escárcega_\(municipio\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Escárcega_(municipio))

31005 Yucatán (Muna): La estación se encuentra dentro de un terreno abierto y plano que es utilizado para la siembra. El lugar se encuentra rodeado de grandes extensiones de selva caducifolia (pierden sus hojas en época seca). El municipio posee suelo cementado o rocoso. No cuenta con corrientes superficiales de agua, por lo que en el subsuelo se forman depósitos llamados cenotes. El municipio tiene un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 25.5°C y una precipitación media anual de aproximadamente 70 mm. Las temperaturas máximas extremas diarias pueden rebasar los 43°C entre Marzo y Junio y las mínimas diarias pueden ser menores a 5°C de Noviembre a Marzo. Los vientos predominantes provienen del noreste.²⁴

23012 Quintana Roo (Solidaridad): La estación se ubica dentro de un terreno selvático, que es particularmente valioso para la explotación forestal debido a la presencia de maderas preciosas como la caoba y el cedro. El clima del municipio es cálido subhúmedo con lluvias en verano, presentando una temperatura media anual de 26°C. Los meses más fríos son de diciembre a marzo, con temperaturas mínimas diarias de hasta 7°C, y los más cálidos son de Mayo a Septiembre, con temperaturas máximas diarias de hasta 39°C. El clima se ve afectado por los ciclones o huracanes, que aumentan la precipitación en verano.²⁵ La superficie del suelo está formada por roca calcárea que no permite que se formen corrientes de agua superficiales, sino que las aguas se trasminan al subsuelo donde se forman ríos subterráneos que afloran a la superficie como cenotes y junto con varias lagunas son los principales cuerpos de agua del municipio.²⁶

7.2 Evaluación del producto generado

Se realizó una comparación entre las series de tiempo de los datos observados de las temperaturas máximas y mínimas en las estaciones descritas en la sección anterior y las obtenidas a partir de los mapas diarios generados, las cuales se obtuvieron mediante la interpolación lineal de los datos sobre las coordenadas de los sitios donde se ubican dichas estaciones.

En las figuras 7.2.1 a 7.2.3 se muestran las gráficas de comparación entre las series de tiempo de las temperaturas máximas, así como la diferencia entre ambas, y en las figuras 7.2.4 a 7.2.6 se muestran las comparaciones correspondientes a las temperaturas mínimas. De las 12 estaciones seleccionadas, el producto presenta una correlación significativa ($\alpha = 0.05$) superior a 0.90 en el 60% de los casos para las

24 <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM31yucatan/municipios/31053a.html>

25 <http://www.solidaridad.gob.mx/2013/index.php/informacion/medio-fisico>

26 [http://es.wikipedia.org/wiki/Solidaridad_\(municipio\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Solidaridad_(municipio))

series de temperatura máxima y de 75% para las de temperatura mínima (Tabla 7.2.1). La correlación más baja en el caso de la temperatura máxima se obtuvo para la estación 23012 (Q.R.), con 0.62, y de la temperatura mínima para la estación 15001 (Mex.), con 0.79. Varios indicadores del desempeño del producto, como el error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (ver la sección 5.3.1), se presentan en la Tabla 7.2.1. En general, los valores obtenidos son pequeños, indicando el buen desempeño del producto para representar las variaciones de las temperaturas máximas y mínimas en distintas regiones del país.

ESTACIÓN	CORRELACIÓN		MAE		RMSE	
REGIÓN NORTE						
	TMax	TMin	TMax	TMin	TMax	TMin
26028 Sonora	0.99	0.99	0.55	0.86	0.96	1.27
8001 Chihuahua	0.99	1	0.43	0.41	1.09	0.84
5009 Coahuila	0.94	0.96	1.35	1.71	2.45	2.63
19024 Nvo. León	0.99	1	0.52	0.41	1.10	0.68
REGIÓN CENTRO						
	TMax	TMin	TMax	TMin	TMax	TMin
15001 Edo. Méx.	0.73	0.79	1.75	1.47	2.38	2.08
9029 D.F.	0.88	0.95	1.23	0.90	1.63	1.23
21034 Puebla	0.88	0.92	0.76	1.44	1.21	2.18
29030 Tlaxcala	0.95	0.96	0.78	1.18	1.06	1.50
REGIÓN SURESTE						
	TMax	TMin	TMax	TMin	TMax	TMin
27053 Tabasco	0.94	0.94	0.84	0.82	1.56	1.36
4010 Campeche	0.97	0.93	0.81	0.69	1.18	1.07
31005 Yucatán	0.89	0.91	1.30	1.09	1.96	1.80
23012 Q. Roo	0.62	0.83	1.21	1.02	3.88	2.68

Tabla 7.2.1: Estadísticos calculados para evaluar el desempeño del producto generado, tanto para las temperaturas máximas (TMax) como las mínimas (TMin): Coeficiente de correlación, error absoluto medio (MAE) y raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Los valores de la Tabla 7.2.1 indican que en la región norte el producto representó menos bien las observaciones de la estación 5009 en Coahuila; en la región centro, las de la estación 15001 en el Edo. de México y en la región sureste, las de la estación 23012 en Quintana Roo.

Temperatura máxima de la región norte.

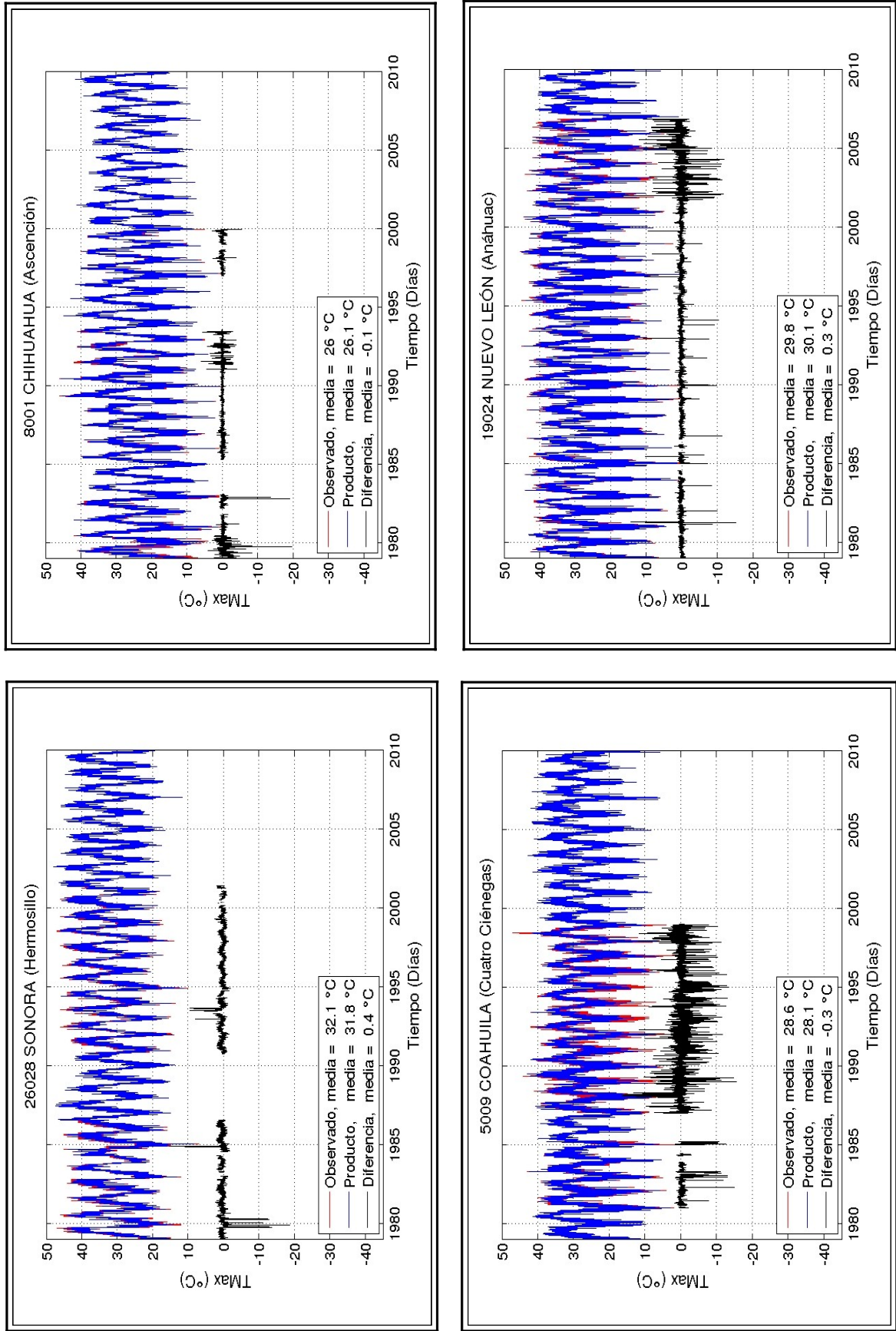


Figura 7.2.1: Comparación entre la serie de temperaturas máximas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Norte. La línea negra representa la diferencia entre ambas series.

Temperatura máxima de la región centro.

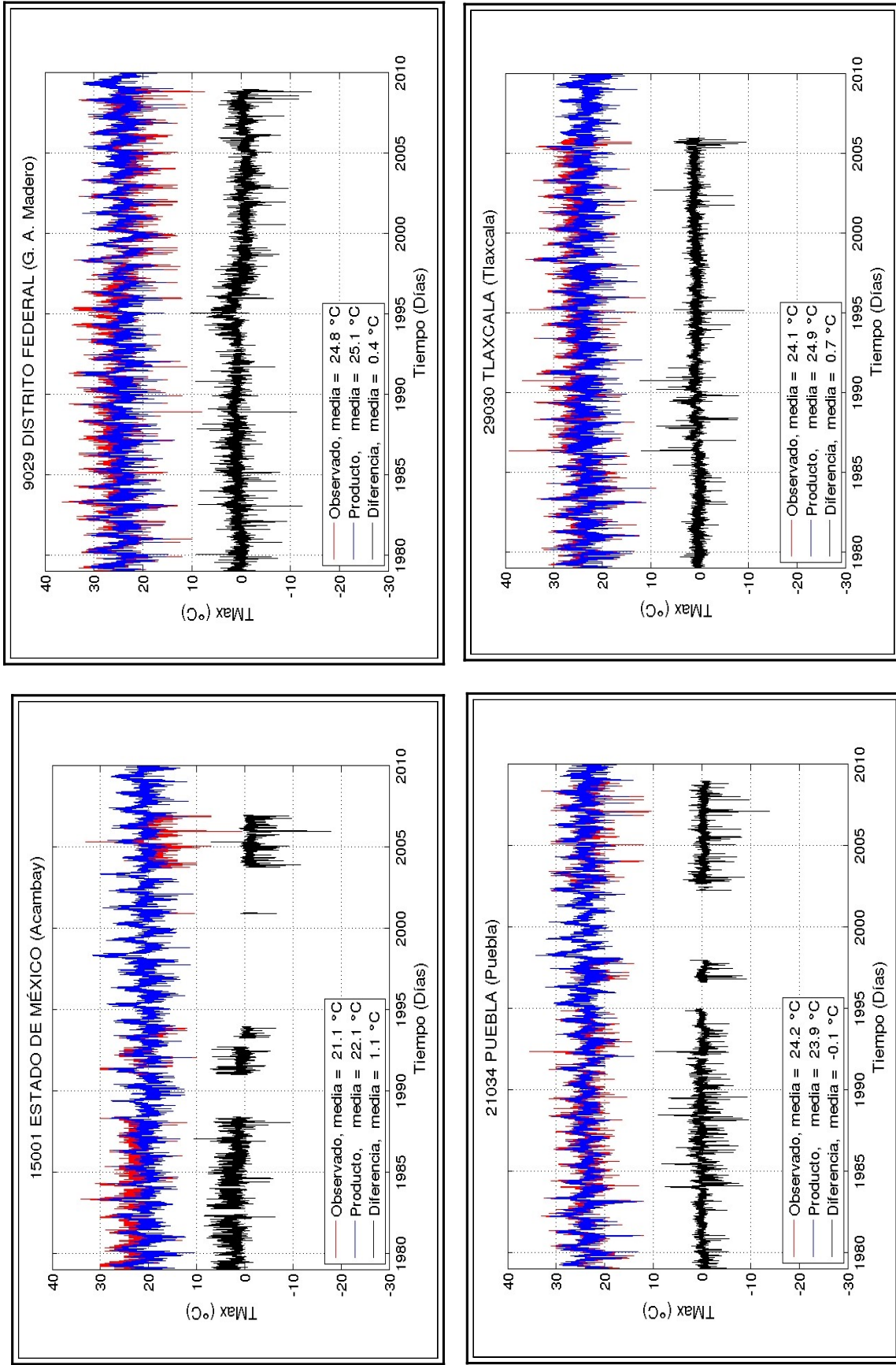


Figura 7.2.2: Comparación entre la serie de temperaturas máximas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Centro . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.

Temperatura máxima de la región sureste.

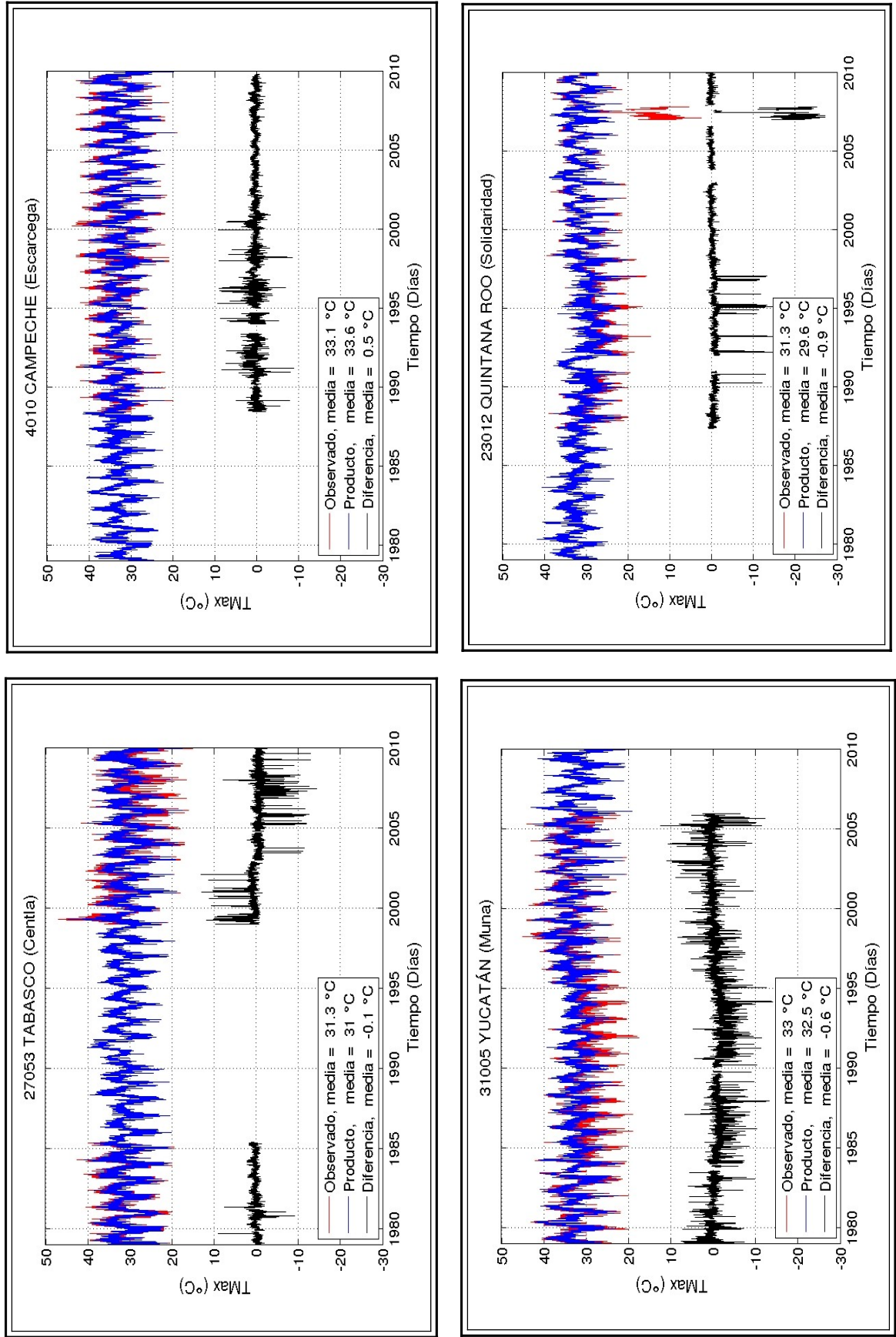


Figura 7.2.3: Comparación entre la serie de temperaturas máximas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Sureste . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.

Temperatura mínima de la región norte.

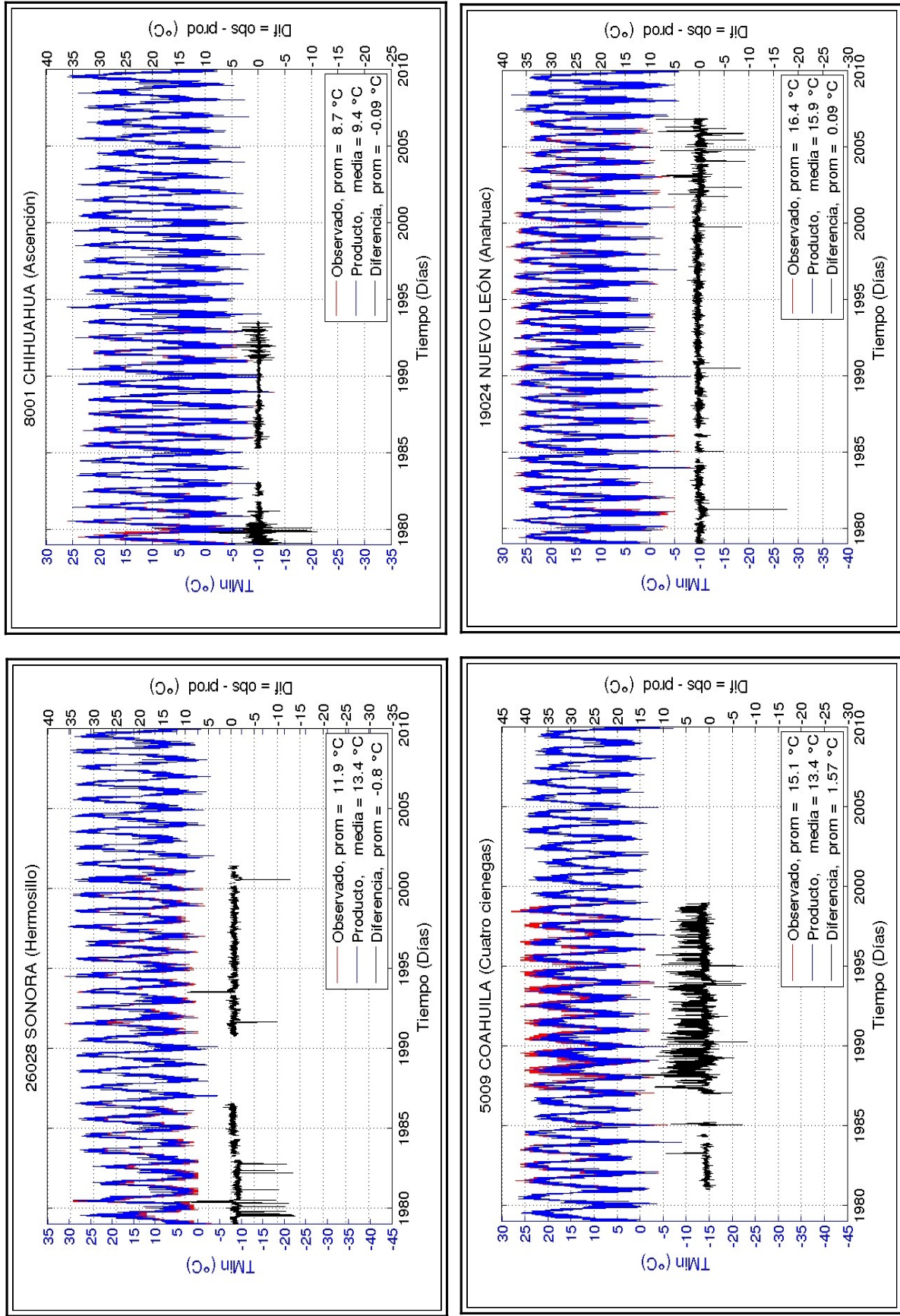


Figura 7.2.4: Comparación entre la serie de temperaturas mínimas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Norte . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.

Temperatura mínima de la región centro.

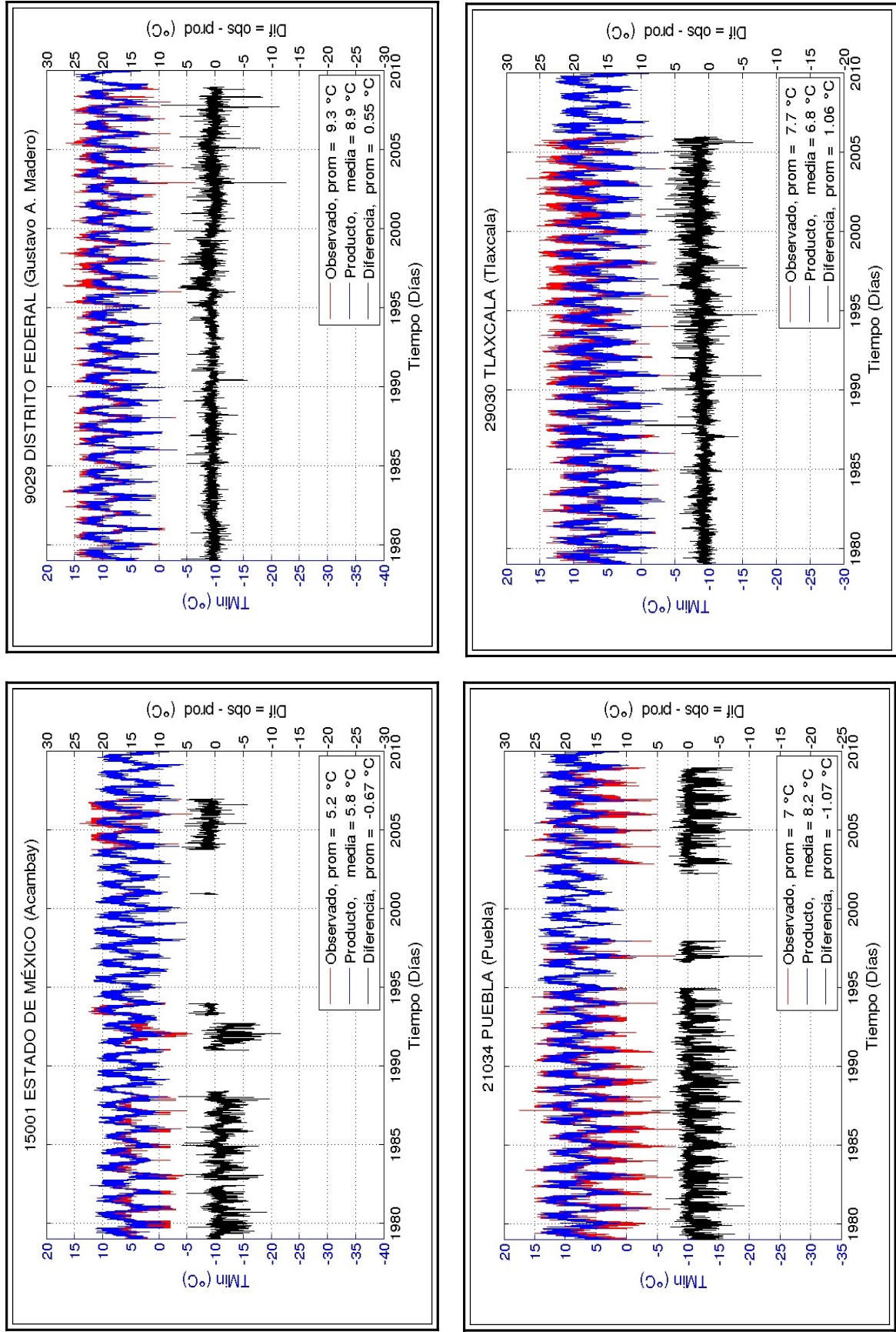


Figura 7.2.5: Comparación entre la serie de temperaturas mínimas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Centro . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.

Temperatura mínima de la región sureste.

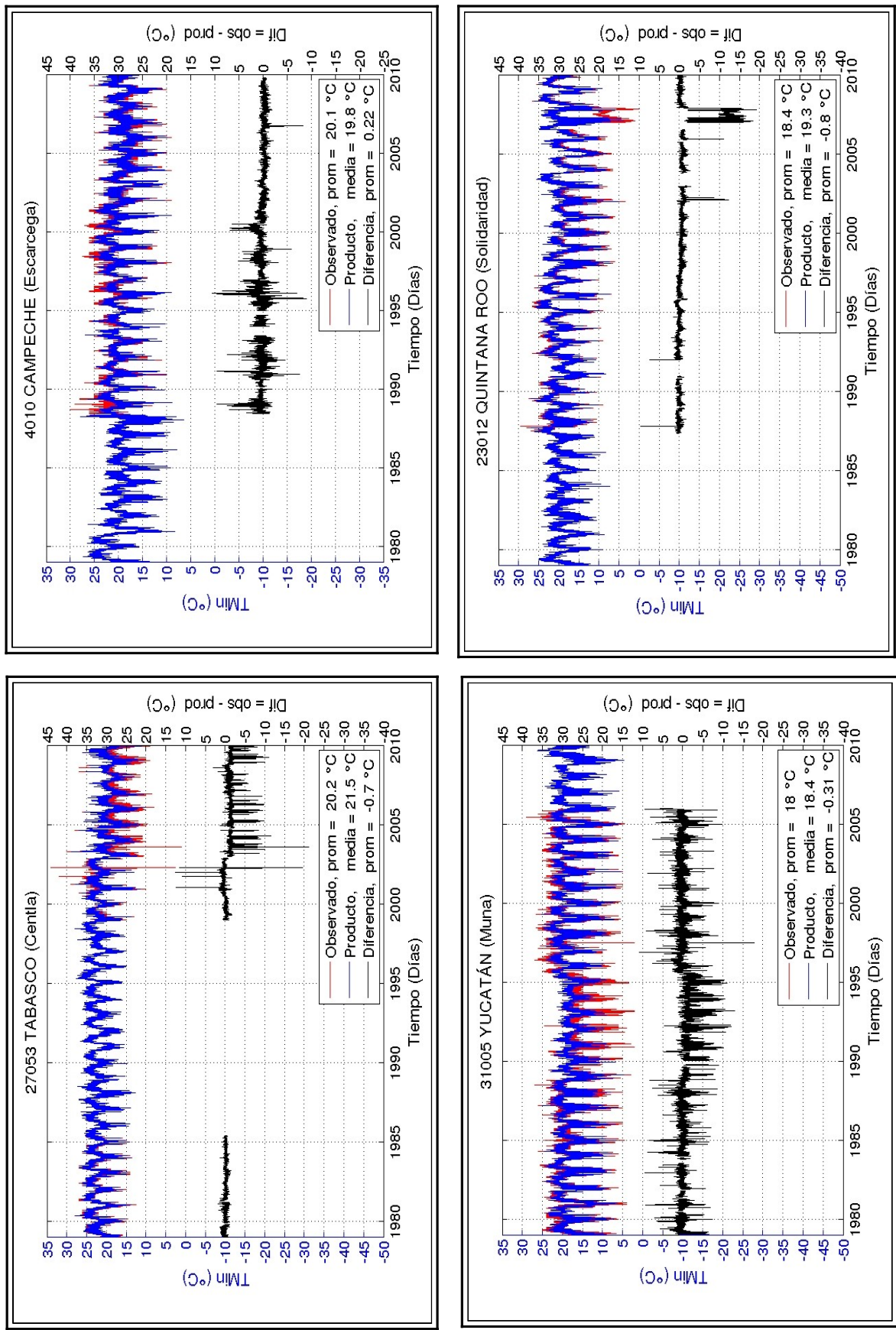


Figura 7.2.6: Comparación entre la serie de temperaturas mínimas obtenidas con el producto generado (en azul) y las observaciones (en rojo) para las estaciones de la región Sureste . La línea negra representa la diferencia entre ambas series.

En términos generales, las gráficas de comparación entre las series de tiempo observadas y las obtenidas con el producto generado, muestran los siguientes aspectos:

- 1) El producto reproduce adecuadamente los valores observados, como en las estaciones 19024 (N.L.) y 26028 (Son.).
- 2) El producto subestima los valores observados, como en buena parte de las series de las estaciones 9014 (D.F.) y 29030 (Tlx.), o los sobrestima, como en algunos intervalos de las series de la estación 31005 (Yuc.).
- 3) El producto “corrige” errores en las observaciones, como en el caso de la estación 23012 (Q.R.) durante el 2007 (el valor bajo del coeficiente de correlación y alto del RMSE en la Tabla 7.2.1 son un reflejo de tales errores);
- 4) Las estaciones tienen registros dudosos que influyen de manera importante en el producto obtenido, como en el caso de las temperaturas mínimas de la estación 27053 (Tab.) a partir del año 2003, donde se observa un corrimiento de los datos hacia valores más bajos comparados con los registros anteriores.
- 5) El producto puede presentar un comportamiento ligeramente distinto al mostrado por los registros observados, sobre todo en cuanto a la amplitud y fase del ciclo anual, en los intervalos en los que no hay observaciones, como se puede apreciar en la serie de temperatura máxima de la estación 27053 (Tab.) y de temperatura mínima de la estación 4010 (Camp.).

Puede notarse que en algunos casos en donde el producto subestima o sobrestima a los datos observados, estos coinciden con períodos en los que las observaciones están desplazadas hacia valores más altos o más bajos que el resto de los registros (ver por ejemplo la Fig. 7.2.6 para el caso de la temperatura mínima de Tabasco). Esto se debe a que el procedimiento toma en cuenta la información de estaciones vecinas para obtener el valor interpolado en cada punto y de esta manera compensa, hasta cierto grado, esos corrimientos en los datos. Se debe señalar que no se cuenta con información adicional para saber la razón de estas alteraciones en los registros.

Entre los factores que afectan el desempeño del producto generado podemos mencionar los siguientes:

- ◆ No existen estaciones de medición en amplias zonas de la península de Baja California y de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Tamaulipas, Campeche y Quintana Roo, y hay poca densidad de estaciones en algunas regiones de San Luis Potosí, Michoacán, Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Tabasco.

- ◆ Existe una gran cantidad de registros dudosos o erróneos.
- ◆ Existen huecos en las series de tiempo..

Aún cuando los datos del NARR pueden ser de utilidad en las zonas donde no se tienen estaciones (recordemos que la resolución espacial del NARR es de aproximadamente 32 km), el procedimiento seguido asigna un peso importante a los sitios en donde sí hay observaciones, por lo cual resulta un problema el hecho de no tener observación o de tener un valor erróneo. También hay que tomar en cuenta que los métodos de interpolación suavizan y que el procedimiento implementado incluye un suavizado adicional para tratar de remover observaciones dudosas (ver la sección 5.2.1). A pesar de esto, se logró obtener un producto de alta resolución espacial y temporal que reproduce adecuadamente las observaciones, completa la información diaria de manera razonable para el período elegido y sirve para detectar errores en las observaciones. Cabe señalar que esta es la primera versión del producto y que se seguirá depurando el procedimiento para lograr mejores resultados al eliminar y corregir de forma automática valores erróneos en los datos e implementar un método eficiente para la revisión de datos dudosos.

7.3 Análisis del ciclo estacional

Con el objeto de analizar las distribuciones mensuales y el ciclo estacional de las temperaturas máximas y mínimas en las distintas regiones del país, se graficaron los diagramas de caja (ver sección 5.3.2) para los sitios correspondientes a las 12 estaciones seleccionadas, considerando las series de tiempo completas obtenidas mediante la interpolación del producto generado en los puntos de localización de las estaciones (Figs. 7.3.1 a 7.3.6). Se graficaron juntos los diagramas de caja de los doce meses del año para cada uno de los sitios.

7.3.1 *Temperatura máxima*

Región Norte.- En general, en la parte norte los sitios muestran distribuciones de temperatura máxima con un claro ciclo estacional, en donde los valores más altos se alcanzan entre Junio y Agosto y los más bajos en Diciembre y Enero (Fig. 7.3.1). En comparación con los meses de verano, las distribuciones muestran rangos intercuartiles más grandes y amplitudes de variación mayores durante otoño e invierno. Asimismo, se observa que, en general, las distribuciones mensuales presentan una asimetría o sesgo

negativo (cuyo valor es ligeramente mayor de Agosto a Octubre), con excepción de la estación 26028 (Son.) que muestra pequeños sesgos positivos durante los primeros meses del año. En los sitios ubicados en zonas bajas de Sonora y Nuevo León se observan temperaturas máximas superiores a los 47°C en los meses más cálidos, en los cuales los valores de las medianas se encuentran aproximadamente entre 38°C y 39°C. Se puede notar que en el sitio correspondiente a la estación 19024 (N.L.), que se encuentra a una altura de 194 m, hay valores atípicos muy cercanos a 0°C durante el invierno, semejante a lo que se observa en la estación 8001 (Chih.) localizada a una latitud mayor y una altura de 1,300 m, lo anterior debido a la influencia de los frentes fríos en esa región.

Región Centro.- El ciclo anual en los sitios ubicados en el centro del país, cuyas alturas sobre el nivel del mar se encuentran aproximadamente entre los 2,000 y 2,500 m, es diferente al observado en las estaciones del norte. En este caso, las temperaturas máximas más altas se alcanzan en los meses de Abril y Mayo, con valores que llegan a superar los 33°C, y disminuyen al empezar la temporada de lluvias en Junio (Fig. 7.3.2). La disminución de las temperaturas máximas hacia el invierno es muy paulatina, observándose valores de la mediana muy parecidos de Julio a Noviembre y rangos intercuartiles más angostos que en primavera, de entre 1.6° y 2.5°C. Los meses de primavera son los que presentan los rangos intercuartiles más grandes, superiores a los 3°C, y los sesgos más pequeños. Las distribuciones de la temperatura máxima en las estaciones del centro muestran, en general, sesgos negativos con valores mayores durante los meses de otoño-invierno y distribuciones prácticamente simétricas en el mes de Junio.

Región Sureste.- Generalmente, las temperaturas máximas en los sitios de la región sureste del país (cuyas alturas se encuentran entre 5 y 80 msnm) se presentan en el mes de Mayo, alcanzándose valores superiores a los 43°C que disminuyen al establecerse la temporada de lluvias (Fig. 7.3.3). Las distribuciones durante los meses de Julio y Agosto son similares, con valores de la mediana entre 33° y 34°C en los cuatro sitios, aunque presentan algunas diferencias en cuanto al sesgo o asimetría. A diferencia de lo observado en las estaciones del centro del país, las temperaturas máximas en esta región muestran un descenso más marcado hacia los meses de invierno. En general, en comparación con los meses de verano, los rangos intercuartiles son más amplios durante el invierno y principios de la primavera y la dispersión de las distribuciones es mayor, llegando a tener rangos de variación de más de 20°C.

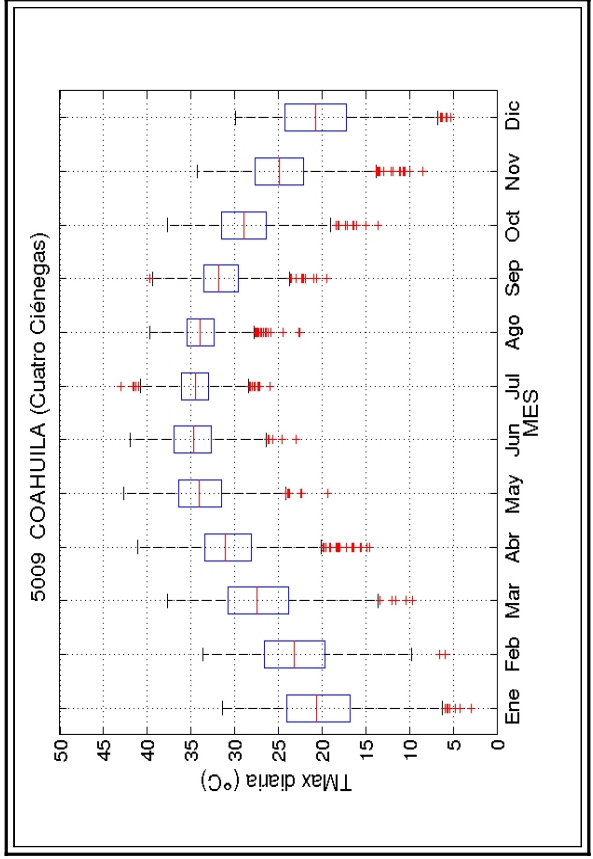
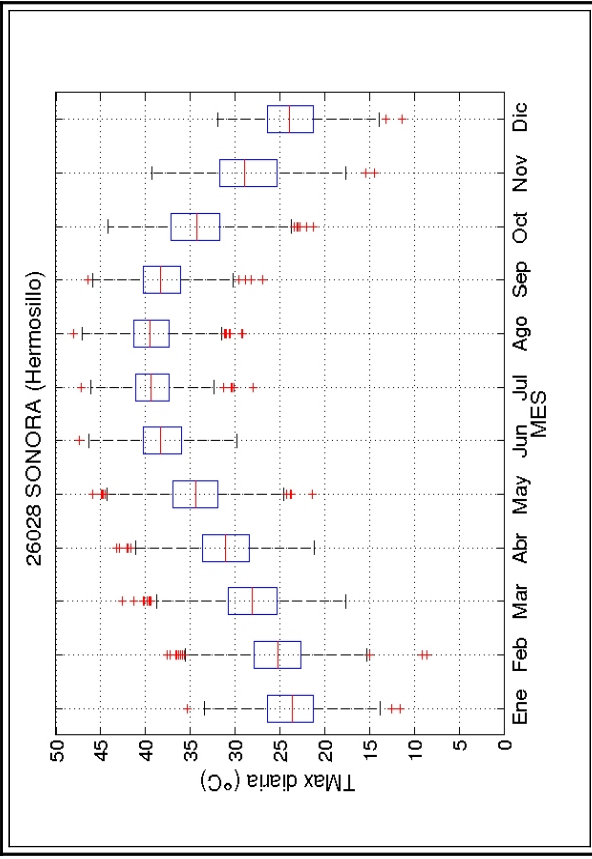
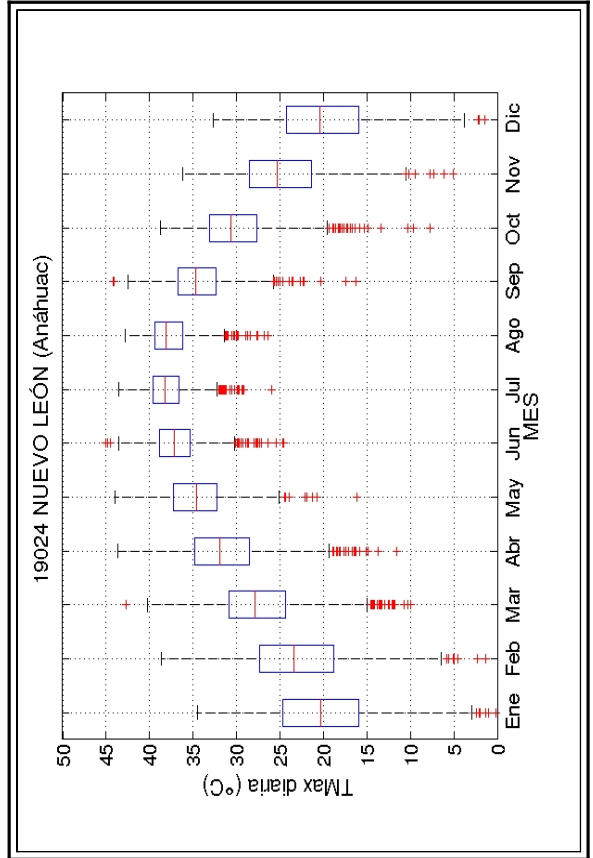
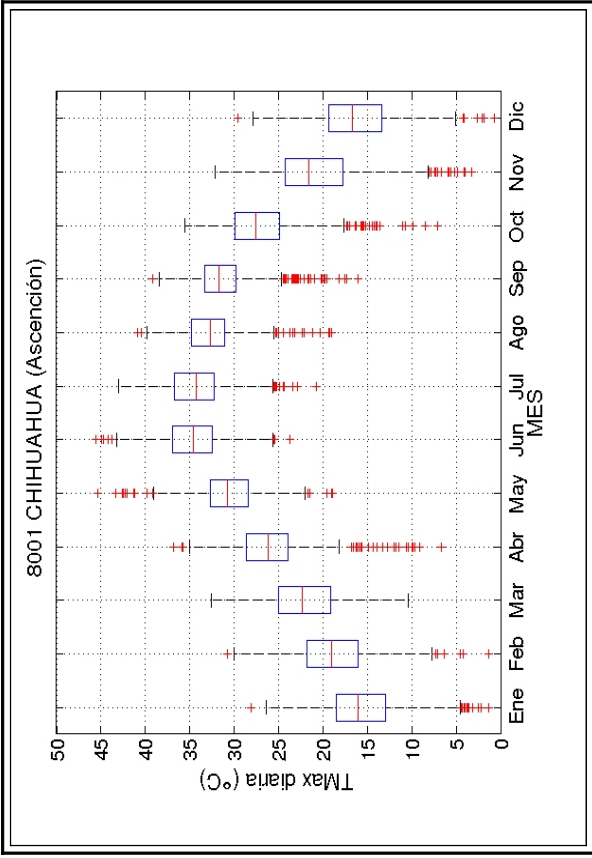


Figura 7.3.1: Diagramas de cajas para las series de TMax diaria en los sitios de la región Norte.

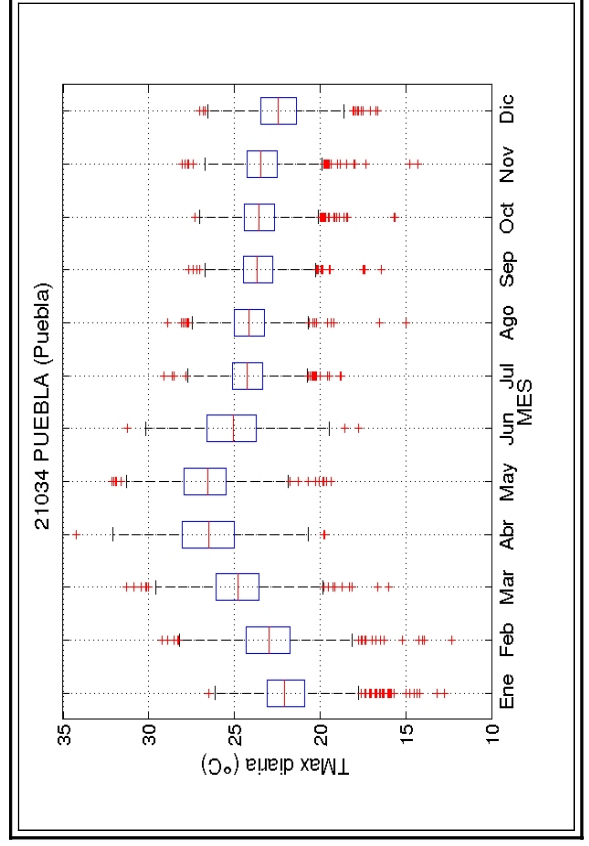
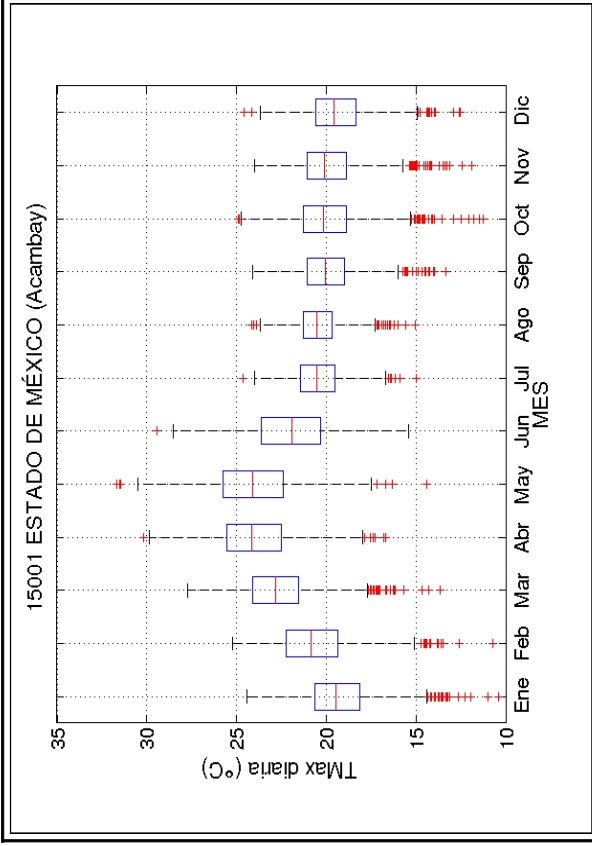
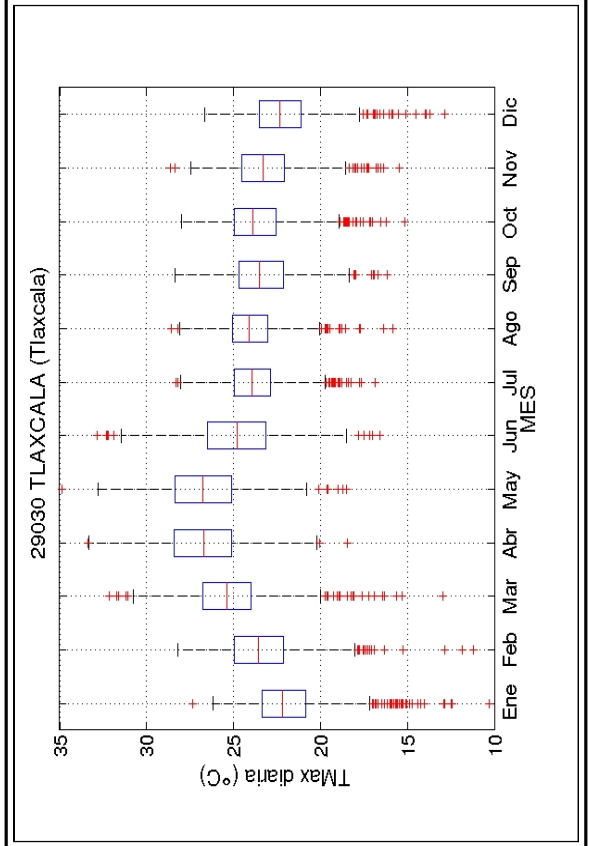
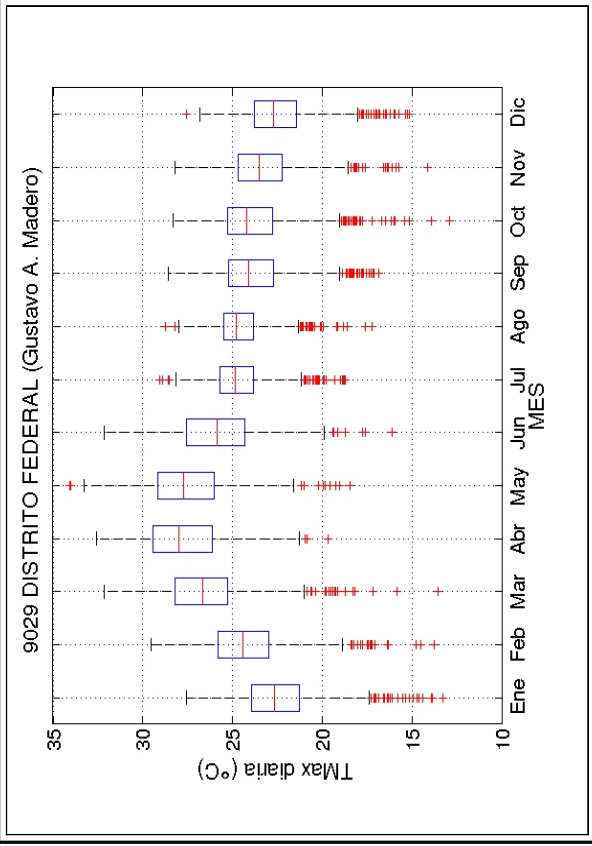


Figura 7.3.2: Diagramas de cajas para las series de TMax diaria en los sitios de la región Centro.

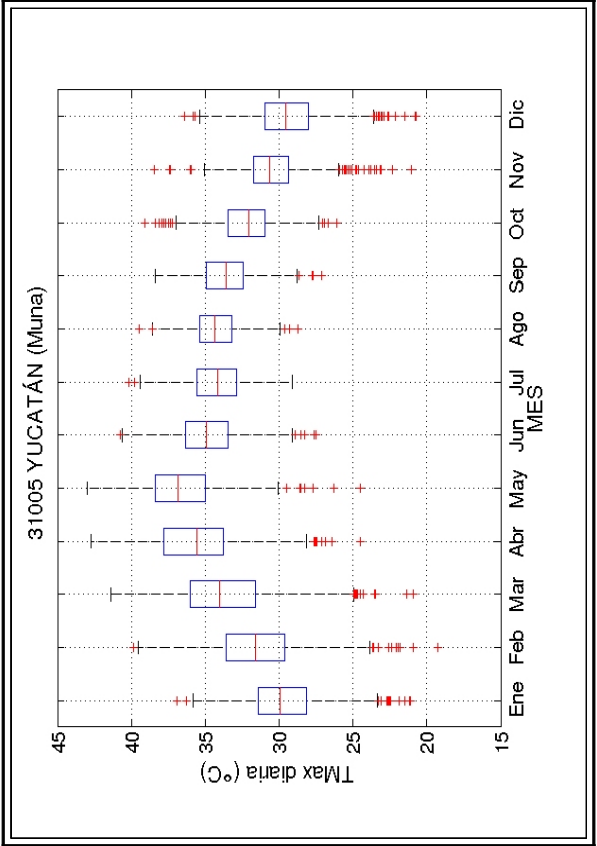
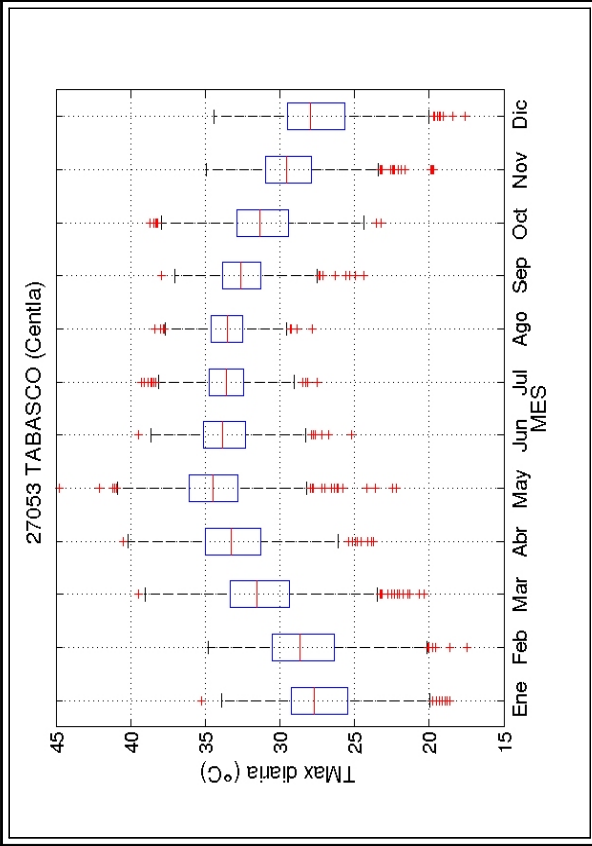
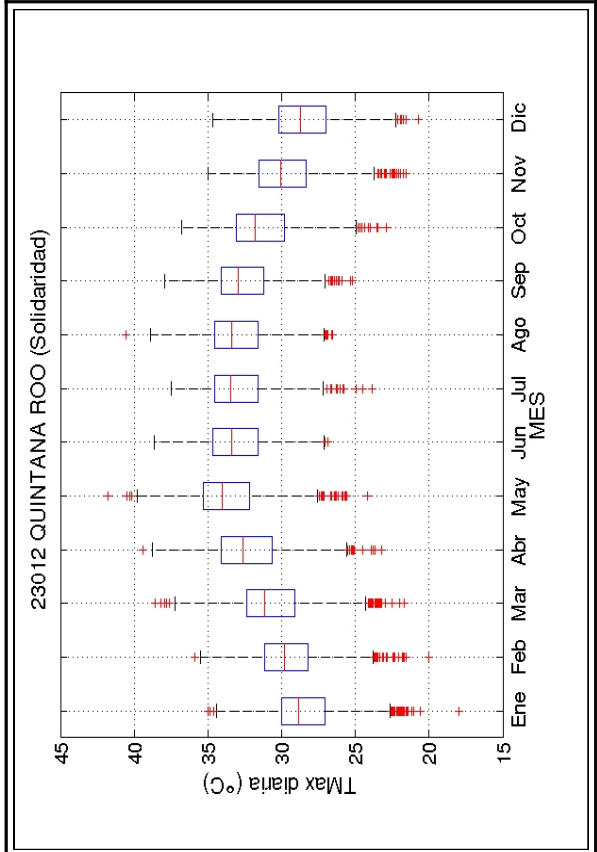
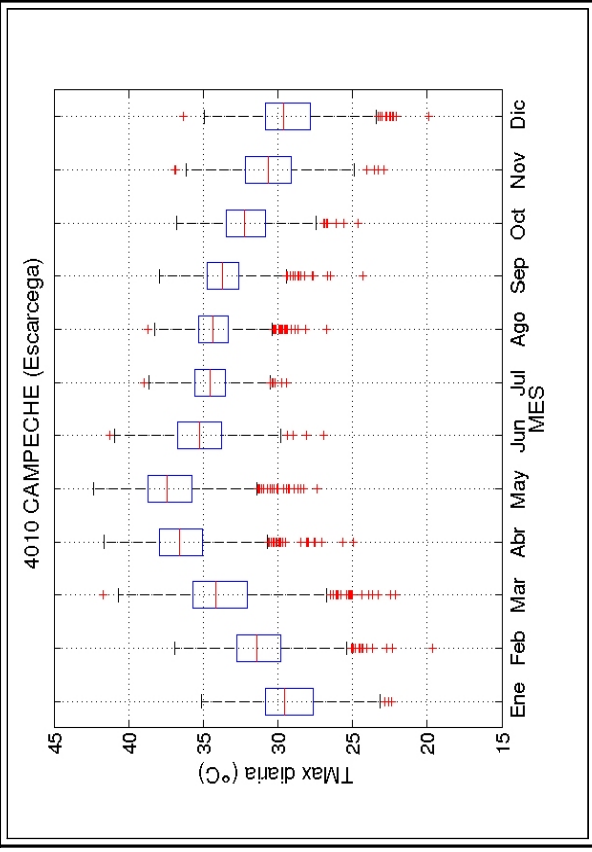


Figura 7.3.3: Diagramas de cajas para las series de TMax diaria en los sitios de la región Sureste.

7.3.2 *Temperatura mínima*

Región Norte.- Semejante a lo observado en las distribuciones de temperaturas máximas, las temperaturas mínimas en los sitios ubicados en la región norte muestran un claro ciclo estacional, con valores máximos principalmente durante Julio y Agosto, aunque también se presentan valores altos en Junio, y mínimos en Diciembre y Enero (Fig. 7.3.4). Durante los meses más fríos los valores de la mediana se encuentran entre 5°C y 7°C en los sitios ubicados en Sonora, Coahuila y Nuevo León, mientras que para el sitio ubicado en el estado de Chihuahua la mediana es de alrededor de 0°C. Las temperaturas mínimas más bajas, con valores atípicos de alrededor de -12°C, se presentaron en el sitio de la estación 8001 (Chih.), aunque en los sitios correspondientes a las estaciones 5026 (Coah.) y 19024 (N.L.) se pueden observar valores atípicos de alrededor de -9°C. Por lo general, las distribuciones muestran rangos intercuartiles más angostos durante los meses más cálidos, de entre 1.7° y 3.3°C, y más amplios el resto del año, de entre 4° y 8°C.

Región Centro.- En los sitios del centro del país las temperaturas mínimas presentan un ciclo estacional con valores máximos generalmente en Junio, de entre 12° y 15°C, y mínimos durante Diciembre y Enero, de entre -3° y -5°C (Fig. 7.3.5). Las distribuciones de las temperaturas mínimas son muy parecidas en los meses de Julio y Agosto, con valores relativamente pequeños de sesgo negativo y rangos intercuartiles también pequeños, de entre 1.3° y 2.3°C. En general, el valor de la mediana se mantiene similar en Septiembre aunque, con excepción del sitio correspondiente a la estación 21034 (Pue.), las distribuciones muestran un marcado sesgo negativo en este mes. A partir de Octubre se observa el descenso de las temperaturas mínimas en la región y un incremento moderado en los rangos intercuartiles, llegando a alcanzar los 3.3°C. En general, son los meses de Diciembre y Enero cuando se presentan las temperaturas mínimas más bajas; sin embargo, en algunos sitios puede haber días con temperaturas por debajo de los 0°C desde Septiembre hasta Marzo.

Región Sureste.- Los sitios de la región suroriental del país presentan las temperaturas mínimas más elevadas generalmente en los meses de Mayo y Junio, aunque hay sitios que muestran valores altos también en Abril y Septiembre (Fig. 7.3.6). Las temperaturas mínimas más altas llegan a superar los 26°C. Generalmente, las temperaturas mínimas más bajas se presentan en el período de Diciembre a Febrero, aunque los valores varían de un sitio a otro observándose temperaturas mínimas de alrededor de 4°C en la estación 23012 (Q.R.) hasta alrededor de 10°C en la estación 27053 (Tab.). En algunos sitios también se observan valores relativamente bajos en los meses de Marzo y Abril. En general, las distribuciones presentan rangos intercuartiles más angostos durante la primavera-verano que durante el

otoño-invierno, así como sesgos negativos que son mayores en los meses de Abril y Octubre.

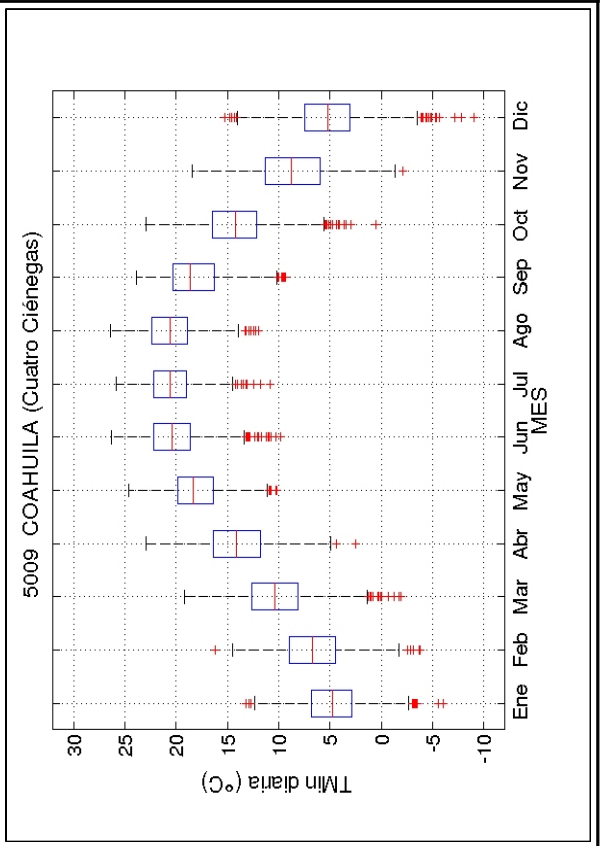
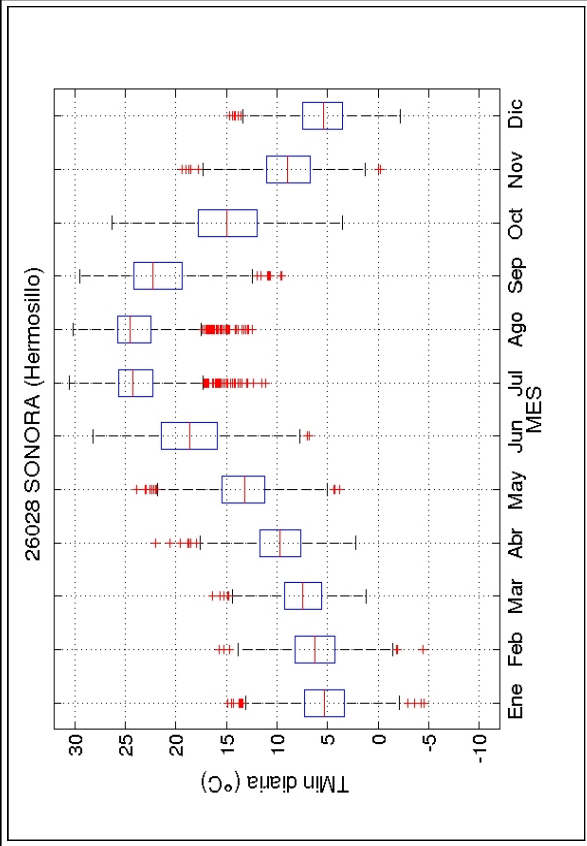
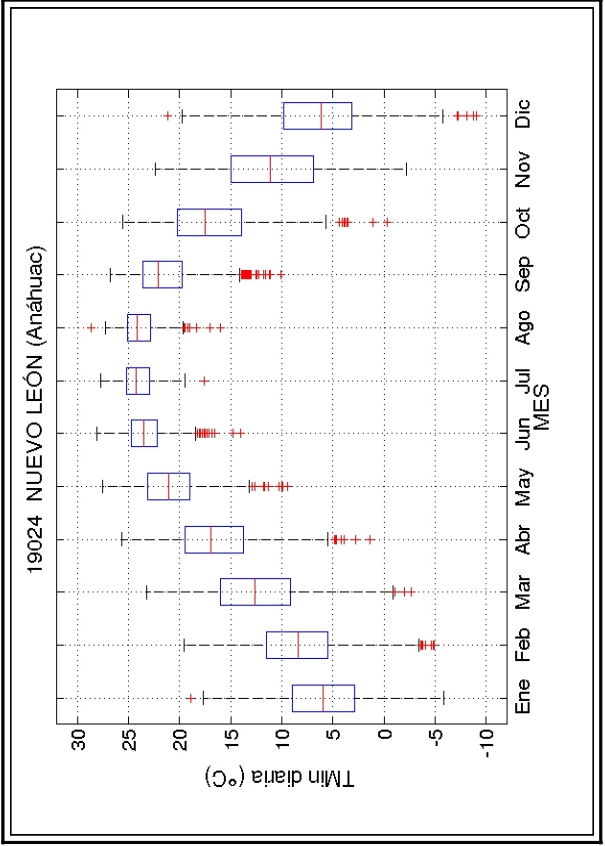
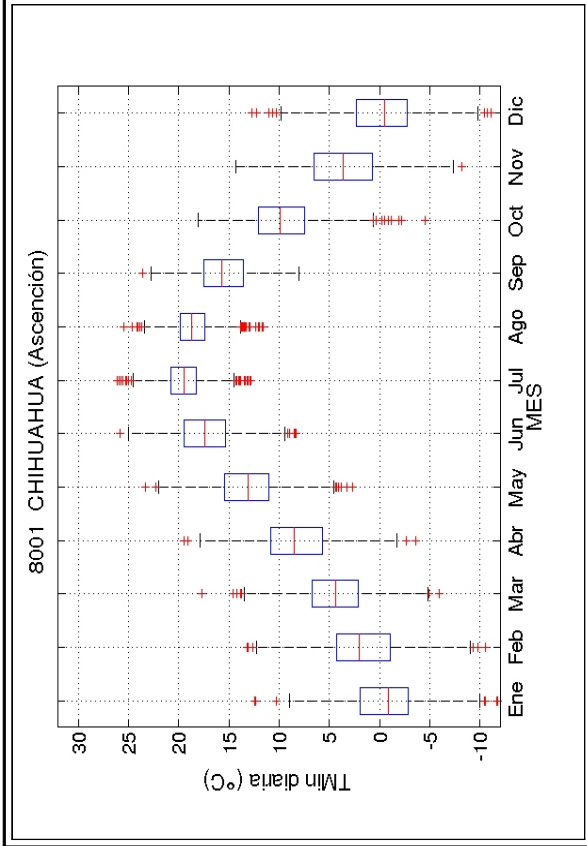


Figura 7.3.4: Diagramas de cajas para las series de TMin diaria en los sitios de la región Norte.

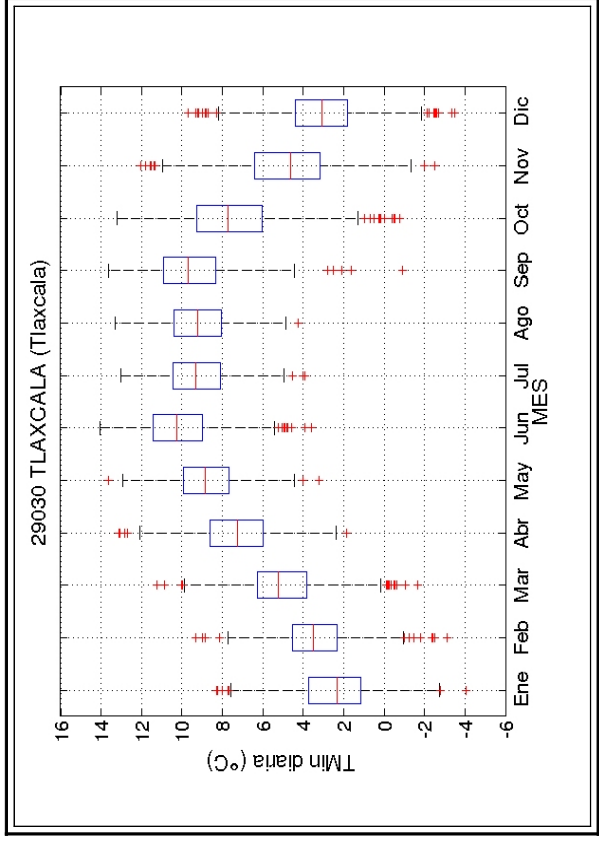
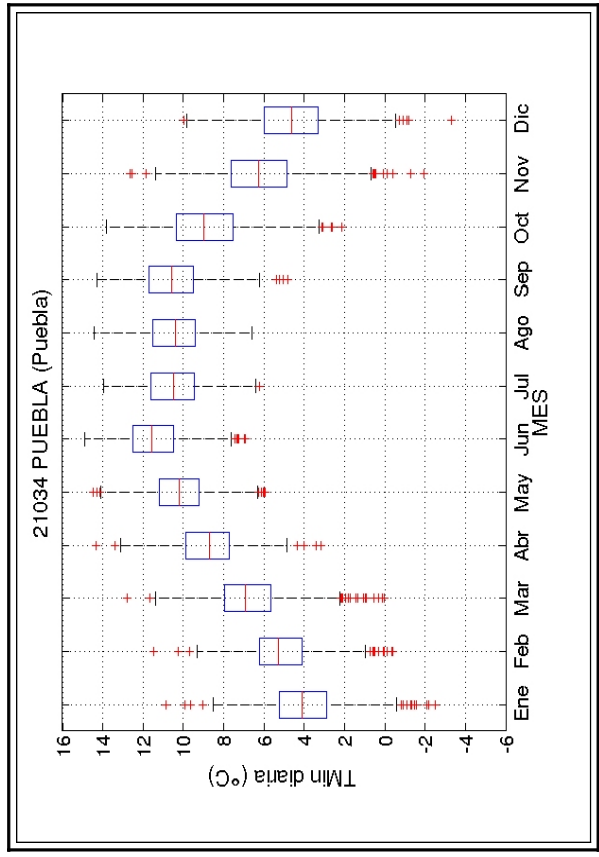
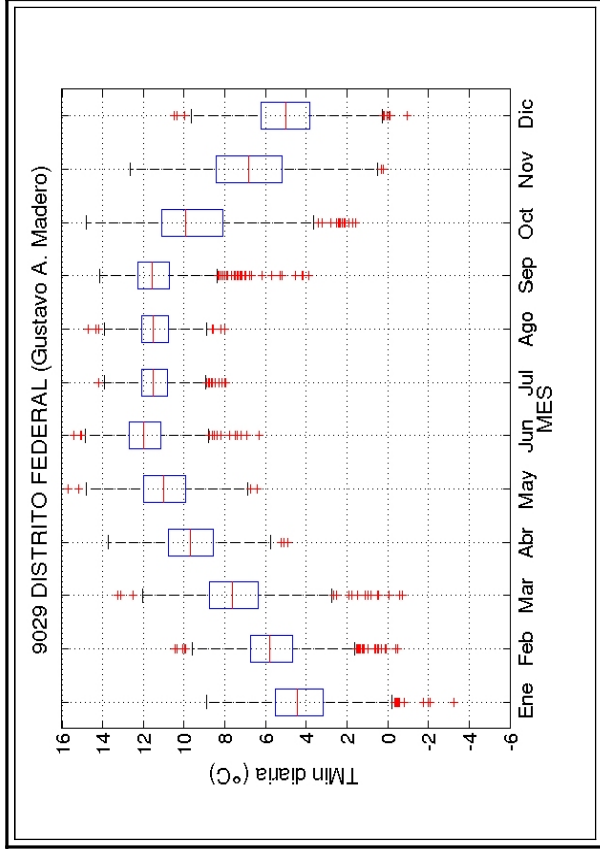
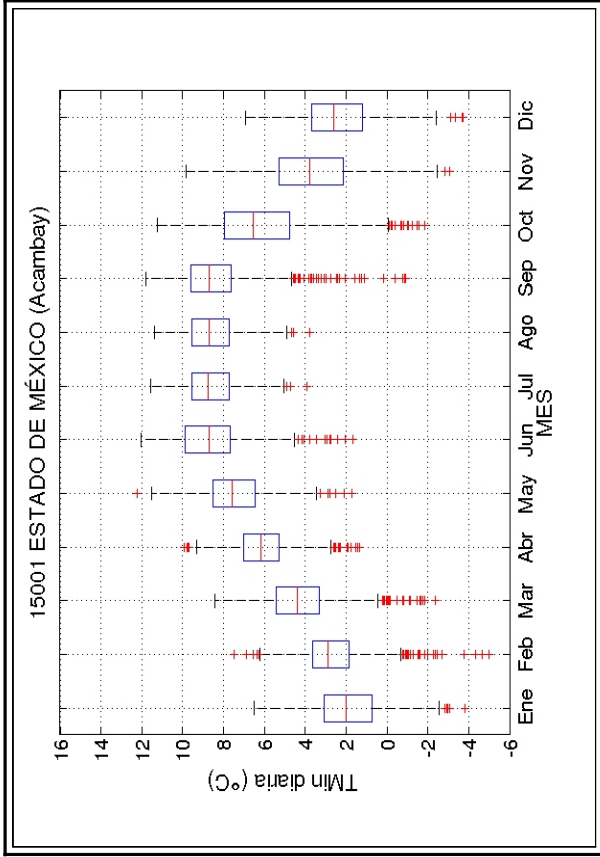


Figura 7.3.5: Diagramas de cajas para las series de TMin diaria en los sitios de la región Centro.

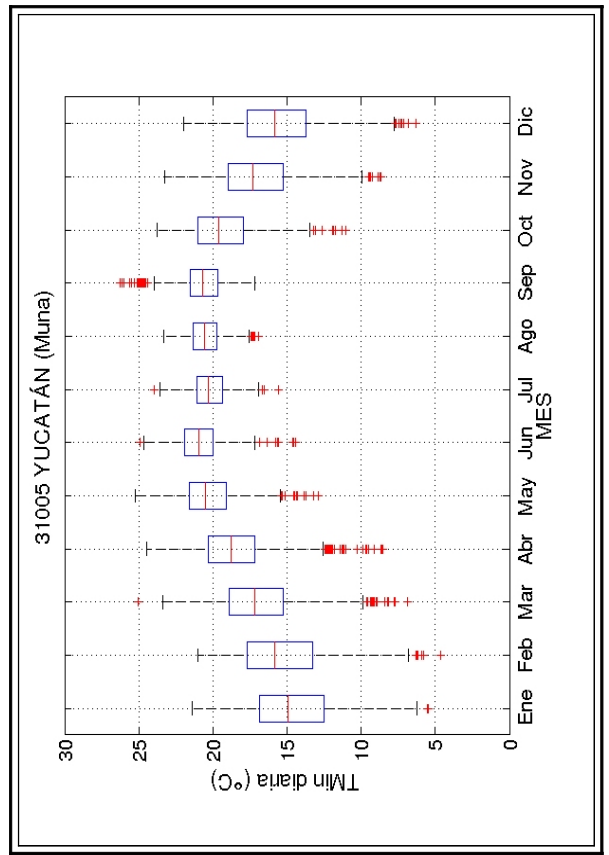
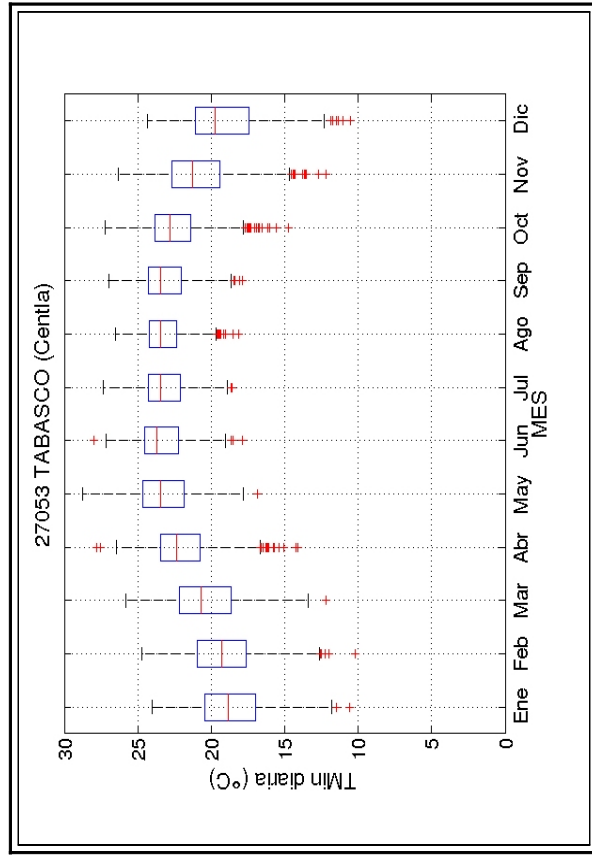
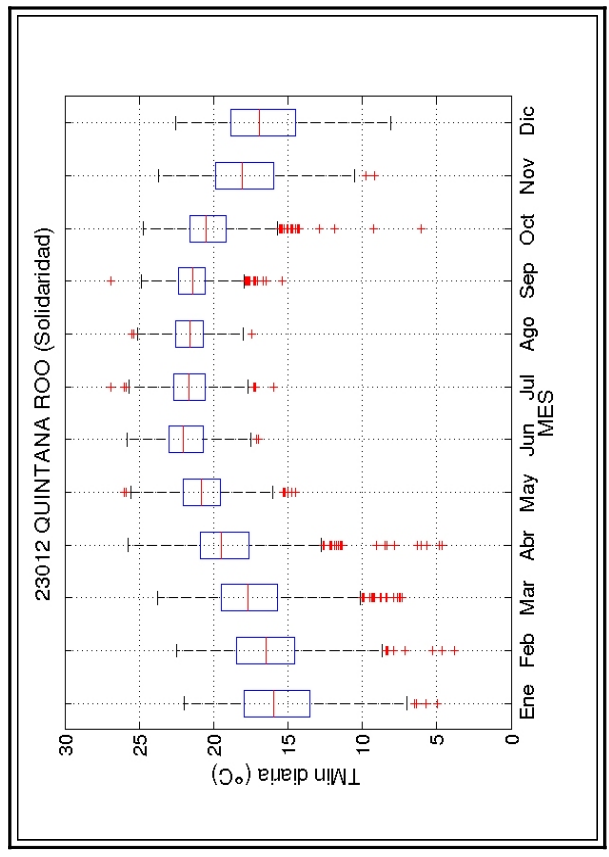
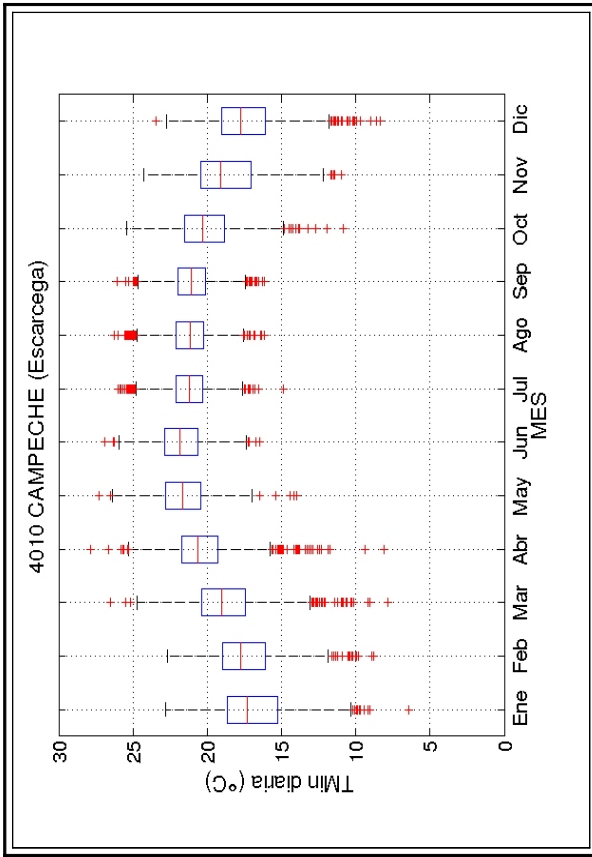


Figura 7.3.6: Diagramas de cajas para las series de TMin diaria en los sitios de la región Sureste.

7.4 Análisis de eventos extremos

Se realizó un análisis sencillo de eventos extremos para los doce sitios seleccionados tomando en cuenta los siguientes tipos de índices (ver la sección 3.3):

- 1) *Índices absolutos*: Considerando el valor más alto (bajo) de la temperatura máxima (mínima) en la serie e identificando la condición ENSO y/o algún otro evento especial ocurrido en la fecha en que se presentó dicho valor.
- 2) *Índices basados en percentiles*: Dividiendo el año en 4 trimestres, representativos de cada estación del año, y analizando los valores por percentiles en cada trimestre. En el caso de la temperatura máxima se consideró como temperatura umbral el percentil 90 (P90) y para la mínima el percentil 10 (P10) y se calculó la frecuencia de eventos cálidos y eventos fríos.

7.4.1 Valores extremos absolutos

En las Tablas 7.4.1 y 7.4.2 se presenta la relación de los valores extremos absolutos para las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente, a lo largo del período de 1979 a 2009, con su fecha de ocurrencia y la fase e intensidad del fenómeno ENSO (con base en el ONI; ver sección 4.3) o de algún otro evento particular ocurrido en dicha fecha.

En la Tabla 7.4.1 se observa que las temperaturas máximas más elevadas ocurren en la región norte del país, con valores que alcanzan los 48°C en Hermosillo, Son., seguida por la región sureste, donde el valor extremo fue cercano a los 45°C en el sitio de Tabasco, y por último la parte central del territorio, con valores extremos de entre 32° y 35°C. En general, estos valores son similares a los reportados por las estaciones, aunque con una ligera subestimación. De la Tabla también se puede observar que las temperaturas máximas extremas en la región central del país ocurrieron durante la primavera siguiente a la ocurrencia de un evento de El Niño intenso, mientras que en la región norte ocurrieron durante el verano con condiciones de ENSO diversas, y en la región sureste, en los sitios ubicados en Tabasco y Campeche, las máximas extremas ocurrieron en condiciones de La Niña.

ESTACIÓN	VALOR EXTREMO DE TEMPERATURA MÁXIMA	FECHA DE OCURRENCIA	CONDICIÓN ENSO Y/O EVENTO ESPECIAL
REGIÓN NORTE			
26028 (Son.)	48.0 °C	24/8/2002	Niño débil, entrando a Niño mederado
8001 (Chih.)	45.6 °C	29/06/1990	Año neutro
5009 (Coah.)	43.0 °C	18/07/1989	Año neutro, saliendo de una Niña intensa
19024 (N.L.)	45.1 °C	14/06/1998	Año neutro, saliendo de un Niño intenso
REGIÓN CENTRO			
15001 (Edo. Méx.)	31.6°C	8/05/1998	Año neutro, saliendo de un Niño intenso
9029 (D.F.)	34.1°C	2/05/1983	Niño débil, saliendo de un Niño intenso
21034 (Pue.)	34.2 °C	16/04/1998	Niño débil, saliendo de un Niño intenso. Uno de los año más cálidos ²⁷ de los 90's ²⁸ .
29030 (Tlax.)	35.0 °C	9/05/1998	Año neutro, saliendo de un Niño intenso
REGIÓN SURESTE			
27053 (Tab.)	44.7 °C	4/05/1999	Niña débil, saliendo de una Niña moderada
4010 (Camp.)	41.7 °C	29/03/2000	Niña moderada, saliendo de una Niña intensa
31005 (Yuc.)	40.8 °C	19/06/1998	Año neutro, saliendo de un Niño intenso
23012 (Q. Roo)	41.7 °C	8/05/1980	Año neutro. Ola de calor en EU (Smoyer, 1998).

Tabla 7.4.1: Valores extremos de temperatura máxima en los doce sitios seleccionados, su fecha de ocurrencia y la condición ENSO y/o evento especial presente en tal fecha.

²⁷ <http://www.dforceblog.com/2011/02/28/los-10-anos-mas-calurosos-de-la-historia/>

²⁸ <http://www.skepticalscience.com/translation.php?a=11&l=4>

ESTACIÓN	VALOR EXTREMO DE TEMPERATURA MÍNIMA	FECHA DE OCURRENCIA	CONDICIÓN ENSO Y/O EVENTO ESPECIAL
REGIÓN NORTE			
26028 (Son.)	-4.5°C	16/02/1990	Año neutro
8001 (Chih.)	-11.8°C	9/01/1989	Niña intensa
5009 (Coah.)	-9.0°C	25/12/1983	Niña débil
19024 (N.L.)	-9.0°C	25/12/1983	Niña débil
REGIÓN CENTRO			
15001 (Edo. Méx.)	-3.8°C	15/02/1999	Niña moderada
9029 (D.F.)	-3.2°C	14/01/1986	Año neutro
21034 (Pue.)	-3.3°C	19/12/1980	Año neutro
29030 (Tlax.)	-3.4°C	28/01/1988	Niño débil, saliendo de un Niño moderado
REGIÓN SURESTE			
27053 (Tab.)	10.2°C	14/02/2006	Niña débil
4010 (Camp.)	6.4°C	28/01/1988	Niño débil, saliendo de un Niño moderado
31005 (Yuc.)	4.6°C	25/02/1989	Niña intensa
23012 (Q. Roo)	3.8°C	17/02/2007	Año neutro

Tabla 7.4.2: Valores extremos de temperatura mínima en los doce sitios seleccionados, su fecha de ocurrencia y la condición ENSO y/o evento especial presente en tal fecha.

Los valores de la Tabla 7.4.2 muestran que en la región norte se alcanzan las temperaturas mínimas extremas más bajas, cercanas a -12°C en el sitio localizado en Chihuahua, y que, en su mayoría, ocurrieron en condiciones de un evento de La Niña. En la región central, las mínimas extremas se encuentran aproximadamente entre -3° y -4°C, en condiciones diversas de ENSO, y en el sureste del territorio los valores están entre 4° y 10°C aproximadamente, también en condiciones diversas de ENSO. Se debe señalar que la mínima extrema en el sitio de Quintana Roo coincide con el año en donde hay registros erróneos en la estación, por lo que dicho valor debe ser revisado y tomarse con precaución.

7.4.2 Valores extremos por percentiles

Para analizar los eventos extremos con más detalle, se dividió el año en 4 trimestres, cada uno de los cuales corresponde a una estación del año, como se indica en la Tabla 7.4.3. Para cada trimestre se obtuvo la serie de tiempo diaria de la temperatura máxima y se calculó el índice TX90p, que es el porcentaje de días cuando la TMax > P90 (ver la Tabla 3.1 de la sección 3.3). De manera similar, para la temperatura mínima se calculó el índice TN10p, que es el porcentaje de noches frías cuando la TMin < P10.

Trimestre	Meses	Estación del año
1	Enero, Febrero y Marzo	Invierno
2	Abril, Mayo y Junio	Primavera
3	Julio, Agosto y Septiembre	Verano
4	Octubre, Noviembre y Diciembre	Otoño

Tabla 7.4.3: Períodos de tiempo en que fue dividido el año para el análisis de eventos extremos.

En la figura 7.4.1 se muestra el significado gráfico de los percentiles P90 y P10 mediante un ejemplo en donde se consideran las temperaturas máximas y mínimas durante el trimestre de verano, para los tres primeros años del período, en el sitio correspondiente a la estación 19024 (N.L.).

Los porcentajes se calcularon considerando que el trimestre 1 (Invierno) tiene 90 días, el trimestre 2 (Primavera) tiene 91 y los trimestres 3 y 4 (Verano y Otoño) tienen 92 días. Con los datos obtenidos se generaron histogramas en donde cada barra representa el porcentaje de días cálidos extremos (o noches frías extremas) en el trimestre correspondiente, los cuales se esquematizan en las figuras 7.4.2 a 7.4.7 para el caso de los extremos cálidos y de la 7.4.8 a la 7.4.13 para el caso de los extremos fríos en los doce sitios seleccionados.

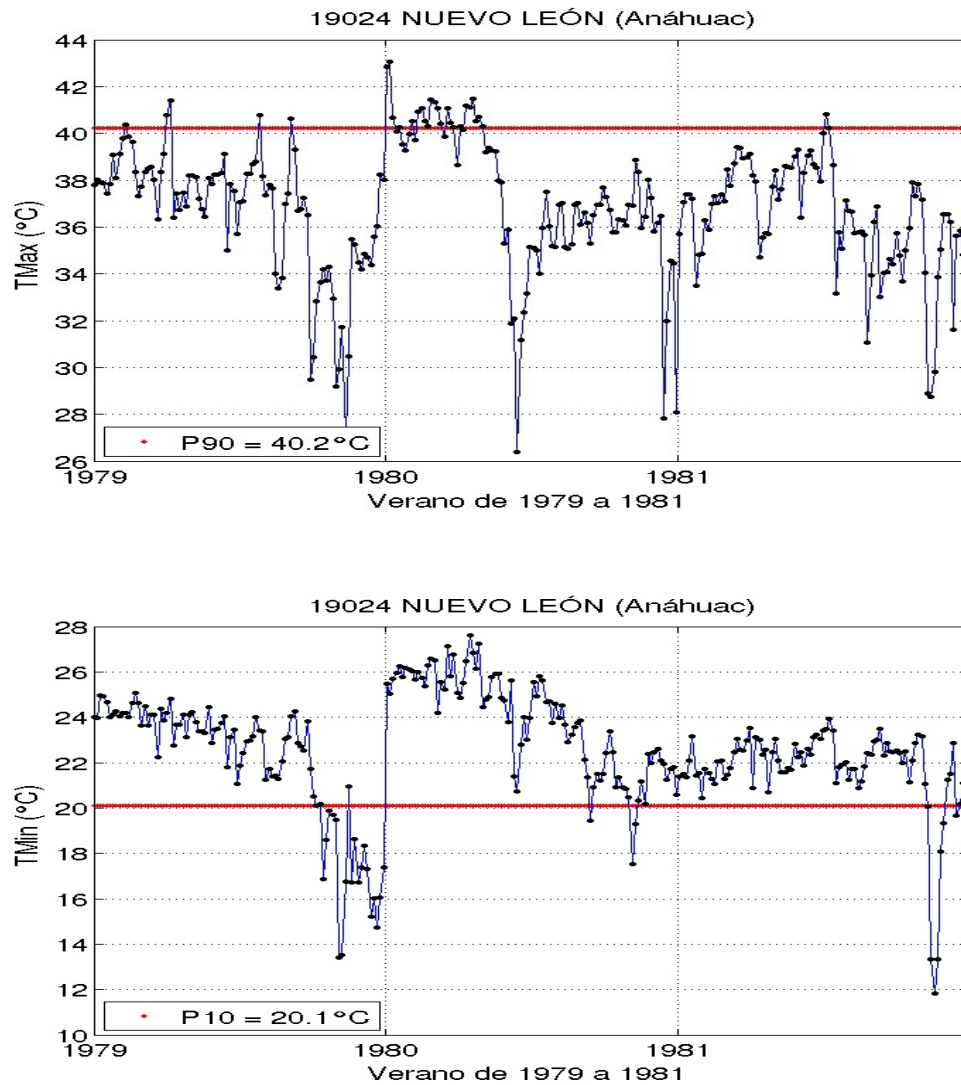


Figura 7.4.1: Ejemplo de los percentiles P90 para la TMax (arriba) y P10 para la TMin (abajo) del trimestre de verano durante los años de 1979 a 1981 en el sitio correspondiente a la estación 19024 (N.L.).

Las figuras 7.4.2 y 7.4.3 presentan los porcentajes trimestrales del número de días cálidos en los cuales la TMax fue superior al P90 para los sitios ubicados en la región norte del país. Las gráficas muestran que en el año de 1998 (saliendo de un evento de El Niño intenso), los días cálidos con temperaturas extremas rebasaron el 40%, ya sea durante la primavera o el verano, en tres de los sitios: Sonora, Chihuahua y Nuevo León, y en Coahuila también sobresale el trimestre de primavera aunque sólo con alrededor del 17%. En general, existe una gran variabilidad interanual y diferencias marcadas entre un sitio y otro, aunque pueden identificarse algunos años o períodos con coincidencias. Por ejemplo, el año 2006 fue relativamente cálido en Sonora y Coahuila, pero no así en Chihuahua y N.L.; los años 1989 y

1990 fueron relativamente cálidos de Chihuahua a N.L., mientras que en Sonora no se alcanzaron porcentajes tan altos. A mediados de la década de los 80's se observan porcentajes relativamente bajos en toda la región.

En la región central del territorio (Figs. 7.4.4 y 7.4.5), se observa que el P90 más alto corresponde al trimestre de primavera en los cuatro sitios. Asimismo, los cuatro sitios presentan porcentajes altos que llegan a rebasar el 60% de días cálidos extremos durante los años de 1983 y 1998, principalmente en primavera, cuando se iba saliendo de un evento de El Niño intenso. En el sitio localizado en el D.F., se observan porcentajes relativamente altos durante el verano de 1987, el invierno y la primavera de 1991 y el verano de 2009, cuando también existía alguna condición relacionada con un evento de El Niño, así como el otoño de 1997 en el Edo. de México y el verano de 2002 en Puebla. En general, los períodos 1984-1985, 1989-1990, 1992-1993 y el año 2001, en los cuales las condiciones de ENSO fueron neutras, registraron porcentajes relativamente bajos de días cálidos extremos en esta región.

En la región suroriental del país (Figs. 7.4.6 y 7.4.7) se observan diferencias marcadas entre las distribuciones de los cuatro sitios. Sin embargo, con excepción del sitio ubicado en Yucatán, el año de 1991 muestra porcentajes relativamente altos de días cálidos extremos durante la primavera y/o verano, al inicio de un evento de El Niño, llegando a 65% en Tabasco durante el verano. En Quintana Roo, la distribución muestra un máximo de aproximadamente 67% durante el invierno de 1982 y porcentajes superiores al 40% durante la primavera y el otoño de 1983 y el otoño de 1986. Con excepción de Tabasco, los otros tres sitios muestran porcentajes relativamente altos durante la primera mitad del 2003, con valores entre 28% y 43%. Por otra parte, en el sitio correspondiente a la estación de Campeche la distribución tiene un valor máximo de 56% durante el otoño de 1994 y de aproximadamente 31% durante la primavera de 1998, coincidiendo con los porcentajes más altos en Yucatán, de hasta 62%, durante la primavera-verano de ese mismo año. En particular, el período de 1992-1993 tuvo porcentajes muy bajos (< 10%) en todos los sitios (excepto en otoño de 1993 en Campeche), y esta característica se extendió hasta 1996 en Tabasco, hasta el 2001 en Q.R. (con excepción de la primavera de 1998) y de 1985 a 1995 en Yucatán.

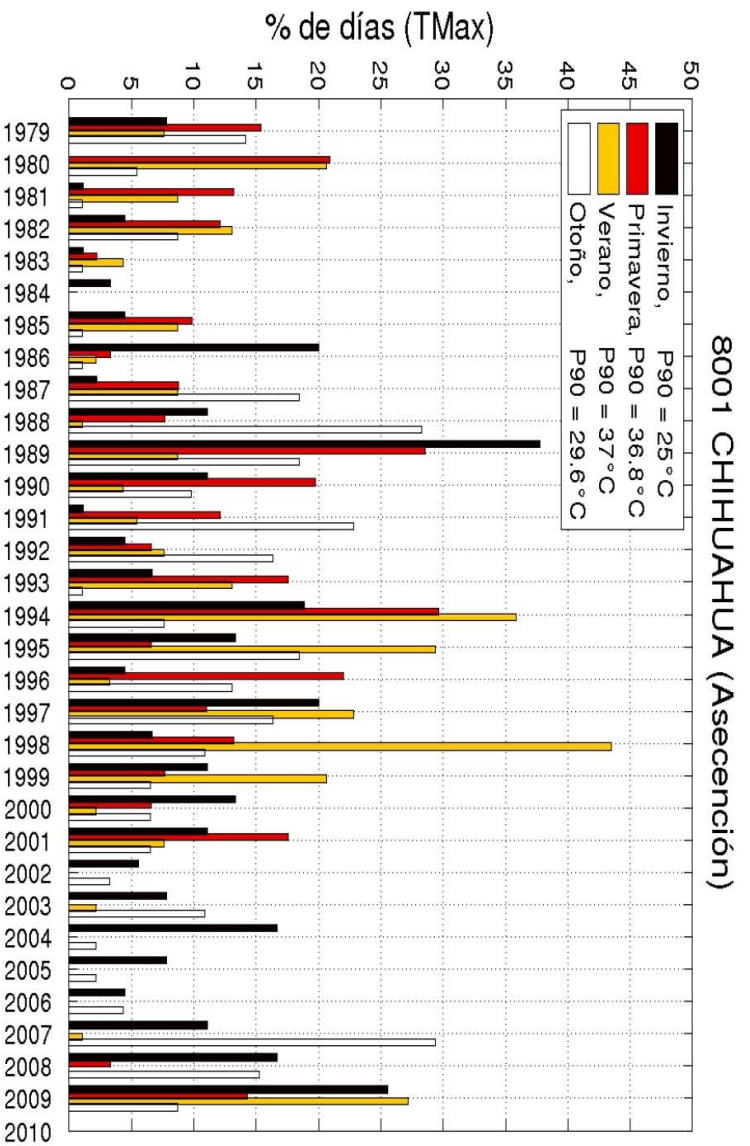
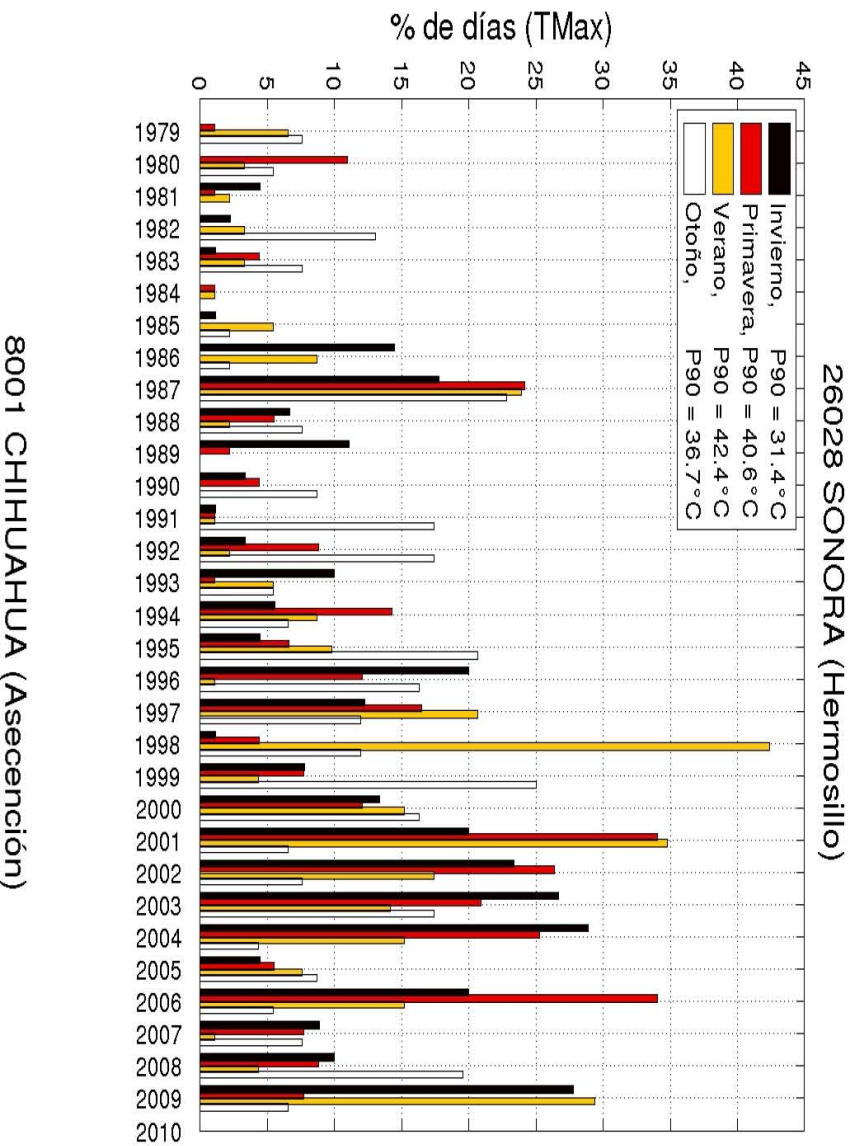


Figura 7.4.2: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Sonora (arriba) y Chihuahua (abajo).

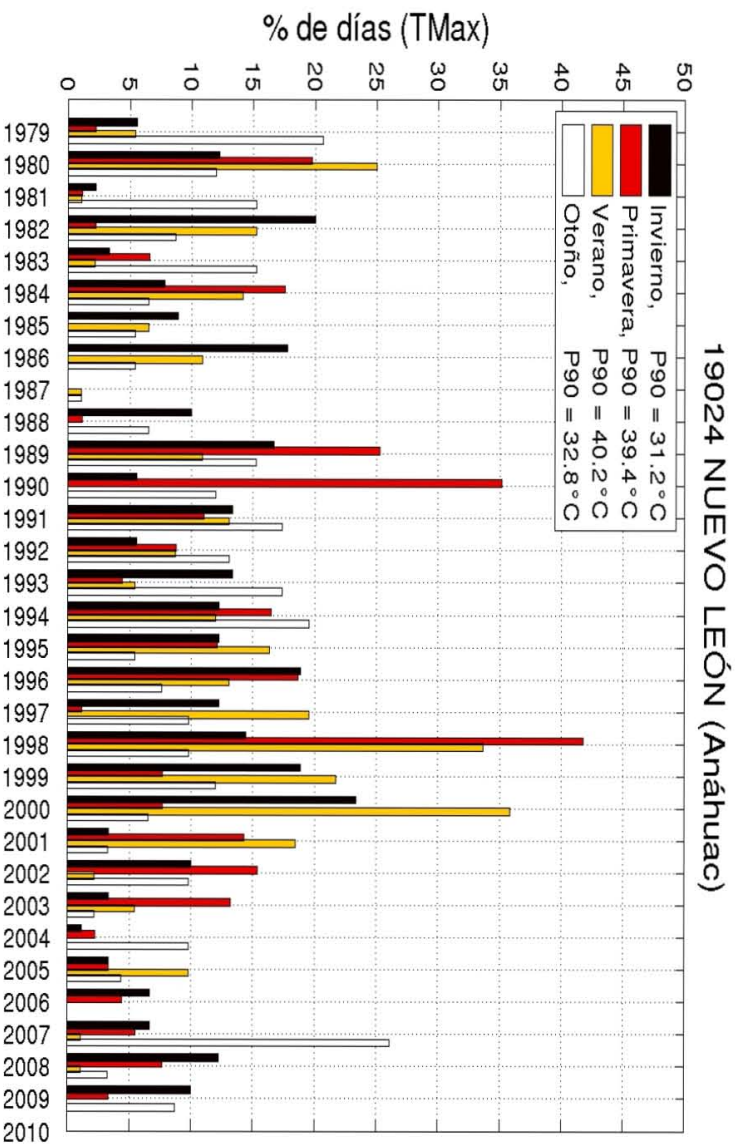
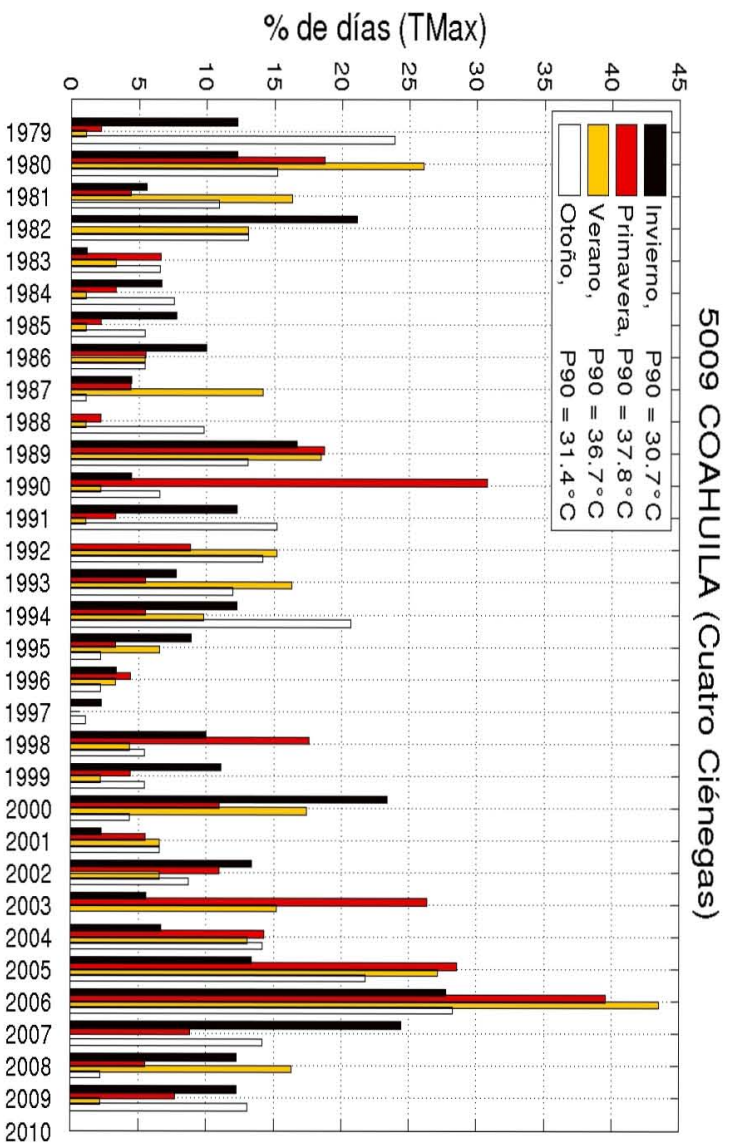


Figura 7.4.3: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el periodo 1979-2009 para los sitios ubicados en Coahuila (arriba) y Nuevo León (abajo).

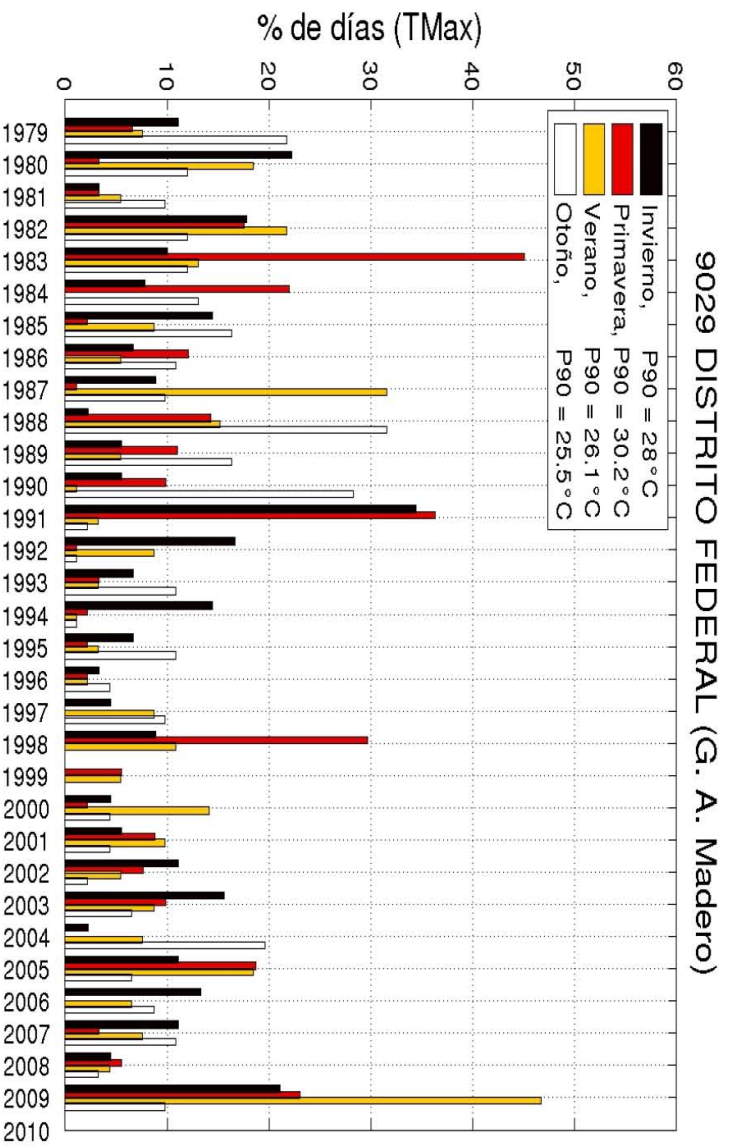
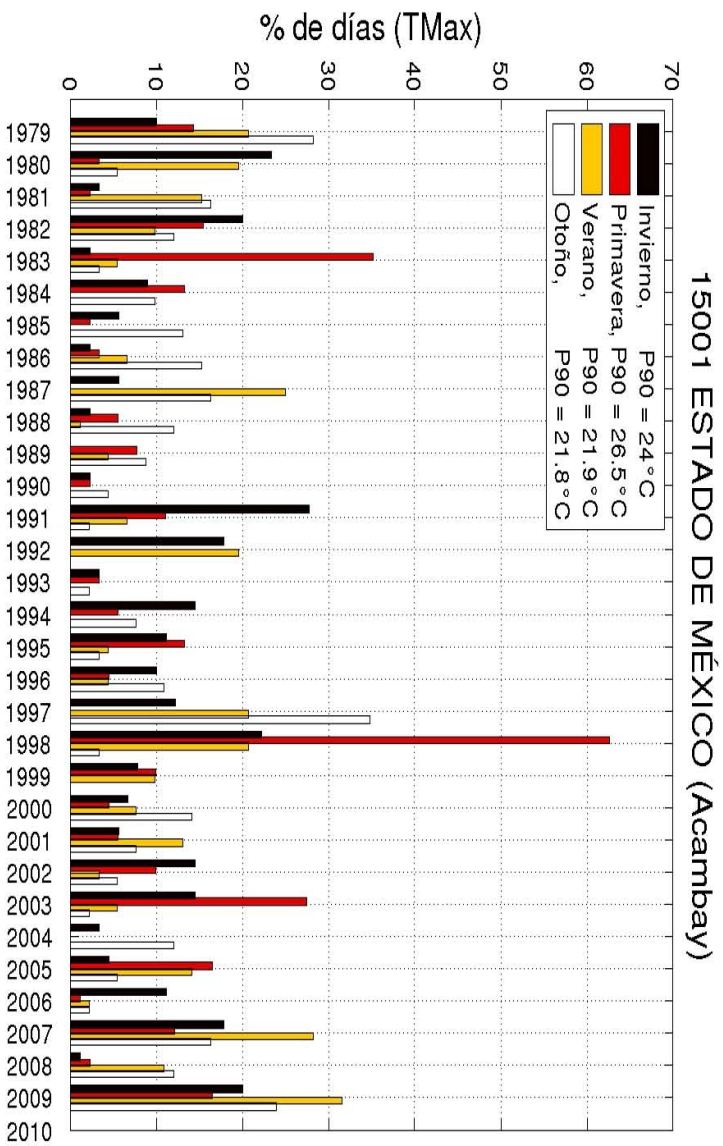


Figura 7.4.4: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en el Edo. Mex. (arriba) y D.F. (abajo).

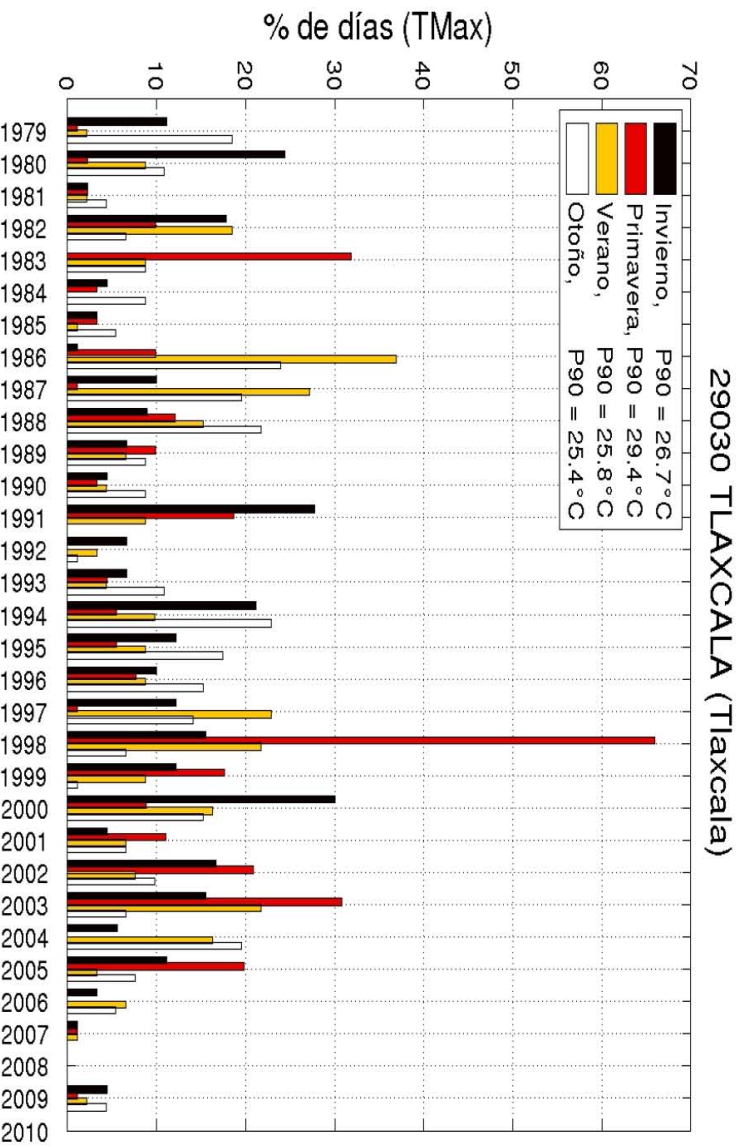
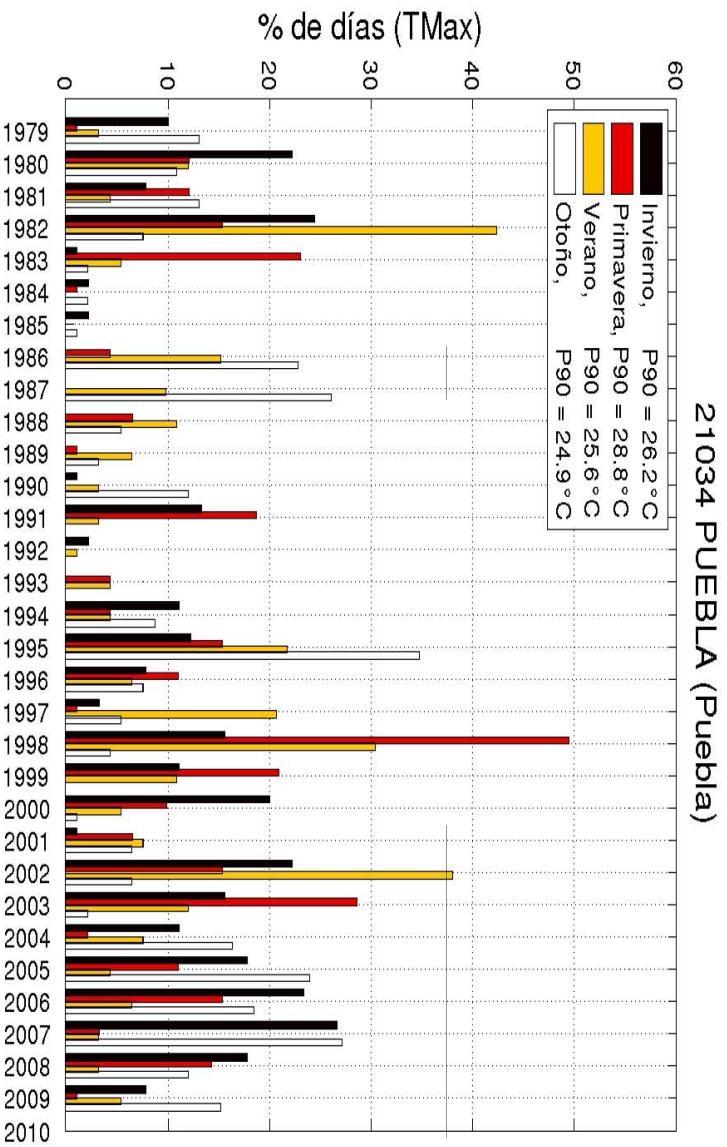


Figura 7.4.5: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Puebla (arriba) y Tlaxcala (abajo).

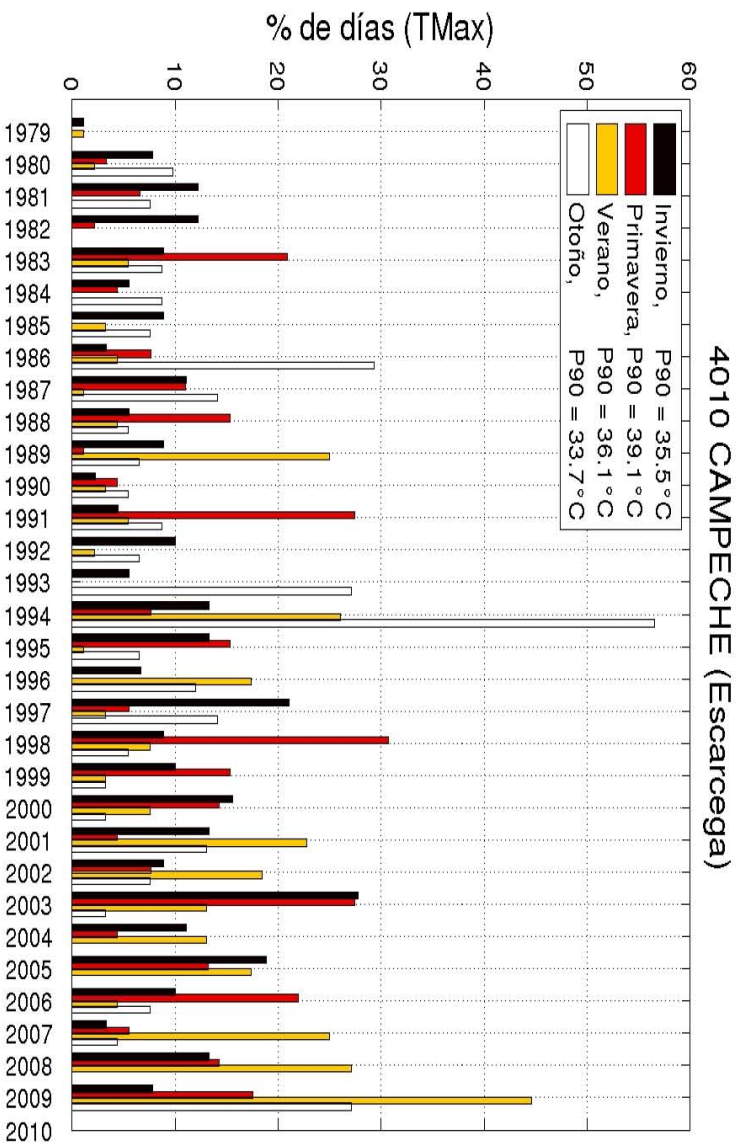
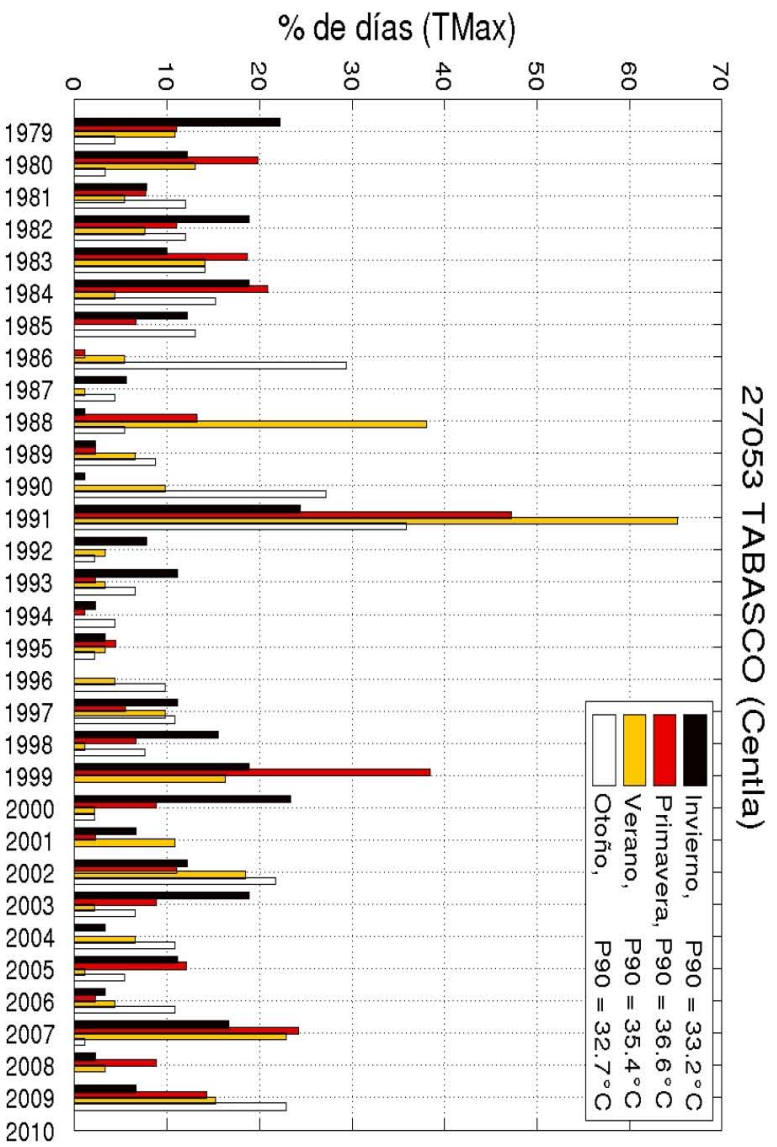


Figura 7.4.6: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Tabasco (arriba) y Campeche (abajo).

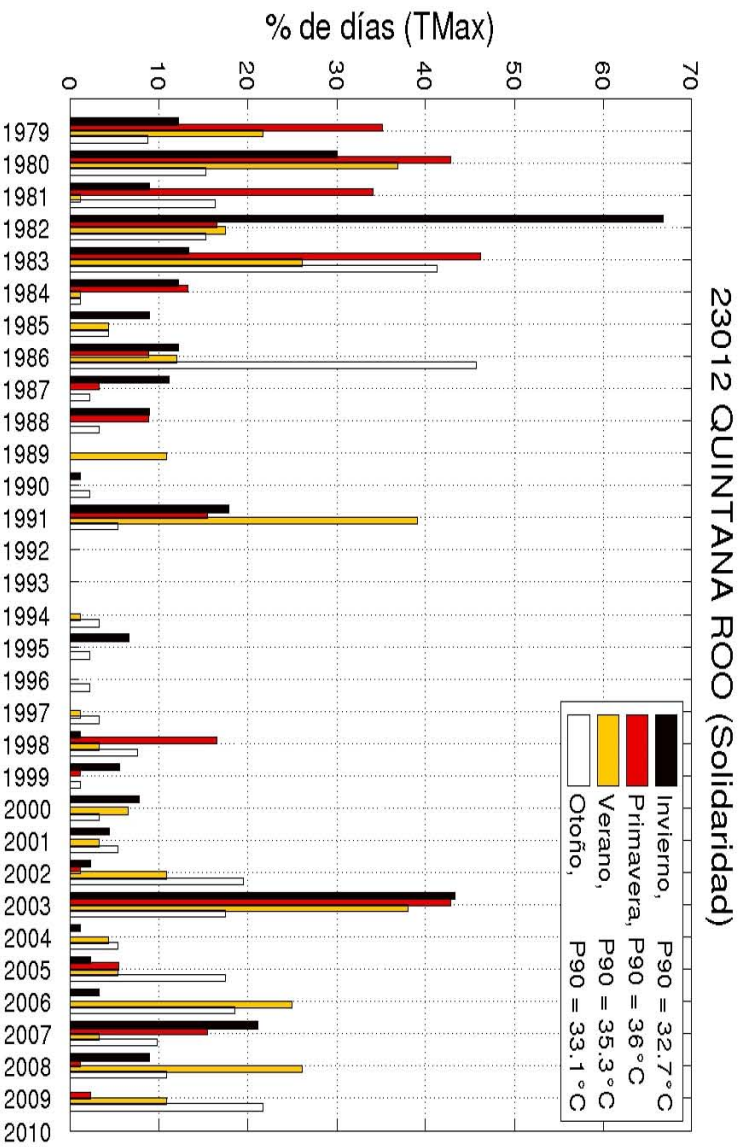
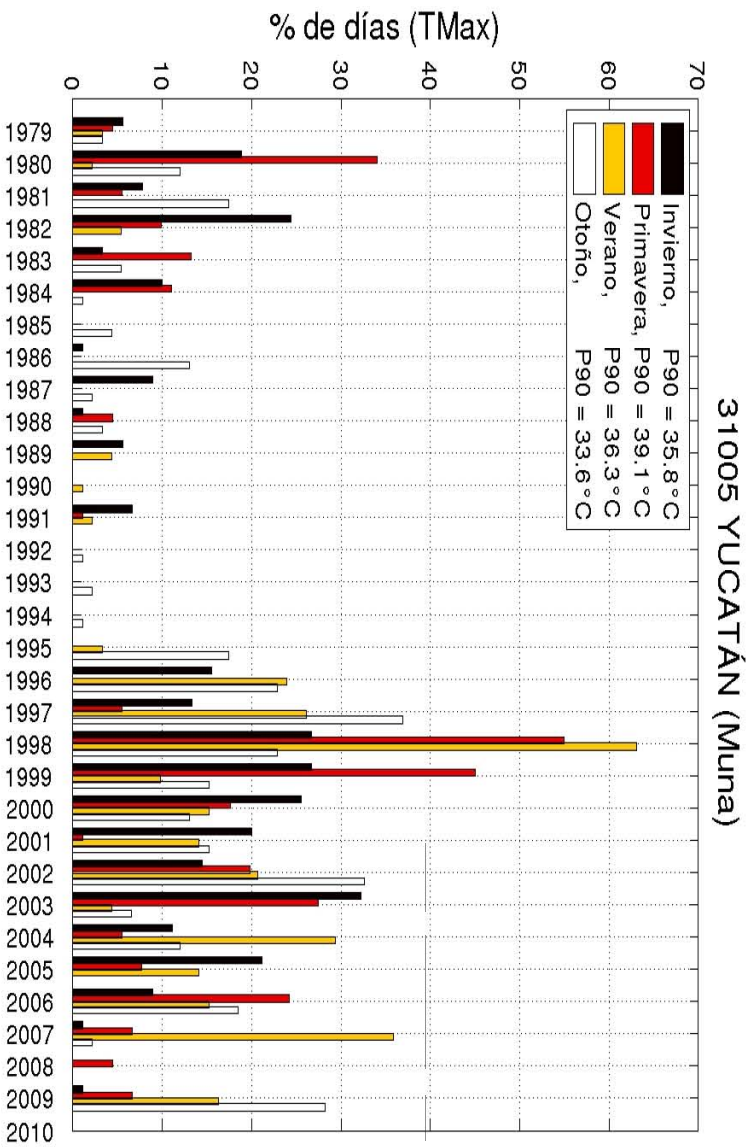


Figura 7.4.7: Porcentaje del número de días cálidos con TMax mayor al P90 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Yucatán (arriba) y Quintana Roo (abajo).

Las figuras 7.4.8 y 7.4.9 presentan los porcentajes trimestrales del número de noches frías extremas en las cuales la TMin fue inferior al P10 para los sitios ubicados en la región norte del país. De estos sitios, el de Chihuahua es el único con valores negativos de P10 para invierno y otoño, mientras que los valores de P10 para el verano van desde 13.8°C en Chihuahua hasta 20°C en Nuevo León. En el sitio de Sonora los porcentajes que más destacan son el del verano de 1979 con el 78% y el invierno y primavera de 1982 con valores cercanos a 51 y 48%, respectivamente, aunque debe señalarse que la serie de tiempo de TMin muestra cierto corrimiento hacia valores más bajos durante este período en comparación con el resto de la serie (ver Fig. 7.2.4 la serie de tiempo de la temperatura mínima de Sonora). También sobresale el verano de 2000 con cerca del 39%. Hay períodos largos con porcentajes bajos (<10%), como en la mayoría de los trimestres de 1991 a 1999 (con excepción, por ejemplo, del otoño de 1992, la primavera de 1995 y el otoño de 1998). En el sitio de Chihuahua los valores que sobresalen son los del invierno de 1989 y la primavera de 1991, con alrededor del 39%, y los veranos de 2004 y 2005 con 36 y 42%, respectivamente. En los últimos años, a partir del año 2002, se observa una disminución significativa en el porcentaje de noches frías extremas durante los inviernos y otoños en este sitio.

En Coahuila, los veranos de 1988 y 1989 presentan los porcentajes más altos de noches frías extremas de todo el período y, a diferencia de lo observado en Chihuahua, en este sitio los porcentajes para los veranos de 2003 a 2006 son muy bajos, siendo de 0% en los dos últimos años. Sin embargo, se observa un repunte a partir de 2007 en la mayoría de los trimestres. Por su parte, en el sitio de Nuevo León los trimestres con porcentajes más elevados, entre 25 y 37%, se presentan al final del período, principalmente en 2008 y 2009, lo cual es diferente a lo observado en Sonora y Chihuahua; también el invierno de 2007 presenta un porcentaje relativamente alto. Varios veranos muestran porcentajes de noches frías extremas relativamente altos, sobresaliendo el de 2004 con un 27%. En la década de los 90 hay varios años con porcentajes menores al 10% en todos los trimestres, como 1992, 1995, 1998 y 1999, algunos de los cuales también muestran valores bajos en Sonora y Coahuila.

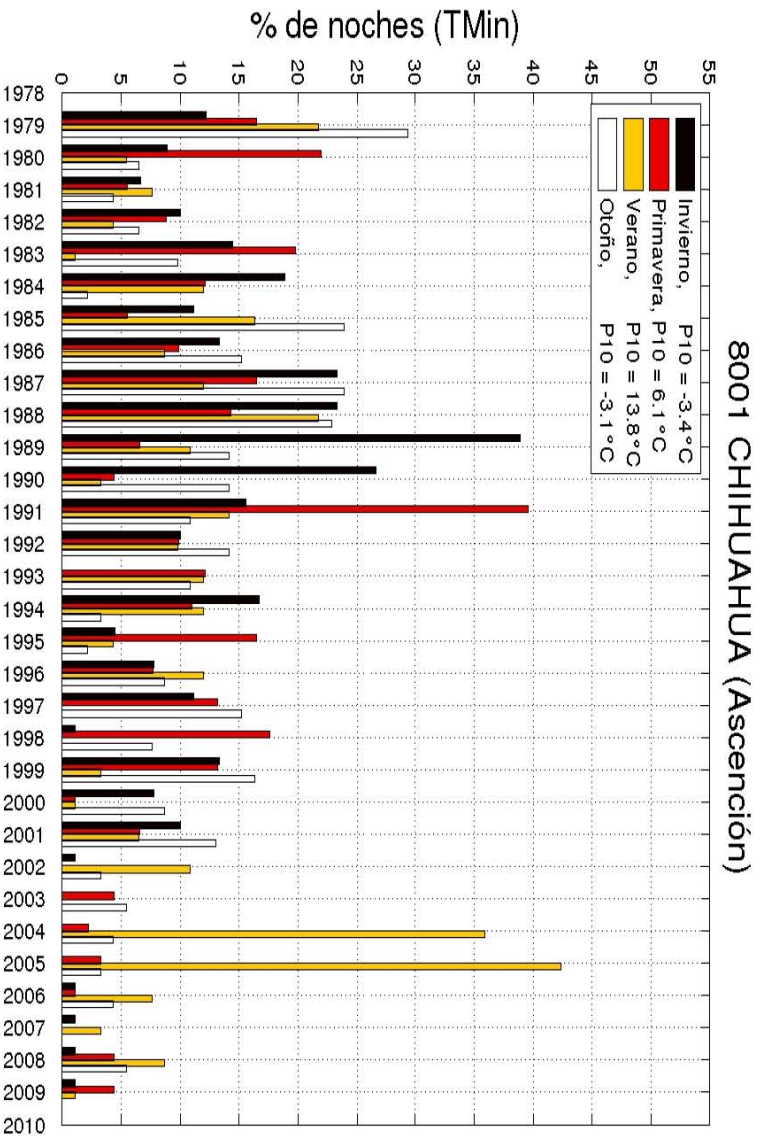
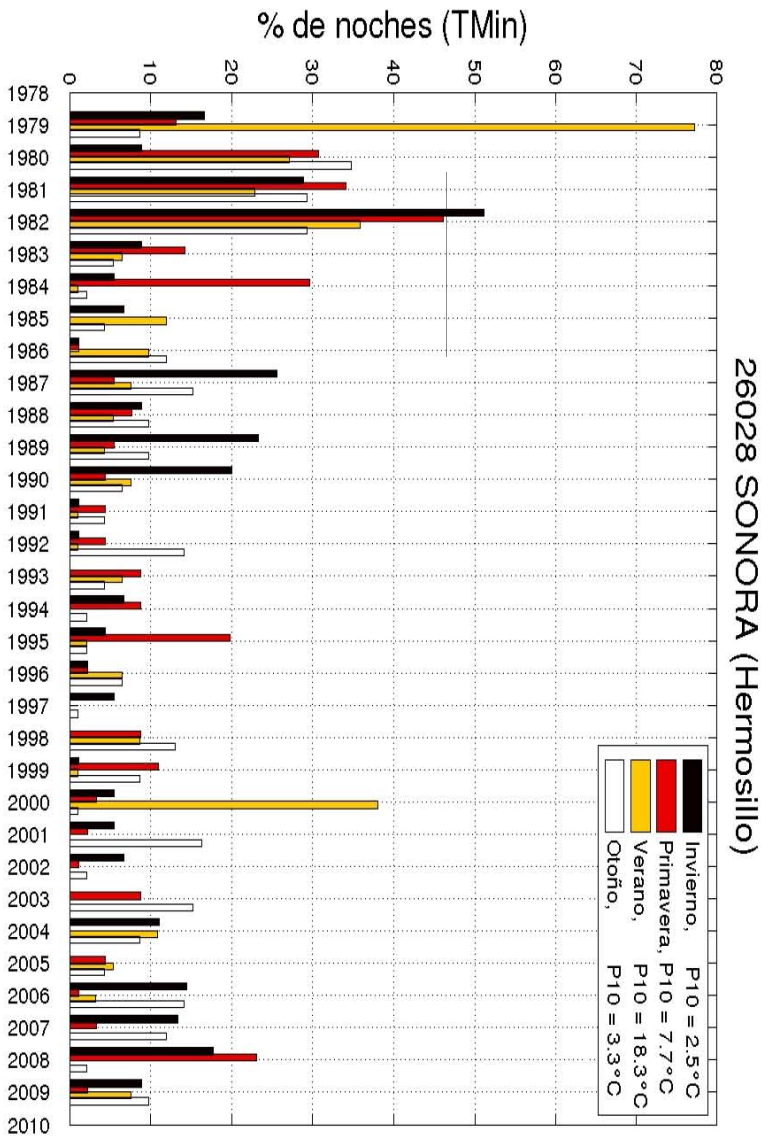


Figura 7.4.8: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Sonora (arriba) y Chihuahua (abajo).

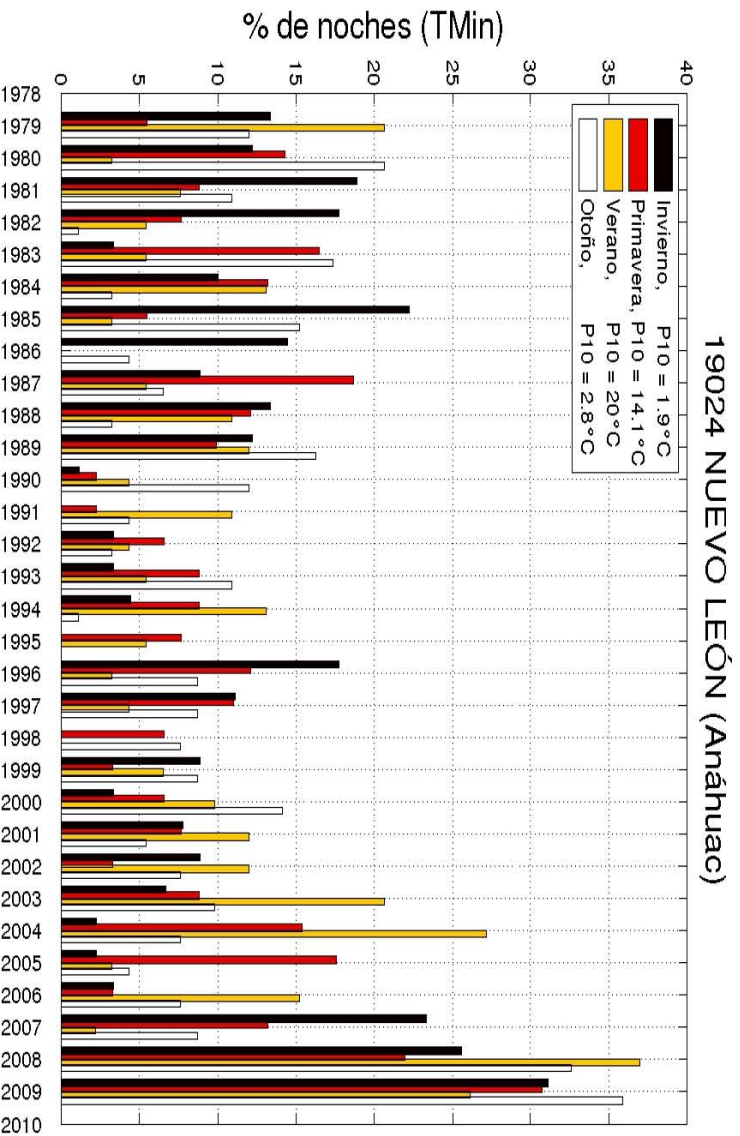
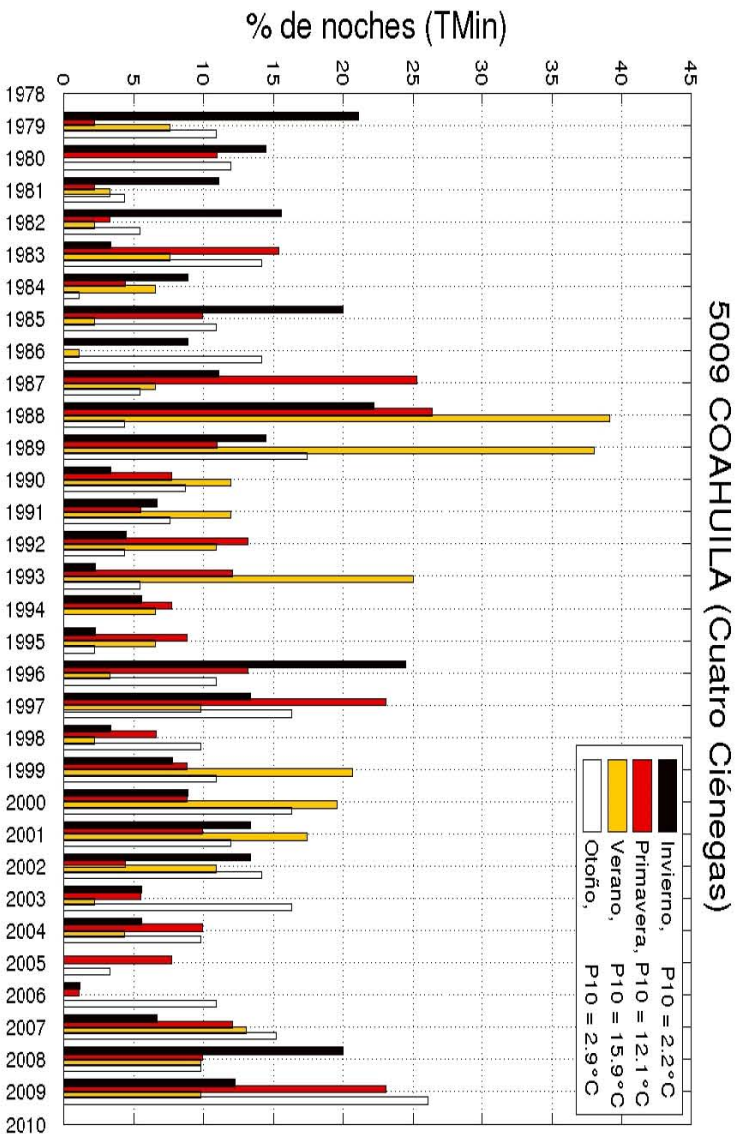


Figura 7.4.9: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Coahuila (arriba) y Nuevo León (abajo).

En la región central (Figs. 7.4.10 y 7.4.11), el sitio ubicado en el Edo. de México presenta los P10 más bajos en todos los trimestres, yendo de 0.2°C para el invierno a 6.7°C para el verano, y la gran mayoría de los trimestres tienen porcentajes menores al 15% (aunque se observa una amplia variabilidad interanual). Entre los trimestres que sobresalen con valores altos está la primavera de 1989, con el 27%; la primavera y el verano de 1992, con cerca de 28 y 33% respectivamente; los otoños de 1999 y de 2007, con cerca de 36 y 30% respectivamente, y el invierno y la primavera de 2009, con alrededor del 40 y del 33% respectivamente (contrario al 2008 con porcentajes bajos en todos los trimestres). También el verano de 2009 muestra un porcentaje relativamente alto de noches frías extremas, lo que hace a este año particularmente extremo ya que, con excepción de la primavera, los demás trimestres también tuvieron porcentajes $\geq 20\%$ de días cálidos extremos. Con excepción de tres años, durante el período de 1982 a 1995 los inviernos tuvieron porcentajes inferiores al 5%, mientras que los inviernos del período 1996-2000 tienen valores relativamente altos.

En el caso del sitio ubicado en el D.F., también la gran mayoría de los trimestres presentan porcentajes de noches frías extremas menores al 15%. Sobresale el año de 1996 con porcentajes de 40% y 53% para el invierno y la primavera, respectivamente; la primavera de 1989 con un 33% (similar a lo observado en el Edo. Méx.), y el otoño de 1999 con aproximadamente el 29%. A diferencia del sitio en el Edo. Méx., el año 2009 presenta porcentajes muy bajos de noches frías extremas en el D.F. En el sitio de Puebla se observa que, durante el período de 1981 a 1988 (con excepción de 1987), al menos uno de los trimestres rebasó el 25% de noches frías extremas, sobresaliendo el verano de 1985 con 44%, el otoño de 1984 con 39% y los inviernos de 1983 y 1986 con más del 33%. Para el período de 1991 en adelante se observa una importante variabilidad interanual, aunque la gran mayoría de los trimestres muestran porcentajes menores al 10%, con algunas excepciones que sobresalen en 1993, 1994, 1997 y 2003. En cuanto al sitio ubicado en Tlaxcala, se observa una clara disminución de los porcentajes de noches frías extremas en los últimos años del período (2001-2009), principalmente para los inviernos, aunque se debe señalar que no hay datos en la estación correspondiente para el período 2006-2009 (ver Fig. 7.4.10 del porcentaje del número de noches frías para el Estado de México). En este sitio sobresale el verano de 1982 con el 40% de noches frías extremas y los inviernos de 1983 y 1986 con cerca del 33% y del 28%, respectivamente.

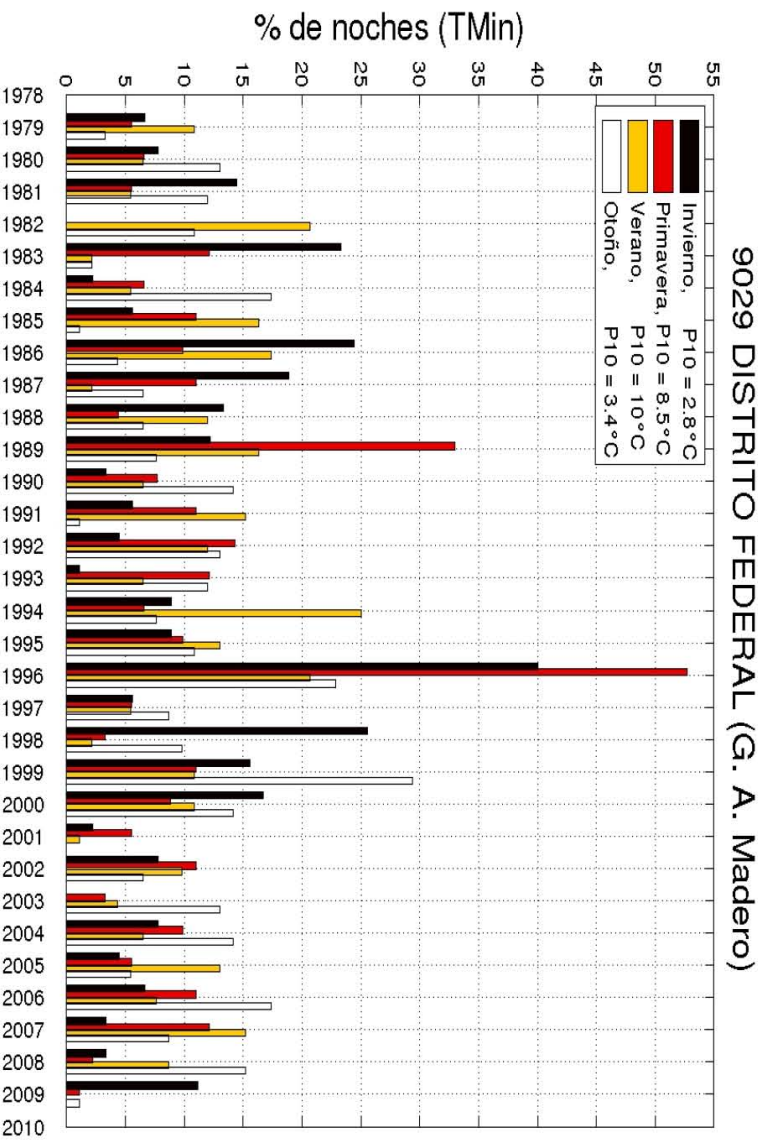
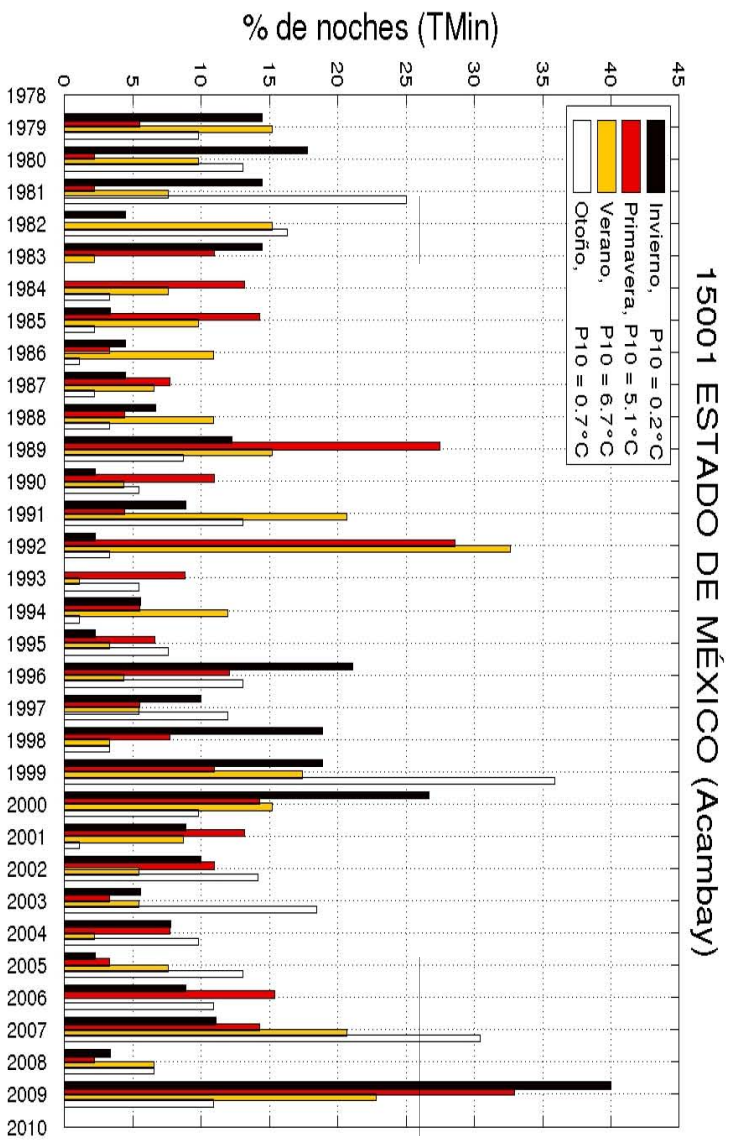


Figura 7.4.10: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en el Edo. de México (arriba) y el Distrito Federal (abajo).

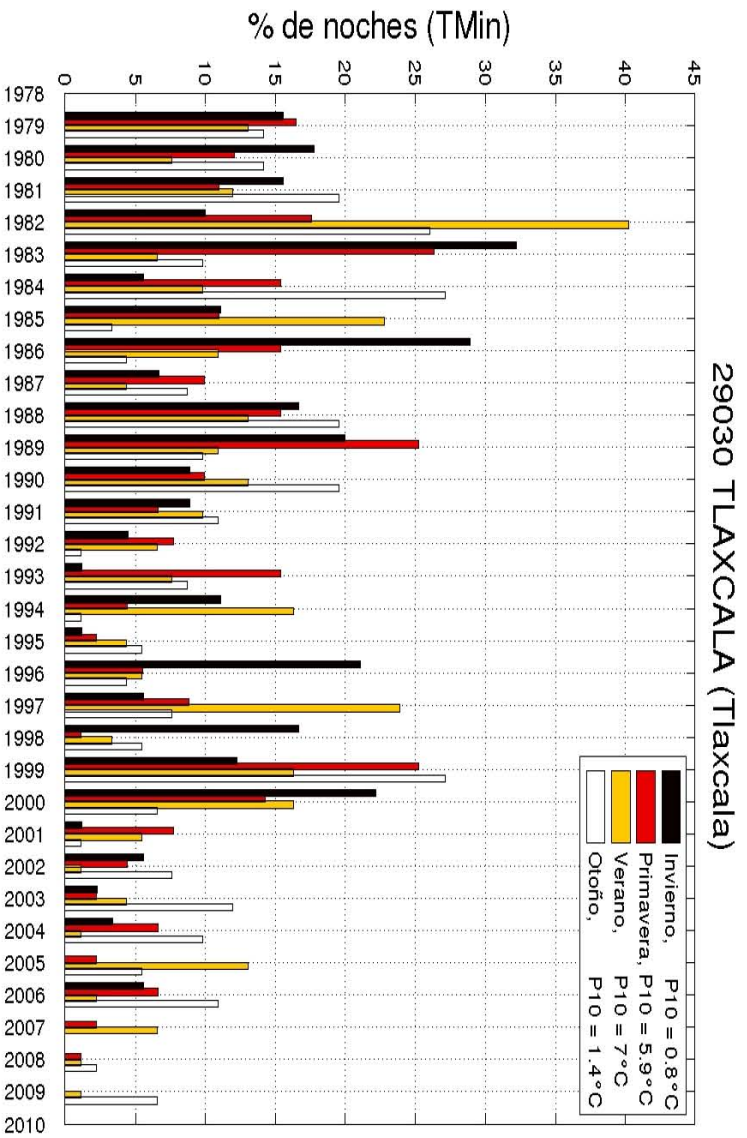
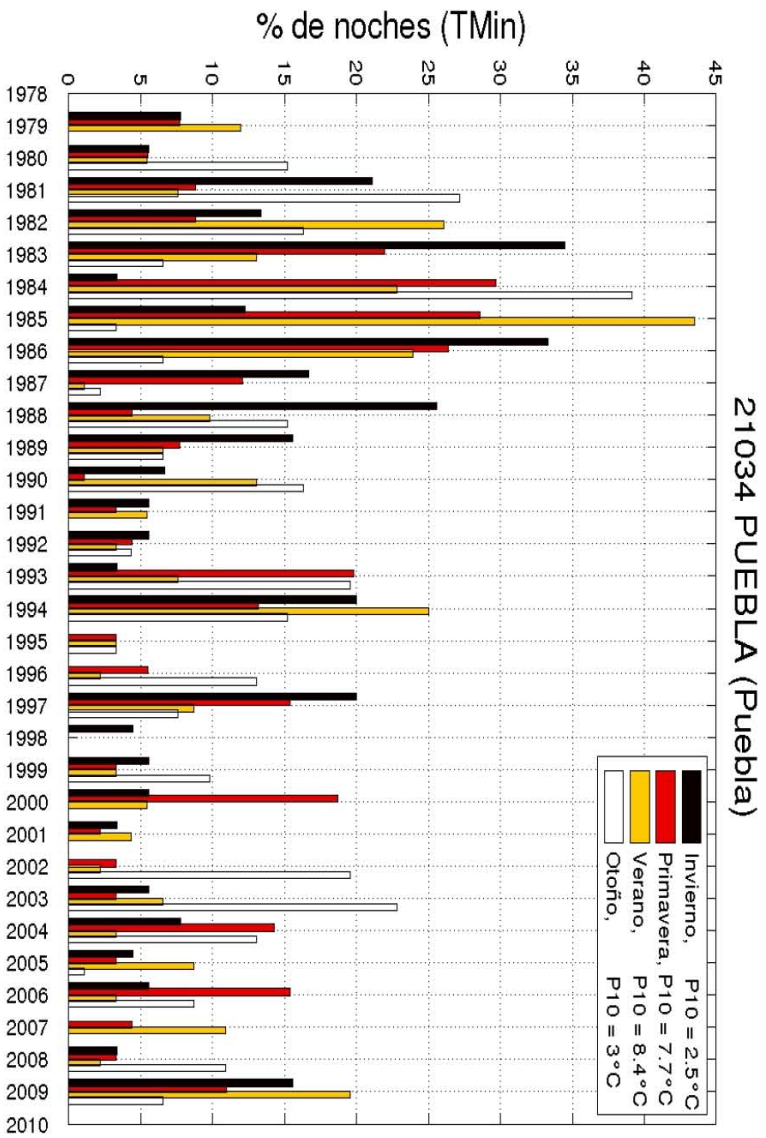


Figura 7.4.11: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el periodo 1979-2009 para los sitios ubicados en Puebla (arriba) y Tlaxcala (abajo).

Antes de analizar los histogramas correspondientes a la región suroriental del país, habría que mencionar que las estaciones seleccionadas en esta zona presentan diversos errores y corrimientos en las series de tiempo de TMin que el producto generado no corrige completamente, por lo que estos resultados deben tomarse con precaución. Por ejemplo, en el sitio ubicado en Tabasco se observa un claro aumento en los porcentajes de noches frías extremas en todos los trimestres a partir del año 2003 (Fig. 7.4.12), que está relacionado con un corrimiento evidente hacia valores más bajos en la serie y que también afecta a la tendencia calculada (ver la siguiente sección). En el caso del sitio ubicado en Campeche, la serie de TMin también tiene un comportamiento raro, comenzando por los primeros años del período (1979-1987) en los que no hay observaciones en la estación correspondiente (ver la Fig. 7.2.6 de la serie de tiempo de la temperatura mínima de Campeche). Asimismo, los resultados muestran porcentajes relativamente altos de noches frías extremas en los últimos años (2003-2008), alcanzando valores mayores al 60% durante el verano de 2005, lo cual coincide con cierto corrimiento hacia valores más bajos en la serie de TMin.

En la región suroriental, el sitio que presenta los P10 más bajos es el ubicado en Yucatán, yendo de 10.8°C para el invierno a 18.6°C para el verano (Figs. 7.4.12 y 7.4.13). Asociados también con un corrimiento en la serie de TMin (ver la Fig. 7.2.6 de la serie de tiempo de la temperatura mínima de Yucatán), los veranos del período 1990-1994 muestran porcentajes muy altos de noches frías extremas en este sitio. Por último, en el sitio de Quintana Roo el porcentaje tan alto durante el verano de 1991 coincide con un período en el que no hubo observaciones en la estación correspondiente y el producto generado, al tomar en cuenta la información de otras estaciones, está corrido hacia valores más bajos en la serie de TMin (ver la Fig. 7.2.6 de la serie de tiempo de la temperatura mínima de Quintana Roo). Sobresalen en este sitio los veranos de 1980 (27%), 1981 (38%) y 1983 (26%), el invierno de 2001 (36%) y el invierno y la primavera de 2005 con porcentajes de alrededor de 45%.

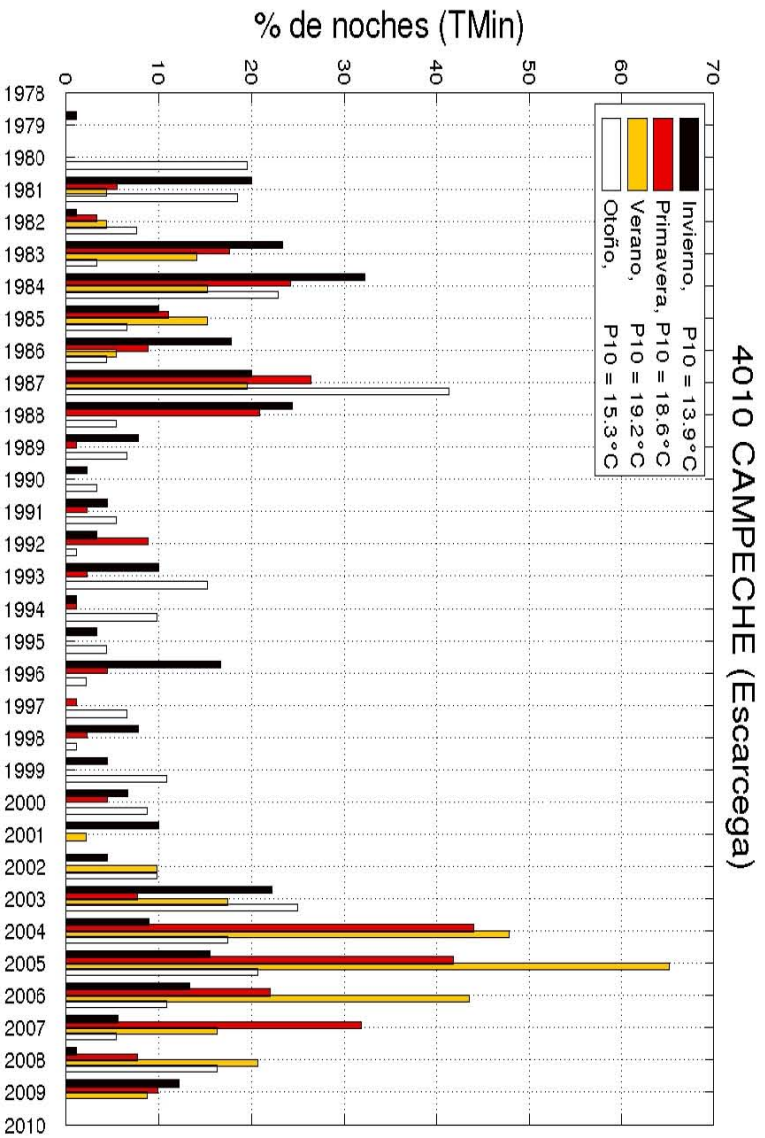
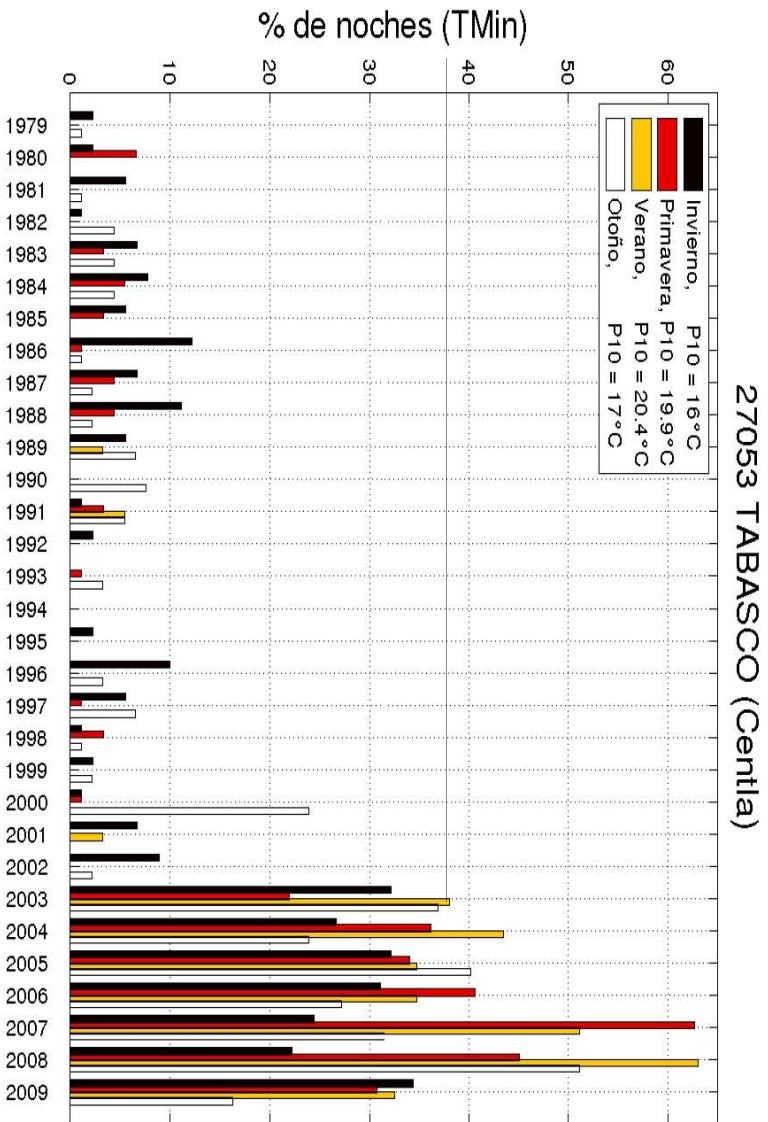


Figura 7.4.12: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Tabasco (arriba) y Campeche (abajo).

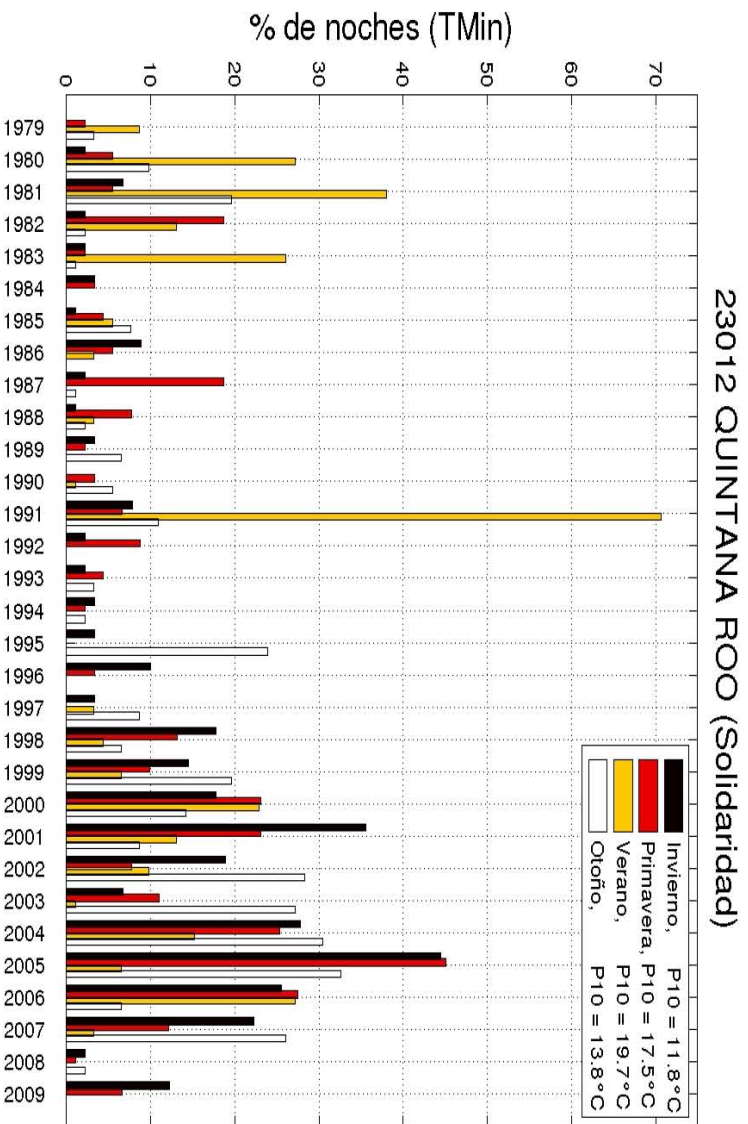
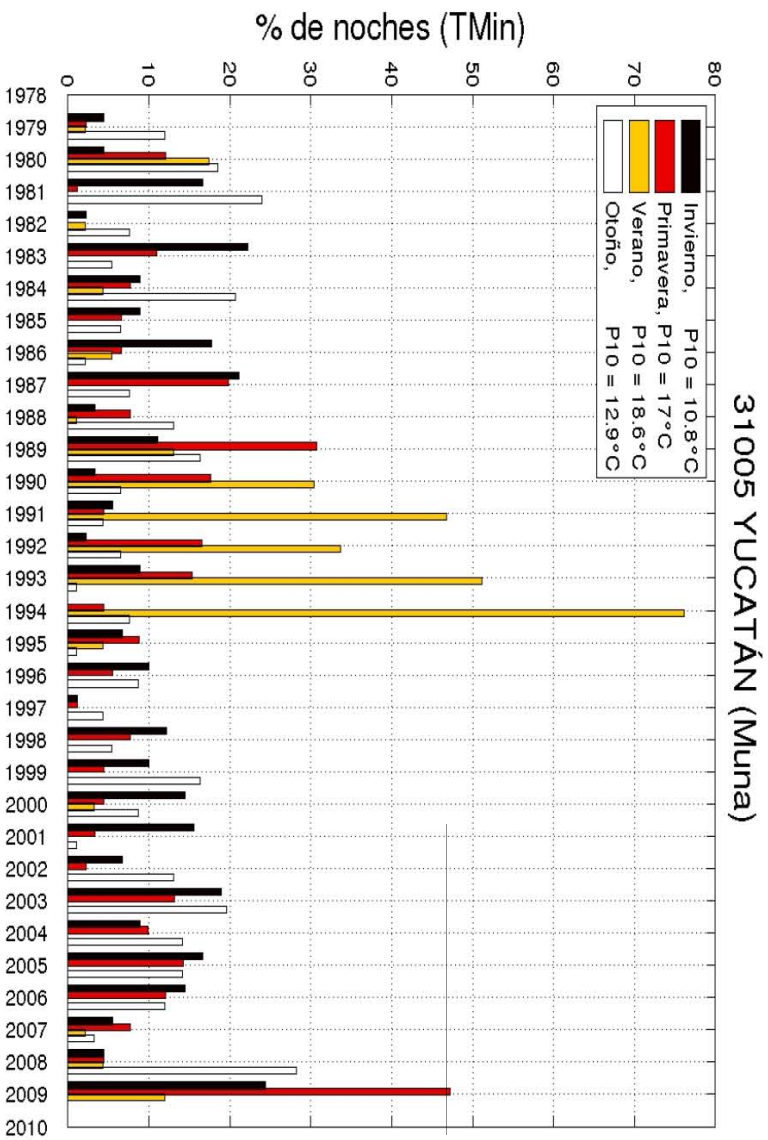


Figura 7.4.13: Porcentaje del número de noches frías con TMin menor al P10 de cada trimestre durante el período 1979-2009 para los sitios ubicados en Yucatán (arriba) y Quintana Roo (abajo).

7.5 Análisis de tendencias

A partir de las series de tiempo diarias obtenidas con el producto generado para los sitios correspondientes a las doce estaciones seleccionadas, se calcularon los promedios anuales para los 31 años del período 1979-2009 y se estimaron las tendencias y sus incertidumbres para las temperaturas máximas y mínimas mediante el ajuste lineal por mínimos cuadrados, como se explica en la sección 5.3.3. En las figuras 7.5.1 a 7.5.3 se muestran tanto las gráficas para TMax como para TMin para cada sitio de las regiones norte, centro y sureste del país, respectivamente, y en la Tabla 7.5.1 se resumen los resultados obtenidos.

REGIÓN NORTE				
	TMin (°C/año)		TMin (°C/año)	
SITIO	TENDENCIA	SIGNIFICATIVA	TENDENCIA	SIGNIFICATIVA
Sonora	0.104±0.038	SI	0.092±0.044	SI
Chihuahua	0.050±0.040	SI	0.079±0.029	SI
Coahuila	0.048±0.038	SI	-0.029±0.044	NO
Nuevo León	0.017±0.033	NO	-0.035±0.052	NO
REGIÓN CENTRAL				
	TMax		TMin	
SITIO	TENDENCIA	SIGNIFICATIVA	TENDENCIA	SIGNIFICATIVA
Edo. México	0.009±0.020	NO	-0.003±0.016	NO
D.F.	-0.010±0.018	NO	0.002±0.019	NO
Puebla	0.011±0.021	NO	0.029±0.019	SI
Tlaxcala	0.007±0.024	NO	0.043±0.017	SI
REGIÓN SURESTE				
	TMax		TMin	
SITIO	TENDENCIA	SIGNIFICATIVA	TENDENCIA	SIGNIFICATIVA
Tabasco	-0.028±0.028	NO	-0.110±0.041	SI
Campeche	-0.02±0.022	NO	-0.034±0.044	NO
Yucatán	0.027±0.038	NO	0.006±0.026	NO
Quintana Roo	-0.017±0.069	NO	-0.033±0.042	NO

Tabla 7.5.1. Tendencias de temperatura máxima (TMax) y mínima (TMin) considerando los promedios anuales para el período de 1979 a 2009 en las regiones norte, centro y sureste del país. Se indica si la tendencia resultó significativa.

Para el caso de la TMax, las tendencias resultaron positivas en todos los sitios de la región norte (Fig. 7.5.1), siendo significativas en Sonora, Chihuahua y Coahuila. Fué únicamente en estos tres sitios, de los doce seleccionados, en donde la tendencia resultó significativa. El valor más alto, de $\sim 0.10 \pm 0.04^\circ\text{C}/\text{año}$, se obtuvo en el sitio de Sonora. En la región central las tendencias resultaron positivas, con excepción del sitio localizado en el D.F., presentando valores similares de $\sim 0.01^\circ\text{C}/\text{año}$ en el Edo. Méx., Puebla y Tlaxcala (Fig. 7.5.2), lo cual representa un aumento menor de la TMax en comparación con el de la región norte. Para el D.F. se obtuvo una disminución de $-0.01^\circ\text{C}/\text{año}$ en el período analizado. De los sitios de la región sureste del país, únicamente el de Yucatán presentó una tendencia positiva, de $0.03^\circ\text{C}/\text{año}$, mientras que en los demás la tendencia fué negativa, con un valor relativamente pequeño en Campeche de $-0.002^\circ\text{C}/\text{año}$ y el más alto en Tabasco de $-0.03^\circ\text{C}/\text{año}$ (Fig. 7.5.3). Estos resultados indican que, en general, en la parte norte y centro del país las temperaturas máximas sufrieron un incremento mientras que en la región suroriental esta tendencia es contraria, sin olvidar que en la mayoría de los sitios las tendencias resultaron no significativas.

En cuanto a la TMin, las tendencias fueron significativas en dos sitios de la región norte (Sonora y Chihuahua), en dos del centro (Puebla y Tlaxcala) y en uno del sureste del país (Tabasco). En este caso, los sitios de Sonora y Chihuahua mostraron tendencias positivas altas de $\sim 0.09^\circ\text{C}/\text{año}$ y $\sim 0.08^\circ\text{C}/\text{año}$, respectivamente, mientras que en los sitios de Coahuila y Nuevo León la tendencia resultó negativa, con aproximadamente $-0.03^\circ\text{C}/\text{año}$ en ambos sitios. Con excepción del Edo. de México, que mostró una tendencia negativa y pequeña en la TMin de $-0.003^\circ\text{C}/\text{año}$, en el resto de los sitios de la región central las tendencias fueron positivas, yendo de $0.002^\circ\text{C}/\text{año}$ en el D.F. a $0.04^\circ\text{C}/\text{año}$ en Tlaxcala. Por el contrario, en la región sureste del país las tendencias fueron negativas en Tabasco, Campeche y Quintana Roo y sólo resultó positiva para el sitio de Yucatán, aunque relativamente pequeña. En términos generales, estos resultados indican que las regiones nor-noroccidental y centro del país sufrieron un incremento en las temperaturas mínimas a lo largo del período analizado, mientras que las regiones nor-nororiental y suroriental sufrieron un descenso. En esta última región, con excepción de Yucatán, tanto la TMax como la TMin han venido disminuyendo, lo que indicaría que en esta zona se está dando un enfriamiento. Por el contrario, en Sonora, Chihuahua, Puebla y Tlaxcala ambas temperaturas han venido aumentando lo que indicaría que se está dando un calentamiento en esos sitios.

Como se mencionó anteriormente, estos resultados deben tomarse con precaución debido a los errores y corrimientos en las series de datos observados que afectan al producto obtenido.

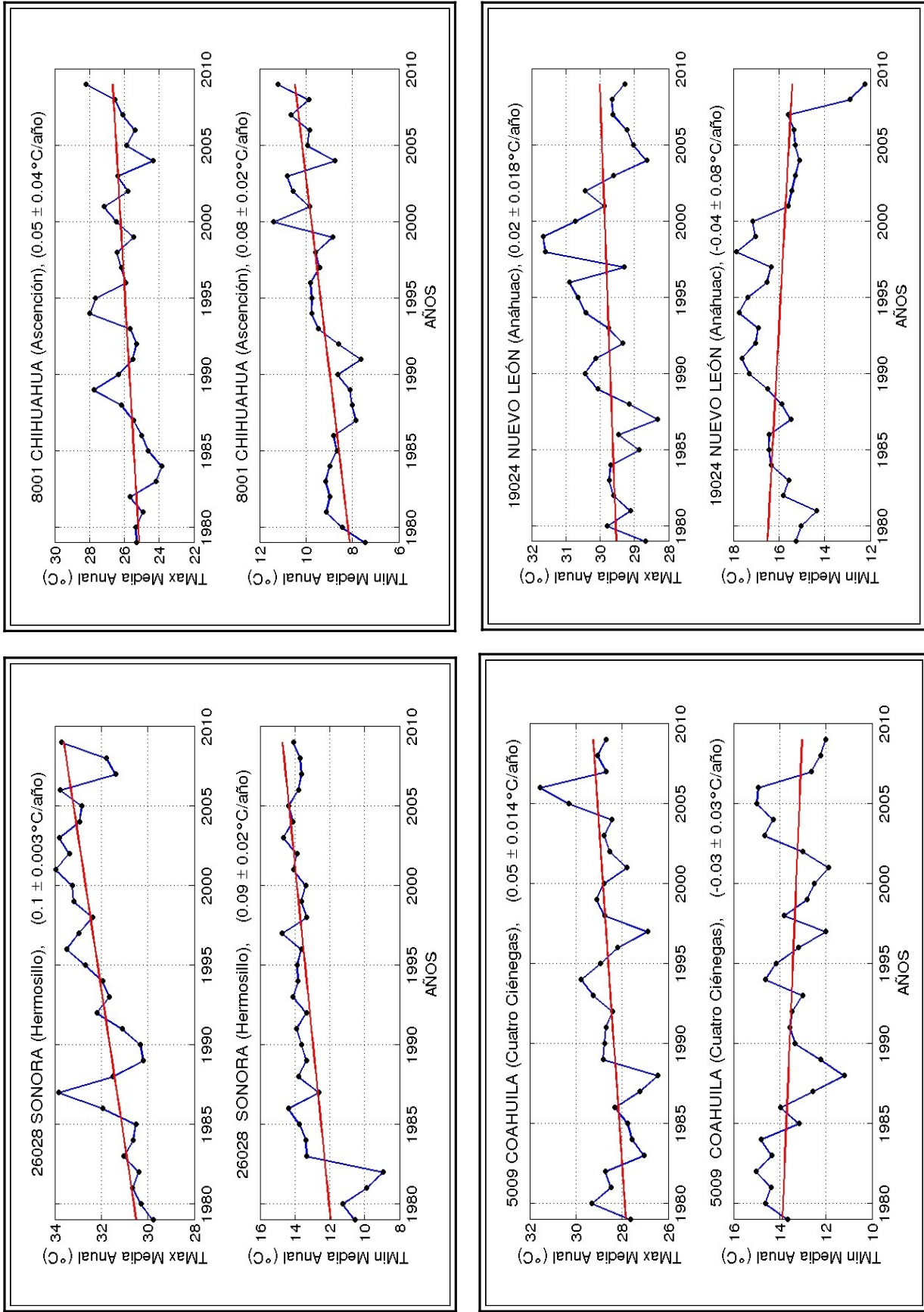


Figura 7.5.1: Gráficas de los promedios anuales (1979-2009) con tendencia para la región Norte.

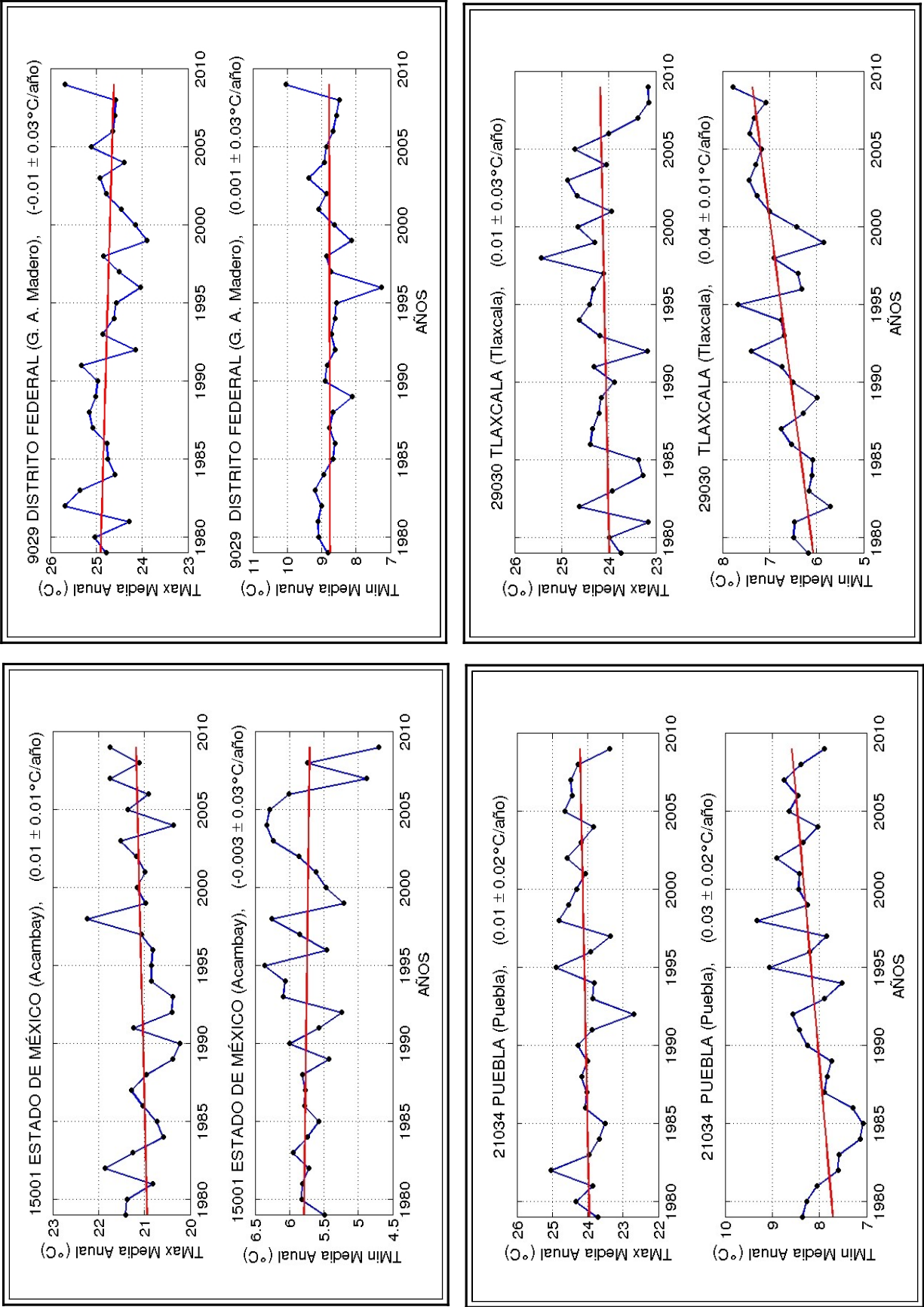


Figura 7.5.2: Gráficas de los promedios anuales (1979-2009) con tendencia para la región Centro.

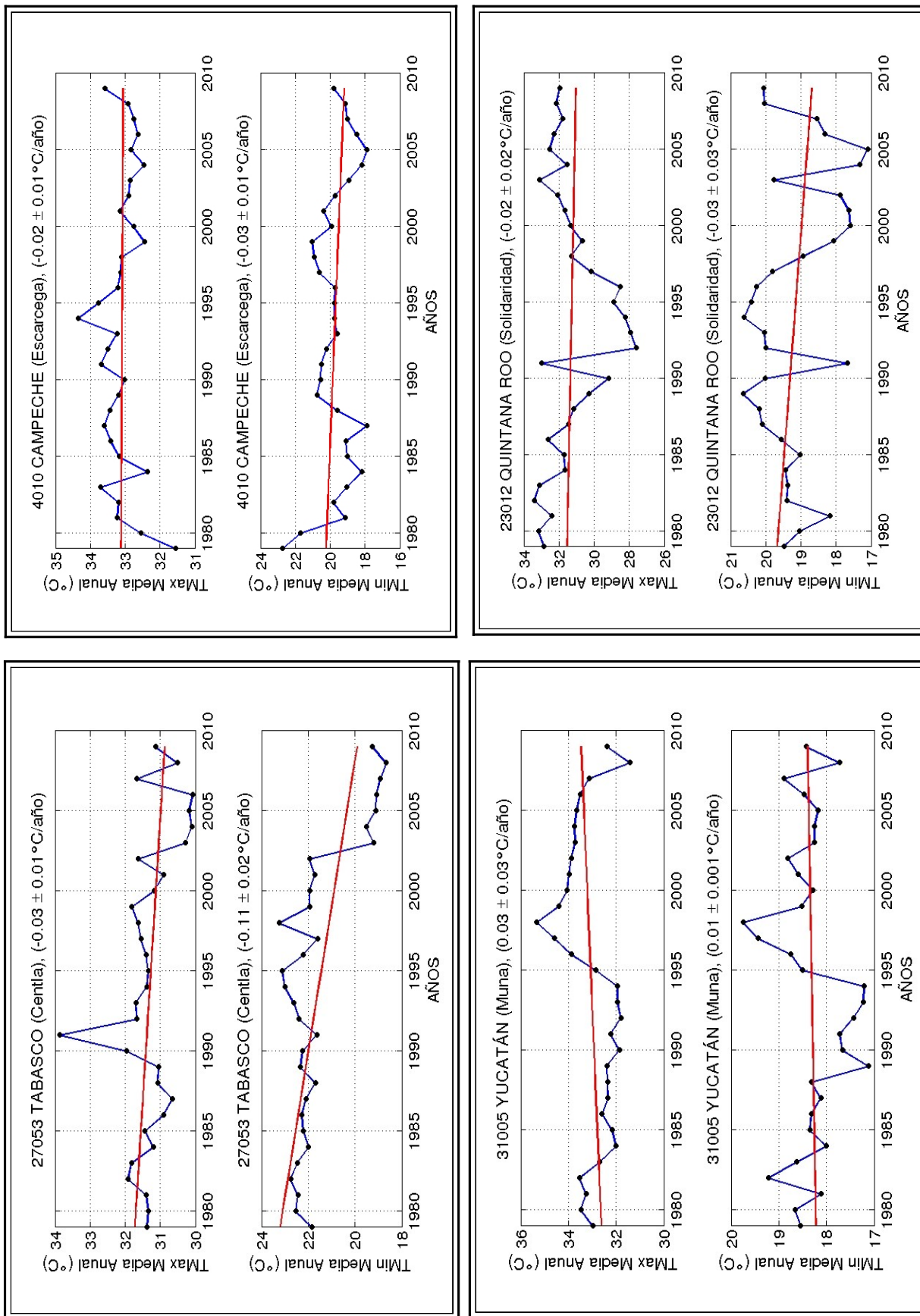


Figura 7.5.3: Gráficas de los promedios anuales (1979-2009) con tendencia para la región Sureste.

7.6 Análisis de las anomalías debidas al fenómeno ENSO

Se llevó a cabo un análisis de las anomalías mensuales de las temperaturas máximas y mínimas para el caso de dos eventos de El Niño intensos ocurridos durante el período 1979-2009: el de 1982-1983 y el de 1997-1998. El análisis se realizó únicamente para los meses de Noviembre a Abril de los eventos mencionados, ya que están entre los meses con las anomalías más altas de la TSM en el Pacífico tropical ecuatorial según el ONI (ver sección 4.3). Para ello, se calcularon las diferencias entre los mapas mensuales de la TMax y la TMin y los promedios climatológicos mensuales de los años considerados como neutros en el período analizado (Tabla 7.6.1).

MES	AÑOS NEUTROS
Noviembre	1979, 1980, 1981, 1985, 1989, 1990, 1992, 1993, 1996, 2001, 2003, 2005 y 2008
Diciembre	1979, 1980, 1981, 1985, 1989, 1990, 1992, 1993, 1996, 2001, 2003, 2005 y 2008
Enero	1979, 1980, 1981, 1982, 1984, 1986, 1990, 1991, 1993, 1994, 1997, 2002, 2004 y 2006
Febrero	1979, 1980, 1981, 1982, 1984, 1986, 1990, 1991, 1993, 1994, 1997, 2002, 2004, 2005 y 2007
Marzo	1979, 1980, 1981, 1982, 1984, 1986, 1988, 1990, 1991, 1993, 1994, 1997, 2001, 2002, 2004, 2005, 2006 y 2007
Abril	1979, 1980, 1981, 1982, 1984, 1986, 1988, 1990, 1991, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007

Tabla 7.6.1: Años con condiciones neutras durante el mes correspondiente según el índice ONI para el período 1979-2009²⁹.

A continuación se muestran los mapas de las anomalías de la TMax para los meses de Noviembre a Abril de 1982-1983 y de 1997-1998 (Figs. 7.6.1 a 7.6.3). Las gráficas muestran, en primer término, que el efecto sobre las temperaturas máximas en la República Mexicana de los eventos de El Niño analizados no es necesariamente el mismo. Por ejemplo, en el mes de Noviembre de 1982 las anomalías negativas más grandes se observan en la parte nor-noroccidental del país, mientras que en 1997 éstas se encuentran más hacia la parte nororiental (con algunas zonas de fuertes anomalías positivas cuyo origen debe analizarse con más cuidado). Sin embargo, en el mes de Diciembre el patrón de anomalías es similar en ambos años, con anomalías negativas que cubren gran parte del territorio, siendo más intensas en la región nor-noroccidental (Fig. 7.6.1). Algunas diferencias se observan principalmente en la región central del país.

²⁹ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

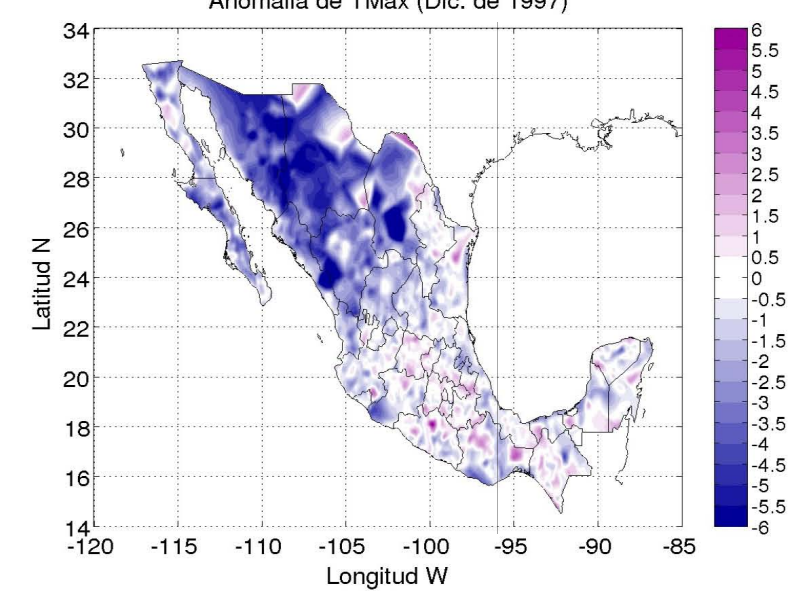
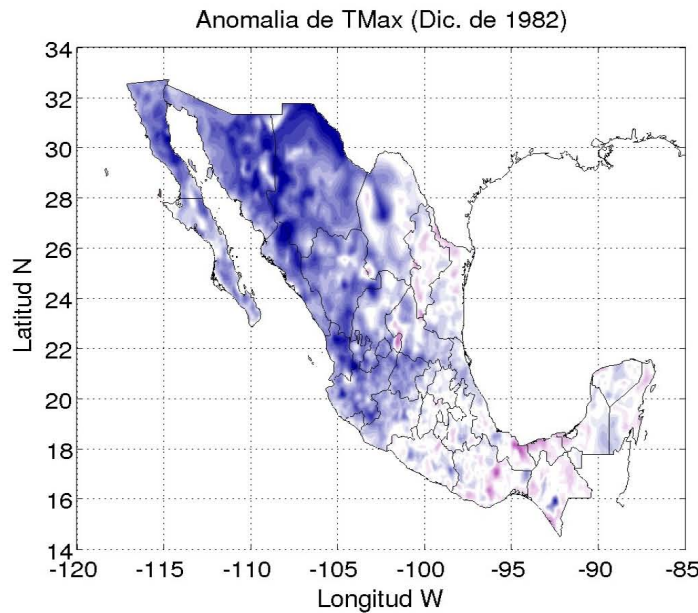
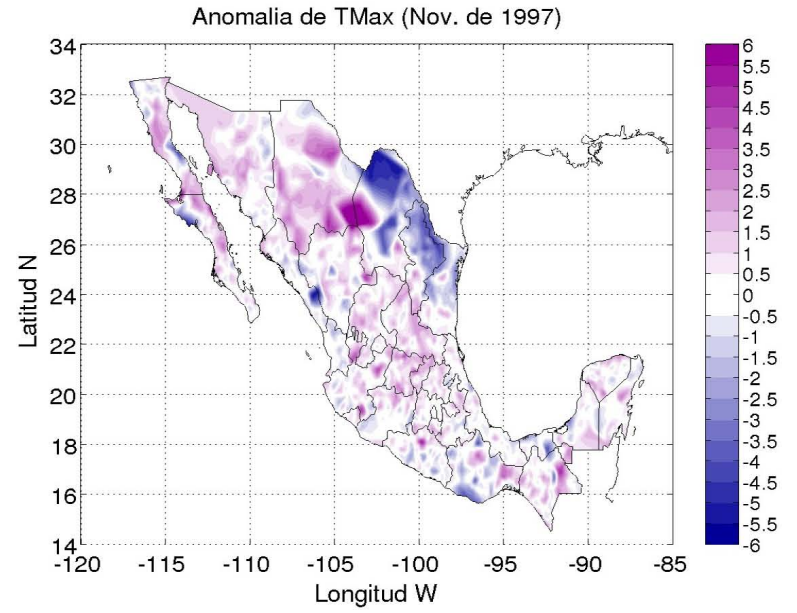
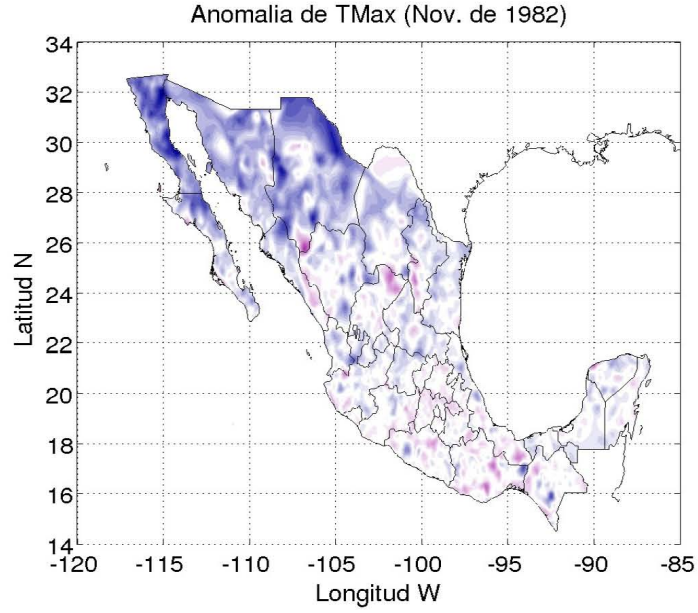


Figura 7.6.1 : Anomalías de la temperatura máxima para los meses de Noviembre y Diciembre de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).

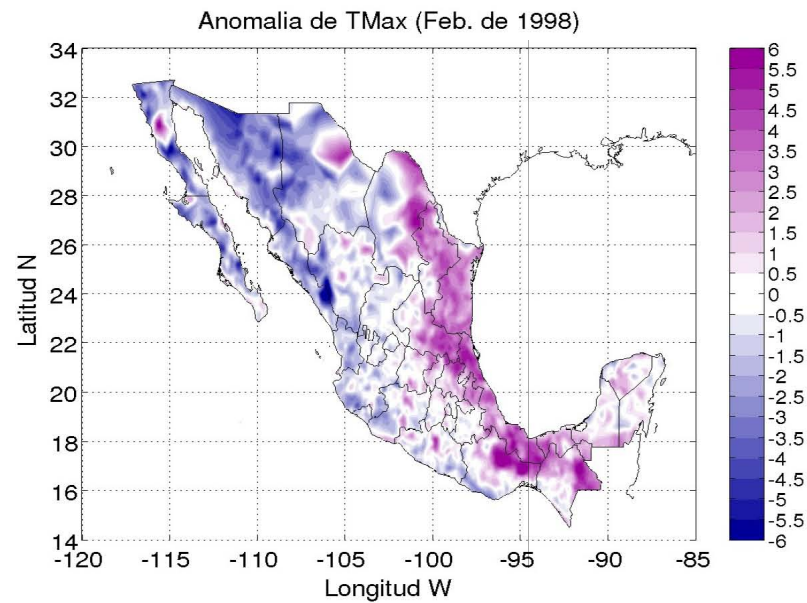
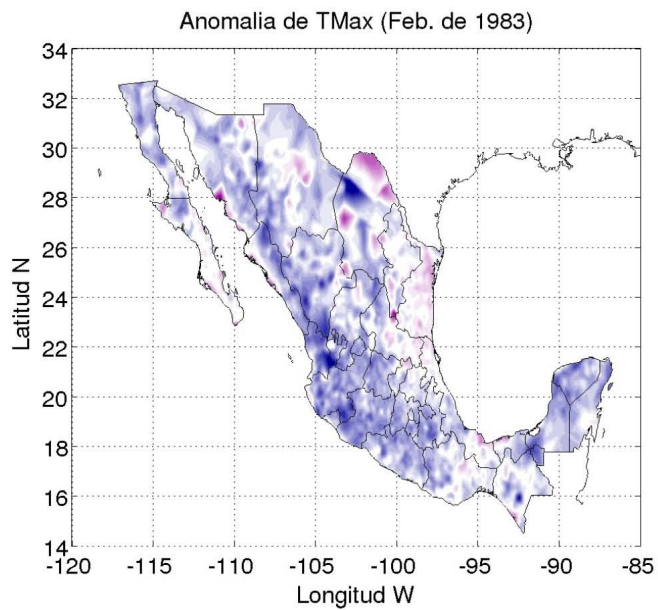
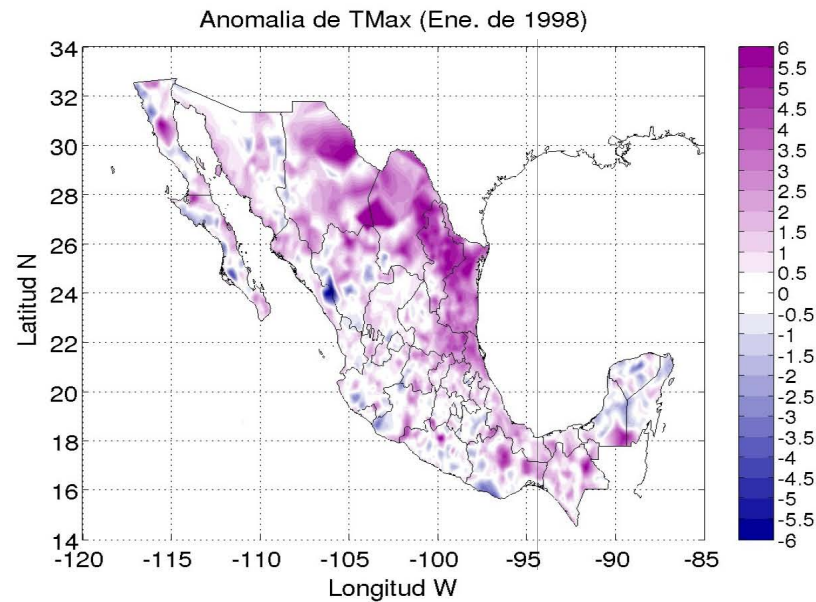
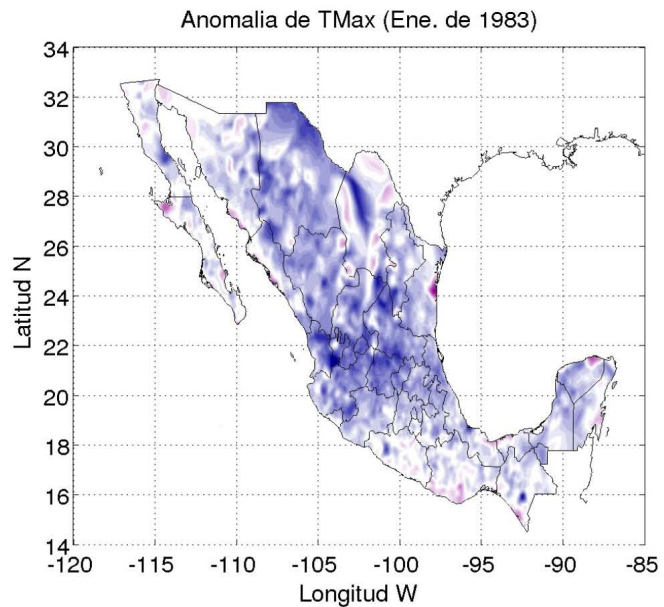


Figura 7.6.2 : Anomalías de la temperatura máxima para los meses de Enero y Febrero de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).

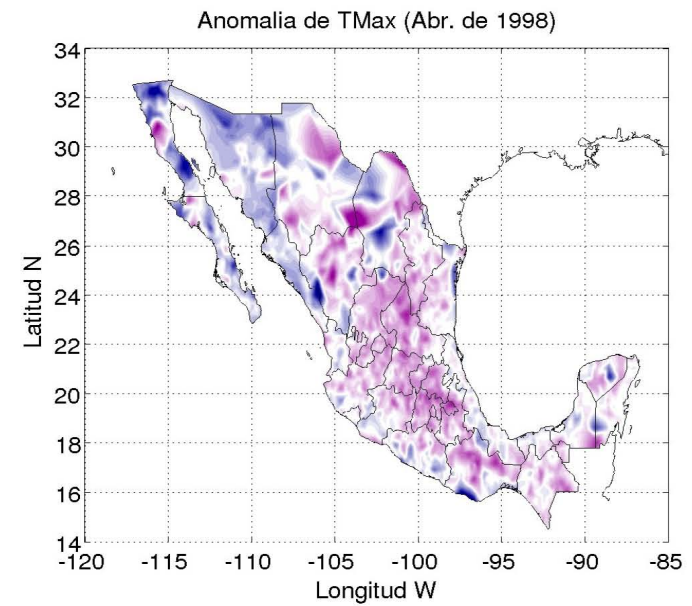
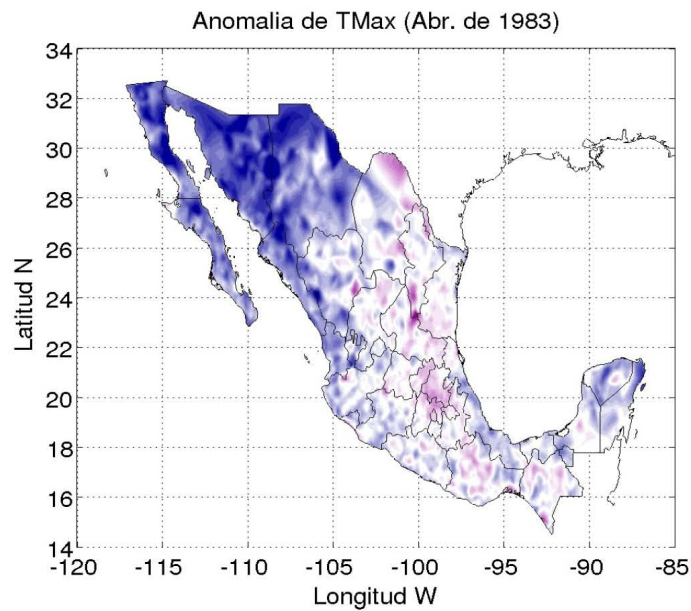
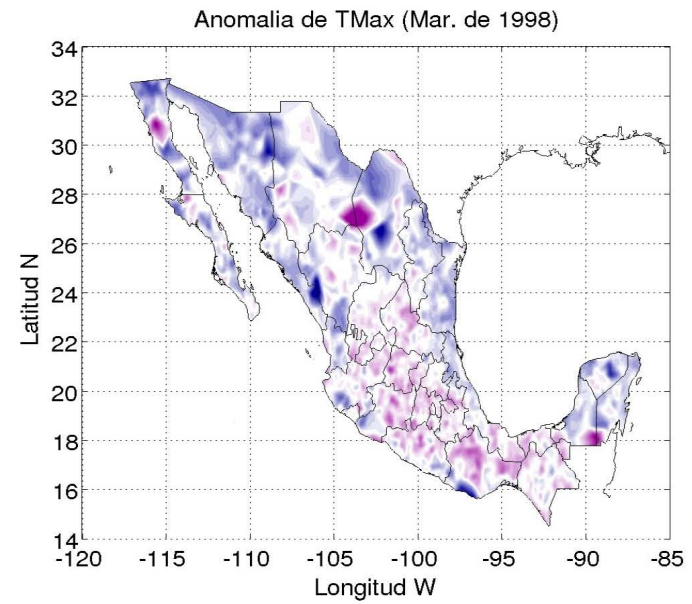
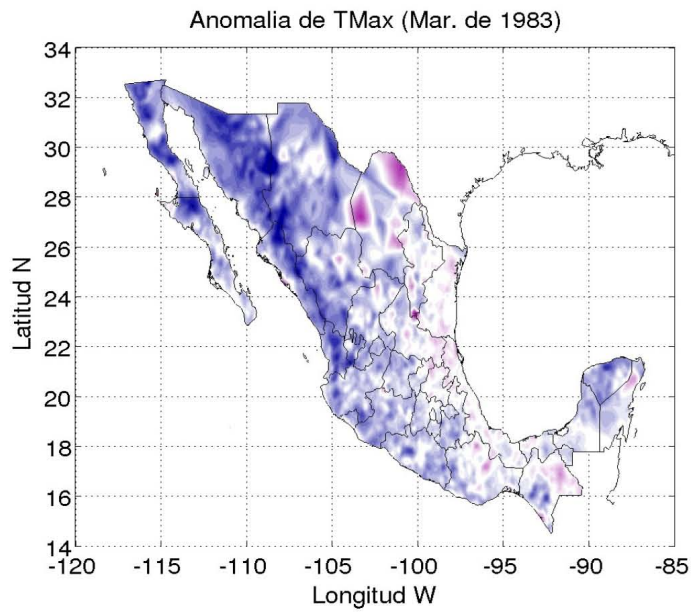


Figura 7.6.3 : Anomalías de la temperatura máxima para los meses de Marzo y Abril de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).

Las anomalías correspondientes a los meses de Enero y Febrero de 1983 y de 1998 muestran diferencias notables (Fig. 7.6.2). Mientras que en Enero de 1983 se observan fuertes anomalías negativas en la mayor parte del territorio mexicano, sobre todo en las regiones norte y centro, en 1998 se observan anomalías positivas en la región nor-nororiental y el resto del territorio presenta, en general, ligeras anomalías negativas. En Febrero de 1983 continuaron las anomalías negativas en gran parte del territorio, aunque con valores más pequeños que en Enero, con excepción principalmente de algunas zonas del norte del país y el estado de Tamaulipas. En el caso de 1998 son claras las fuertes anomalías positivas a lo largo de la región nororiental y los estados costeros del Golfo de México y las anomalías negativas en la región noroccidental y a lo largo de las costas del Pacífico, aunque estas últimas tienen valores más pequeños. En Marzo de 1983 las anomalías negativas más intensas parecen desplazarse otra vez hacia la región noroccidental, aunque prevalecen valores negativos en la mayor parte del país, con excepción de ciertas zonas del norte que muestran anomalías positivas fuertes y que habría que revisar con cuidado posteriormente (Fig. 7.6.3). Por su parte, el patrón de anomalías de Marzo de 1998 cambia considerablemente con relación al de Febrero, mostrando ahora ligeras anomalías negativas en el norte y la vertiente del Golfo de México y valores positivos, también relativamente pequeños, en la región central y sur del país. En Abril de 1983 parecen desplazarse aún más las anomalías negativas intensas hacia la región noroccidental y ahora se observan valores positivos relativamente pequeños en la parte central. En tanto, en Abril de 1998 gran parte del territorio presenta anomalías positivas, con excepción principalmente de algunas zonas al noroccidente.

A continuación se muestran los mapas de las anomalías de la TMin para los meses de Noviembre a Abril de 1982-1983 y de 1997-1998 (Figs. 7.6.4 a 7.6.6). En general, durante los meses de Noviembre de 1982 y 1997 se observan anomalías relativamente pequeñas, ya sea positivas o negativas, en la República Mexicana (Fig. 7.6.4). Sin embargo, en 1982 las anomalías son principalmente negativas, con excepción de algunas zonas en Sonora, Chihuahua, BCS y la península de Yucatán, mientras que en 1997 buena parte del territorio presenta valores positivos y las anomalías negativas se observan sólo en algunas zonas del norte del país. En Diciembre de 1982 el patrón es similar al de Noviembre y las anomalías siguen siendo relativamente pequeñas, mientras que en 1997 el patrón cambió drásticamente con relación al del mes anterior, mostrando anomalías negativas en la mayor parte del territorio con valores más elevados en el norte y centro-norte del país (Fig. 7.6.4).

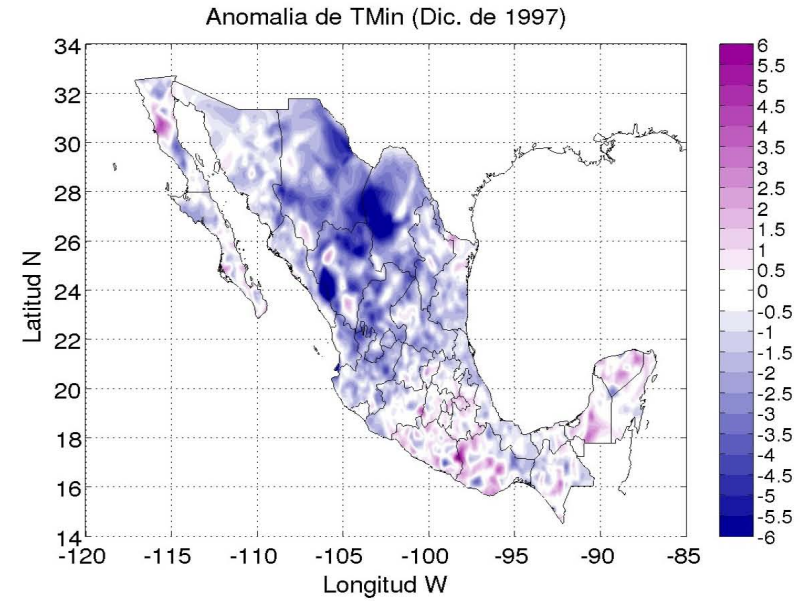
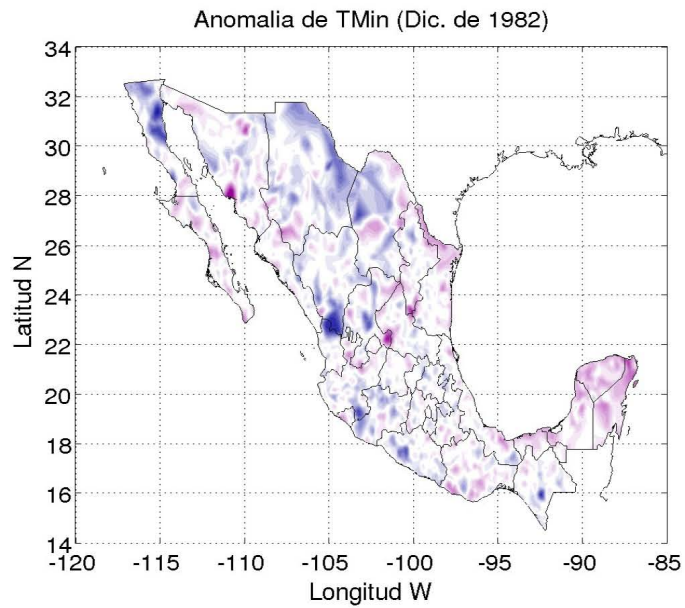
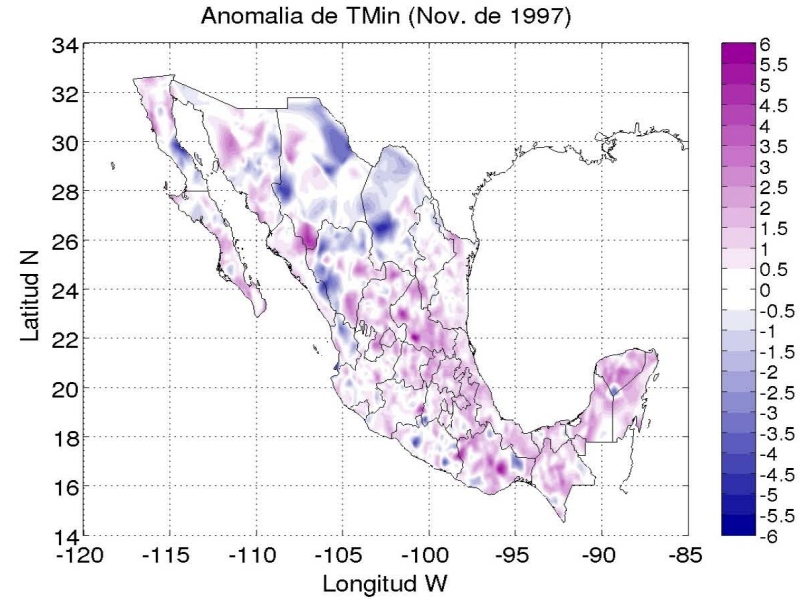
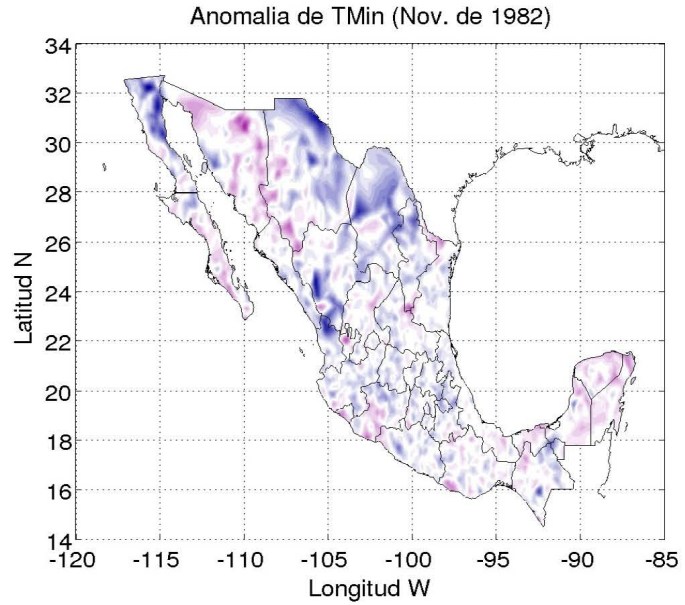


Figura 7.6.4 : Anomalías de la temperatura mínima para los meses de Noviembre y Diciembre de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).

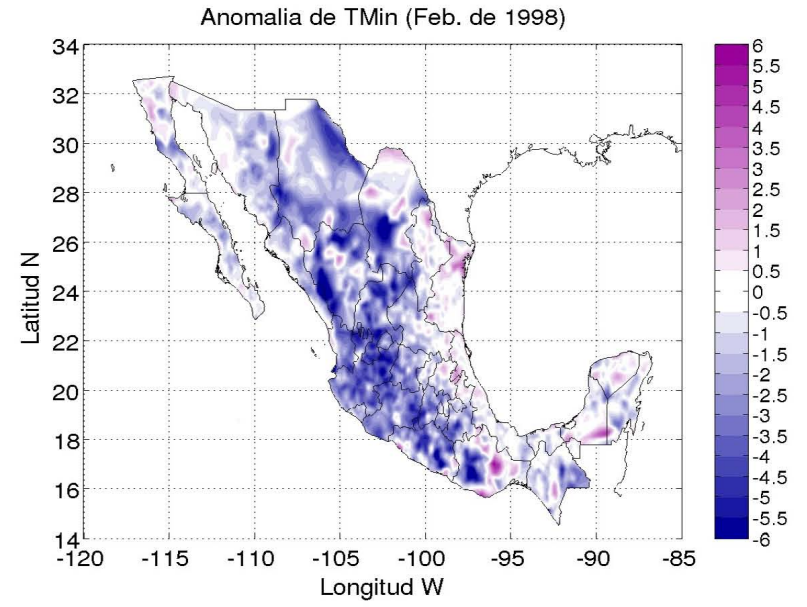
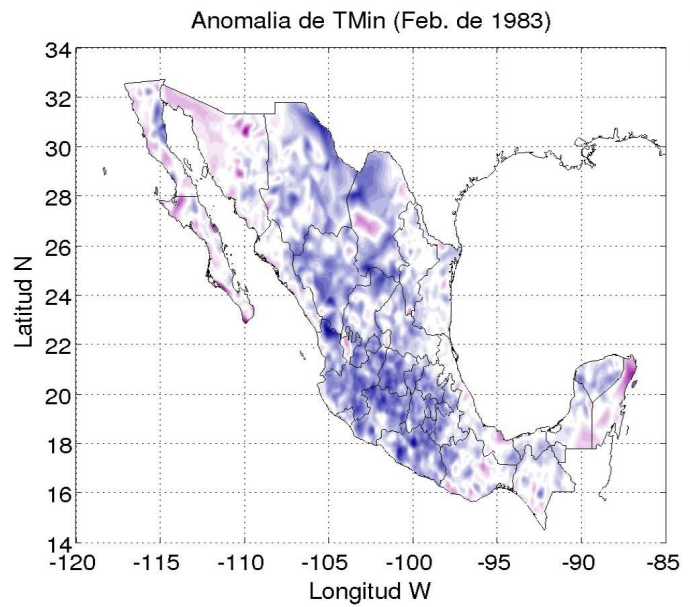
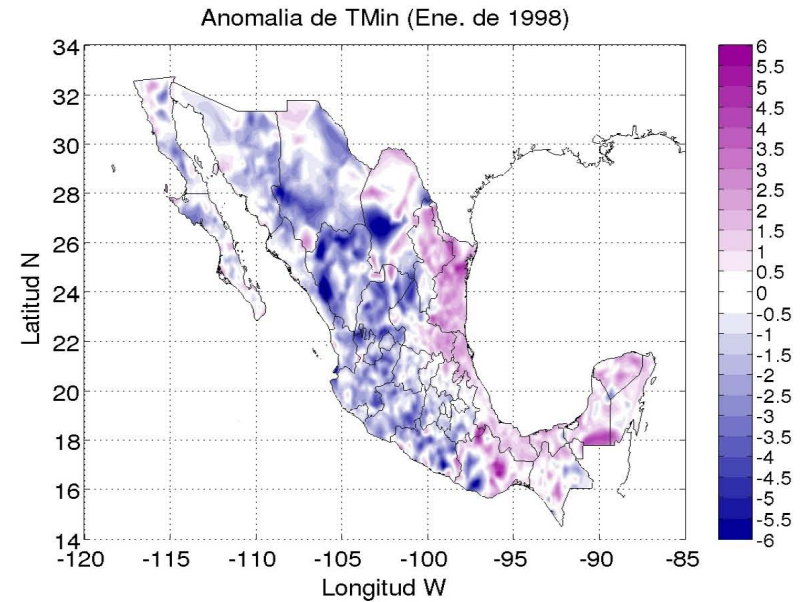
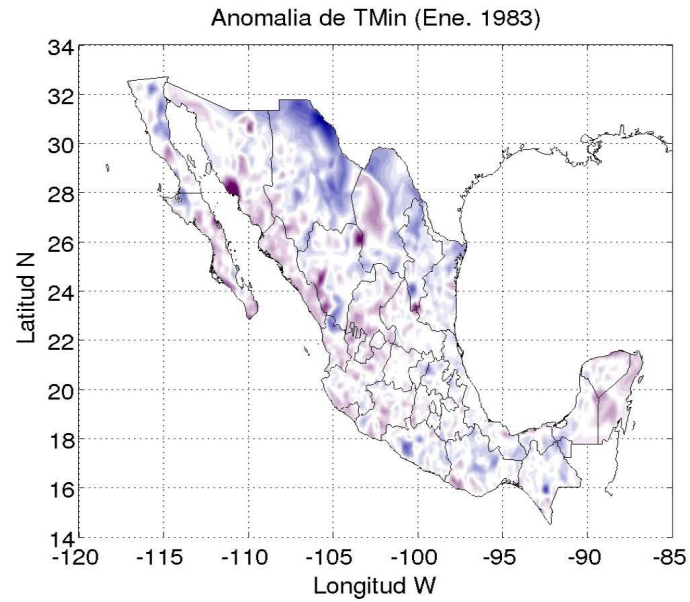


Figura 7.6.5 : Anomalías de la temperatura mínima para los meses de Enero y Febrero de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).

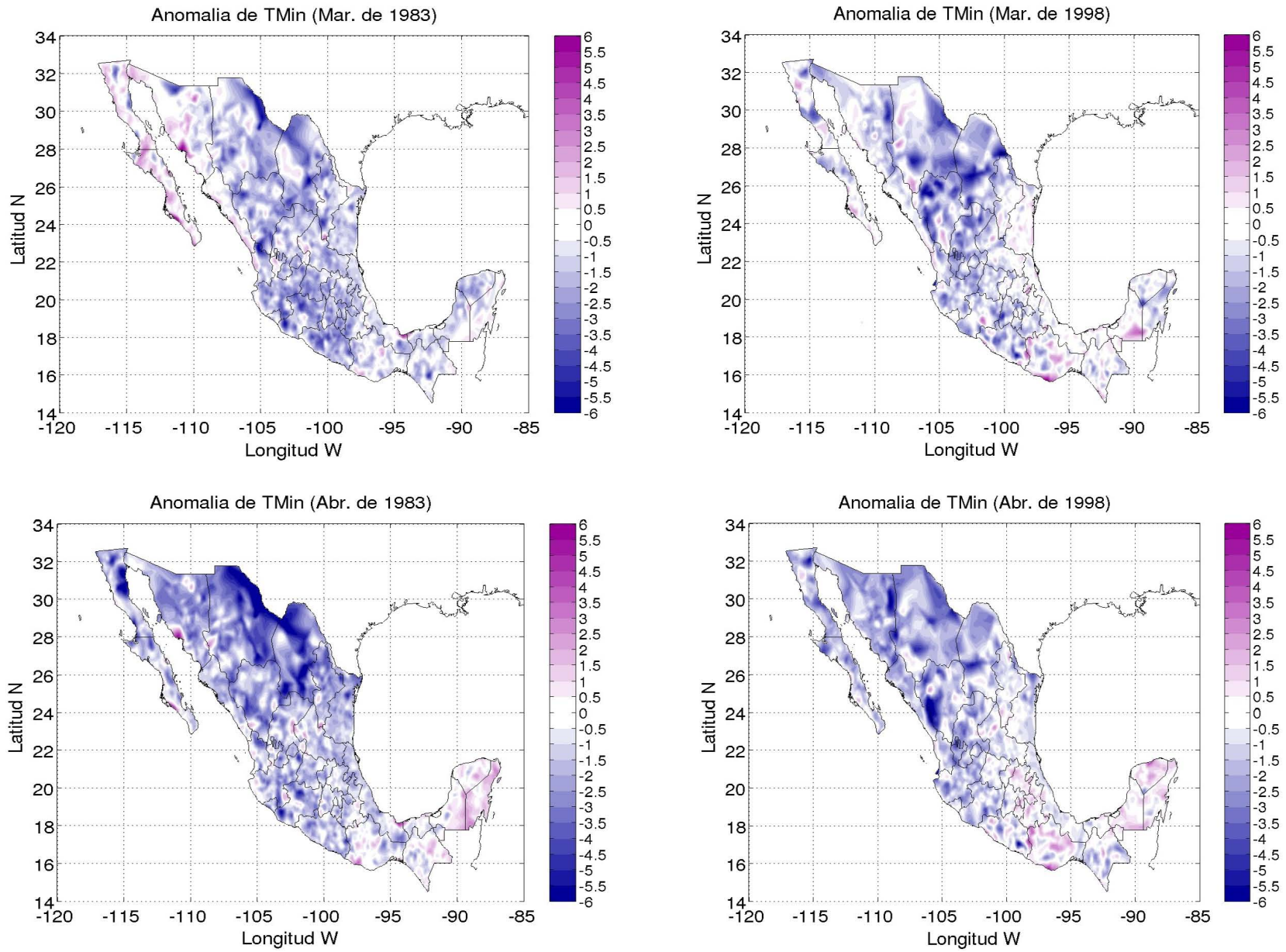


Figura 7.6.6 : Anomalías de la temperatura mínima para los meses de Marzo y Abril de los Niños intensos de 1982-1983 (Izquierda) y 1997-1998 (Derecha).

Para Enero de 1983 continúan las anomalías relativamente pequeñas, con cierto desplazamiento de los valores negativos hacia el norte y la vertiente del Golfo de México y positivos hacia las costas del Pacífico. Por el contrario, en Enero de 1998 predominan anomalías positivas en los estados costeros del Golfo de México, incluyendo la península de Yucatán y algunas regiones del sur, y anomalías negativas en el resto del territorio (Fig. 7.6.5). El patrón de anomalías se ve similar durante los meses de Febrero de 1983 y de 1998, con valores negativos en gran parte del país (aunque más intensos en 1998), principalmente sobre las regiones norte y centro-occidental. Las anomalías negativas prevalecen en gran parte del país durante los meses de Marzo de ambos años, con excepción, en 1983, de la península de B.C. y zonas costeras de Sonora y Sinaloa (Fig. 7.6.6). Para Abril, el patrón sigue mostrando anomalías negativas en ambos años cuyos valores más elevados parecen verse desplazadas hacia el norte y noroccidente, dejando con anomalías positivas a la península de Yucatán y algunas zonas del sur del país.

Resumiendo, se observa que los eventos intensos de El Niño de 1982-1983 y 1997-1998 afectaron de manera diferente al territorio mexicano. El evento de 1982-83 claramente produjo un ambiente más frío durante los meses de invierno (Noviembre-Abril), puesto que predominaron las anomalías negativas de TMax en la mayor parte del territorio. También predominaron los valores negativos en las anomalías de TMin a lo largo y ancho del territorio (sobre todo de Febrero a Abril de 1983), aunque fueron menores que para la TMax. Los patrones de anomalía fueron más variables durante el evento de 1997-98 en el cual sobresalen, por ejemplo, el mes de Diciembre de 1997 con anomalías negativas marcadas de TMax en la región noroccidental y el mes de Febrero de 1998 con importantes anomalías positivas en la región nororiental y los estados costeros del Golfo de México y partes de Oaxaca y Chiapas. También las anomalías de TMin muestran más variabilidad durante este evento, aunque sí se observan temperaturas más bajas de lo normal en gran parte del país sobre todo de Febrero a Abril. Una característica que se observa es que la región menos afectada durante estos eventos, en términos de la magnitud de las anomalías tanto de TMax como de TMin, fue la Península de Yucatán.

CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvieron mapas diarios de las temperaturas máximas y mínimas para la República Mexicana utilizando la información de más de 5,000 estaciones climatológicas del SMN ubicadas a lo largo y ancho del país, la base de datos del reanálisis de Norteamérica (NARR), la información de varias estaciones de los E.U.A. cercanas a la frontera con México y los datos de elevación del terreno de la base GEBCO con un minuto de resolución espacial (~1.85 km). El procesamiento de los datos incluye un método de interpolación y de estimación de la temperatura del aire tomando en cuenta la altitud en cada punto, así como un método de control de calidad de los datos. Con los mapas así generados se obtuvieron series de tiempo diarias completas de las TMax y TMin para el período de 1979 a 2009 que se usaron para describir la climatología mensual, la variabilidad estacional, la ocurrencia de eventos extremos, las tendencias en dicho período y las anomalías producidas sobre estas variables por los eventos intensos de El Niño de 1982-83 y 1997-98.

En general, los resultados muestran que el producto obtenido reproduce adecuadamente las variaciones de temperatura observadas en algunas regiones, mientras que en otras el producto subestima o sobrestima los valores observados. Esto se debe, principalmente, a los múltiples errores que existen en los registros de la base de datos histórica del SMN, a la falta de observaciones en períodos largos de tiempo y a la baja densidad de estaciones en algunas regiones del país. Aún cuando el método empleado “corrige” algunos errores en las observaciones, no elimina ciertos registros dudosos que finalmente afectan el proceso de interpolación. A pesar de esto, se logró obtener un producto de alta resolución espacial y temporal que completa la información diaria de manera razonable para el período elegido y permite realizar distintos tipos de análisis sobre el clima de nuestro país.

Entre los análisis realizados en este trabajo de tesis, los cuales están basados en las series de tiempo correspondientes a doce sitios seleccionados a lo largo del país, está la descripción de los ciclos estacionales de TMax y TMin. Estos muestran un clima extremoso en el norte y un desfase en cuanto a los meses en los que se alcanzan las TMax más altas, siendo entre Junio y Agosto para la región norte y

entre Abril y Mayo para las regiones del centro y sureste del país. En general, las TMin más bajas se presentan en los meses de Diciembre y Enero en todo el territorio, aunque puede haber otros meses en los que ocurran temperaturas bajas atípicas asociadas, por ejemplo, con eventos meteorológicos como los frentes fríos. El análisis también muestra diferencias en cuanto a la dispersión y asimetría de las distribuciones mensuales de las temperaturas en las distintas regiones.

El análisis de valores extremos muestra que las TMax más elevadas, de hasta 48°C, ocurrieron en la región norte del país, seguida por la región sureste, con temperaturas cercanas a los 45°C, y la parte central del territorio, con valores extremos de entre 32° y 35°C. En general, los valores extremos obtenidos con el producto son similares a los reportados por las estaciones, aunque con una ligera subestimación. Se observó también que, en términos generales, las TMax extremas en los sitios del centro del país ocurrieron durante la primavera siguiente a la ocurrencia de un evento de El Niño intenso, mientras que en los del norte ocurrieron durante el verano pero en condiciones diversas de ENSO y en los del sureste ocurrieron en condiciones de La Niña. En cuanto a la TMin, los valores más bajos se alcanzaron en las zonas altas de la región norte, cercanas a -12°C, mientras que en el centro del país llegaron a -4°C y en el sureste varían entre 4°C y 10°C (aunque se debe señalar que la mínima extrema en el sitio de Quintana Roo, de 4°C, coincide con el año en donde hay registros erróneos en la estación). En este caso no se observó un patrón de asociación claro con el fenómeno de ENSO.

En general, el análisis de valores extremos de TMax y TMin por percentiles trimestrales muestra una gran variabilidad interanual y diferencias marcadas entre los sitios, con algunas coincidencias en cuanto a períodos cálidos y/o períodos fríos. Por ejemplo, en la región central los porcentajes de días cálidos extremos durante las primaveras de 1983 y 1998 fueron relativamente altos, cuando empezaba a disminuir la intensidad de los eventos de El Niño de esos años en el Pacífico tropical. En concordancia con los resultados de los ciclos estacionales, se tiene que el valor más alto del percentil 90 para la TMax en la región norte corresponde al trimestre de verano (Julio-Septiembre), mientras que en el centro y sureste del país corresponde al de primavera (Abril-Junio). Los resultados en detalle se presentan en la sección 7.4. Sin embargo, cabría señalar que dichos resultados deben tomarse con precaución debido a que existen algunos corrimientos en las series de tiempo, que afectan los porcentajes estimados de noches frías y días cálidos extremos en las distintas épocas del año, sobre todo en la región suroriental del país.

Las tendencias de los promedios anuales de TMax y TMin, calculadas mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados y sin considerar cuestiones de homogeneidad en las series, indican que tanto en el

norte como en el centro del país (con excepción del sitio ubicado en el D.F.) las temperaturas máximas sufrieron un incremento durante el período de 1979 a 2009, mientras que en la región suroriental la tendencia fue contraria (con excepción del sitio de Yucatán), aunque en la mayoría de los casos las tendencias resultaron no significativas. En términos generales, los resultados indican que las regiones nor-noroccidental y centro del país (con excepción del sitio en el Edo. de México) sufrieron un incremento en las temperaturas mínimas a lo largo del período analizado, mientras que las regiones nor-nororiental y suroriental sufrieron un descenso. Con excepción de Yucatán, los sitios del sureste muestran que ambas, la TMax y la TMin, han venido disminuyendo lo cual indicaría que en esta zona se está dando un enfriamiento; por el contrario, en Sonora, Chihuahua, Puebla y Tlaxcala ambas temperaturas han venido aumentando. Estos resultados también deben tomarse con precaución ya que los errores y corrimientos en las series de datos observados afectan al producto obtenido.

Finalmente, el análisis de las anomalías mensuales de TMax y TMin, calculadas con respecto a los promedios de años neutros, para los meses de Noviembre a Abril durante los eventos intensos de El Niño de 1982-1983 y 1997-1998 muestra que estos fenómenos afectaron de manera diferente al territorio mexicano. Durante el evento de 1982-83 predominó un ambiente más frío en la mayor parte del territorio, con anomalías negativas para ambas temperaturas en dichos meses. Este patrón no fue tan evidente durante el evento de 1997-98, aunque sí se observan temperaturas mínimas más bajas de lo normal en gran parte del país de Febrero a Abril. Durante este evento son notables las anomalías negativas de TMax en la región noroccidental en el mes de Diciembre de 1997, mientras que en el mes de Febrero de 1998 se presentaron importantes anomalías positivas en la región nororiental y los estados costeros del Golfo de México y partes de Oaxaca y Chiapas. La región menos afectada durante estos dos eventos, en términos de la magnitud de las anomalías de TMax y TMin, fue la Península de Yucatán.

Es importante mencionar que los mapas generados en este trabajo han servido como base para los productos mensuales que están disponibles actualmente a través del Atlas Climático Digital de México (<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>).

Trabajo futuro

Dado que el producto obtenido presenta algunas limitaciones, se pretende continuar depurando el procedimiento para lograr mejores resultados al eliminar y corregir de forma automática valores erróneos en las observaciones. Asimismo, se implementará un método eficiente para la revisión de datos dudosos y se trabajará también con los datos históricos de precipitación.

Una vez depurado el procedimiento y evaluado el producto, se pueden realizar estudios más completos y detallados sobre los siguientes temas:

- ✓ Regionalización de la República Mexicana a partir de la variabilidad de la temperatura máxima y mínima.
- ✓ Análisis de la variabilidad estacional e interanual a nivel local y regional.
- ✓ Análisis de tendencias y de eventos extremos a nivel local y regional.
- ✓ Influencia de los eventos de El Niño y La Niña sobre el clima del país.

ANEXO A

MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

La interpolación es un procedimiento que sirve para estimar el valor de una variable climática en lugares no muestreados a partir de los valores de datos observados (Hartkamp et al.). La interpolación puede utilizarse para: a) estimar valores (x_i, y_i) en lugares específicos y colocarlos dentro de una malla regular y b) cambiar la resolución de la malla regular. Existen varios métodos de interpolación. A continuación se describen brevemente los métodos utilizados en la presente tesis.

a) Interpolación IDW

El Método IDW (por sus siglas en inglés, Inverse Distance Weighting) es un método de interpolación multivariada para un conjunto de datos dispersos y conocidos. Los datos interpolados u , dependen de la suma pesada de los N datos conocidos x_i más cercanos. El peso es una función inversa de la distancia que separa el dato conocido del dato que se quiere interpolar³⁰. Para encontrar el valor interpolado u a un punto dado x basado en muestras $u_i = u(x_i)$ para $i = 0, 1, \dots, N$ se usa la formulación:

$$u(x) = \sum_{i=0}^N \left[\frac{(\omega_i(x) u(i))}{\sum_{j=0}^N (\omega_j(x))} \right]$$

donde

$$\omega_i = \frac{1}{[d(x, x_i)^p]}$$

donde ω_i es la función pesada IDW, x denota un punto interpolado, x_i son los datos conocidos más cercanos al punto interpolado, d es la distancia que se mide desde el punto conocido x_i hasta el punto desconocido x , N es el número total de puntos conocidos usados para interpolar y p es un número real positivo, llamado parametro de potencia.

30 http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_distance_weighting

Si el parámetro de potencia está entre $0 < p < 1$ la superficie interpolada $u(x)$ tiene picos suaves. Si $p > 1$, los picos son más finos, por tanto, entre mayor sea p , más suave es la superficie interpolada. La suavidad de la superficie interpolada depende del valor de p , de la densidad y de la distribución de los datos observados, además de la distancia entre los datos observados y el punto interpolado.

b) Función *griddata*

La función *griddata* genera una malla regular a partir de datos dispersos conocidos usando algún método de interpolación. La función se define como:

$$z = f(x, y)$$

donde x , y , z son vectores de la misma longitud o también puede ser que x e y sean vectores y z una matriz. Los puntos interpolados son todos los (x_i, y_i) , construidos sobre una malla regular en dos dimensiones. En MATLAB se usa la función:

$$z_i = \text{griddata}(x, y, x_i, y_i, \text{method})$$

La función z_i ajusta una superficie a los datos conocidos y regresa los valores interpolados (x_i, y_i) . La superficie ajustada pasa siempre por los datos conocidos (x, y) . Los métodos (*method*) de interpolación opcionales son³¹:

- ✓ **Linear:** Interpolación lineal basada en la triangulación.
- ✓ **Cubic:** Interpolación cúbica basada en la triangulación.
- ✓ **Nearest:** Interpolación del vecino más cercano.

En MATLAB, si no se especifica el método toma el lineal arbitrariamente.

Para lograr que la malla sea más fina y aumentar su resolución se tiene que interpolar una vez, y luego agregar a los datos originales los puntos interpolados y repetir el proceso de interpolación hasta obtener la superficie deseada.

31 http://matplotlib.sourceforge.net/api/mlab_api.html#matplotlib.mlab.griddata

ANEXO B

I. MEDIDAS DE DISPERSIÓN

Las medidas de dispersión miden el grado de variabilidad de los datos, independientemente de su causa. Un valor pequeño (grande) en una medida de dispersión indica que los datos están amontonados alrededor (alejados) de la media.

Rango intercuartil

Se define como la diferencia entre el Tercer Cuartil (Q_3) y el Primer Cuartil (Q_1)³², es decir:

$$R_Q = Q_3 - Q_1$$

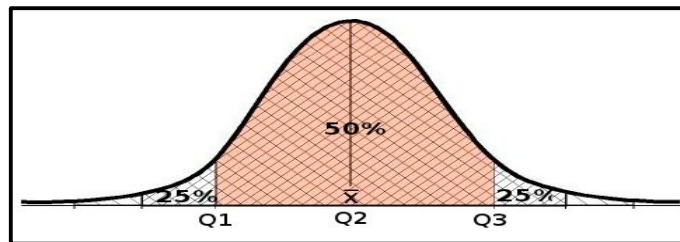


Figura B1: El área sobreada representa el rango intercuartil donde se encuentra el 50% de los datos.

El rango intercuartil es donde se encuentra el 50% de los datos. A la mitad del rango intercuartil se le conoce como *Desviación Cuartil* (D_Q):

$$D_Q = \frac{R_Q}{2} = \frac{(Q_3 - Q_1)}{2}$$

El rango intercuartil se utiliza para construir *Diagramas de Caja* que sirven para visualizar la variabilidad de una variable y comparar las distribuciones de la misma; además de ubicar los valores extremos:

32 http://www.slideshare.net/profe_simmons/estadistica-i-05-presentation

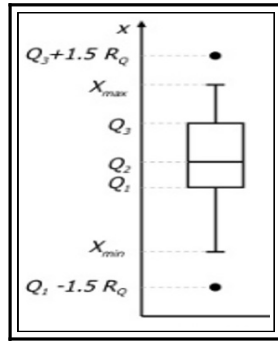


Figura B2: Diagrama de caja que representa cada uno de los cuartiles y la ubicación de los valores extremos.

Varianza

La varianza y la desviación estándar indican qué tanto varían las medidas de una serie de datos unos con respecto a otros y normalmente sólo se calculan cuando el número de datos es muy grande. En una distribución normal (gaussiana) de una gran cantidad de datos, se tiene que aproximadamente el 68% de los datos cae dentro de una desviación estándar a partir de la media ($x \pm 2\sigma$). Si el rango se extiende a una variación de 2 desviaciones estándar, es decir, ($x \pm 2\sigma$), entonces aproximadamente el 95% de los datos caerá en ese rango, como se muestra en la figura B3. La varianza también se puede interpretar como el promedio de las desviaciones (al cuadrado) de las observaciones respecto a la media o la mediana. Al elevar al cuadrado cada una de las desviaciones se logra que ellas sean positivas y a su vez, que las desviaciones más grandes tengan más peso³³. La varianza es sensible a los valores extremos. La varianza se define como:

$$s^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(N - 1)} \right]$$

Esta medida de dispersión permite calcular con buen grado de precisión dónde están localizados los valores de una distribución de frecuencias respecto a la media. Entre mayor sea el valor de la varianza, mayor es la dispersión de los datos.

³³ <http://www.slideshare.net/zoraidaperezs/guia-contenido2>

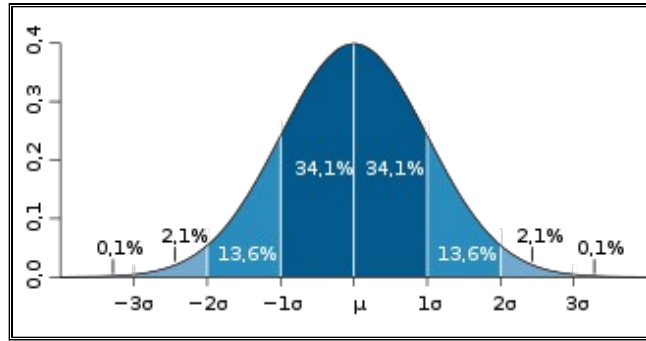


Figura B3: Distribución normal³⁴.

Desviación estándar

La desviación estándar (σ) es una medida de la dispersión de los datos e indica cómo se agrupa o distribuye un conjunto de datos alrededor de la media. Además proporciona una estimación del error en la predicción de los datos³⁵. De hecho, la desviación estándar es el promedio de la distancia de cada punto respecto al promedio. Se define como la raíz cuadrada de la varianza:

$$\sigma = \sqrt{s}$$

II. MEDIDAS DE POSICIÓN

Percentiles

Los percentiles dividen a un conjunto de datos en cien partes iguales³⁶. Los percentiles dan los valores correspondientes al 1%, 2%, 3%, ..., 99% de los datos. El percentil 50 (P50) coincide con la mediana. El percentil dice cómo está posicionado un valor respecto al total de los datos. Para calcular el percentil, primero se ordenan los N datos de menor a mayor. Posteriormente se usan las siguientes ecuaciones para datos no agrupados:

Si N es par $P_A = A \frac{N}{100}$

Si N es impar $P_A = A \frac{(N+1)}{100}$

donde A es el percentil que se quiere calcular.

34 http://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_normal

35 <http://www.slideshare.net/jgbd127/medidas-de-dispersin-y-variabilidad>

36 <http://www.slideshare.net/elimiguelito/medidas-de-dispersion>

Cuartiles

Los cuartiles son los tres valores de una variable que dividen a un conjunto de datos en 4 partes iguales. Se denotan como primer cuartil (Q_1), segundo cuartil (Q_2) y tercer cuartil (Q_3) determinan los valores correspondientes al 25%, 50% y 75% de los datos es decir, Q_1 es el valor por debajo del cual está el 25% de los datos, Q_2 coincide con la mediana y Q_3 es el valor por debajo del cual queda el 75% de los datos. Para datos no agrupados, los cuartiles se calculan primero ordenando los datos y después mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Primer cuartil } Q_1 = \frac{(N+1)}{4}$$

$$\text{Segundo cuartil } Q_2 = 2 \frac{(N+1)}{4} = \text{mediana}$$

$$\text{Tercer cuartil } Q_3 = 3 \frac{(N+1)}{4}$$

III. MEDIDAS DE FORMA

Sesgo

El sesgo de una distribución de frecuencias hace referencia al grado en que valores de una variable, equidistan de un valor que se considera el centro de la distribución (media).

Las curvas que representan un conjunto de datos pueden ser simétricas o sesgadas. Las curvas simétricas tienen una forma tal que la media de los datos divide a la curva en dos partes iguales (Figura B1a), en este caso la media, la moda y la mediana son iguales. Si los valores se concentran en un extremo se dice que la distribución es sesgada (Figura B1b y B1c).

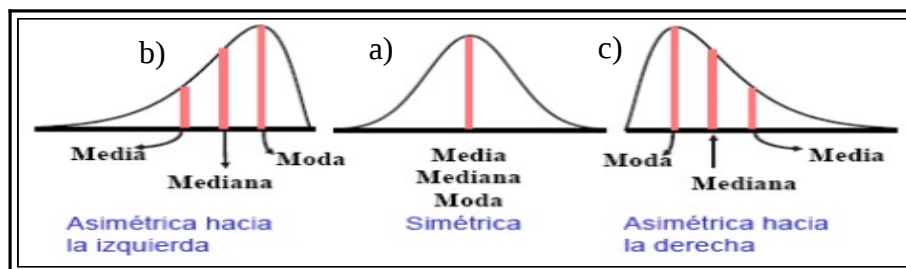


Figura B1: Representación del sesgo en una distribución de datos.

El sesgo se calcula mediante el llamado *coeficiente de sesgo*³⁷:

$$\gamma_1 = \frac{\left(n \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \right]^2 \right)^{1/2}}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^3} = \frac{(\bar{x} - Mo)}{\sigma}$$

donde \bar{x} es el promedio de los datos, x_i es el valor de cada dato, Mo es la moda y n el número total de datos. En consecuencia:

- 1) Si $\gamma > 0$, el sesgo es a la derecha o positiva entonces, la moda $>$ mediana $>$ media.
- 2) Si $\gamma < 0$, el sesgo es a la izquierda o negativo entonces, moda $<$ mediana $<$ media.
- 3) Si $\gamma = 0$, la curva es simétrica o insesgada entonces, moda = mediana = media.

Distribución t de Student

La distribución t es una distribución de probabilidad que surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño³⁸. Permite pronosticar la probabilidad de que dos promedios pertenezcan a la misma población o que provengan de distintas poblaciones. La distribución t tiene en cuenta la incertidumbre en la estimación de la desviación estándar de la población, porque contiene las distribuciones de probabilidades para distintos grados de libertad. La distribución t es más ancha que la distribución normal típica, tiene mayor área en los extremos y menos en el centro. Cuando los grados de libertad tienden a infinito, la distribución t se parece a la distribución normal estándar. Por tanto, el uso de la distribución t presupone que la población con la que se cuenta tiene una distribución normal. Matemáticamente se define como³⁹:

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)}{\left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right)}$$

37 www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/.../V%20CAPITULO.doc

38 http://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_t_de_Student

39 <http://www.slideshare.net/eraperez/distribucion-t-de-student>

donde el numerador es la diferencia a probar y el denominador es la desviación estándar de la media. El intervalo de confianza basado en la t de Student consiste en calcular la desviación típica de los datos S y

calcular el error estándar de la media $\frac{S}{\sqrt{n}}$, entonces el intervalo de confianza para la media resulta ser:

$$\bar{x} \pm t_{(\frac{\alpha}{2})} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

donde $t_{(\frac{\alpha}{2})}$ es el valor de la t-Student para n-2 grados de libertad y $\frac{S}{\sqrt{n}}$ es la desviación estándar de la media. Las propiedades de la t-Student son:

- La media de la distribución es igual a cero.
- La varianza es igual a $v/(v-2)$ donde v es el número de grados de libertad.
- La varianza es siempre mayor que 1, aunque es muy cercana a 1 cuando se tienen muchos grados de libertad.
- Con infinitos grados de libertad la distribución t es igual a la normal.

Referencias

Arellano, M. (2001): *Introducción al Análisis Clásico de Tiempo*, [en línea] 5campus.com Estadística. www.5campus.com/leccion/seriest, [05/sep/2011].

Ayllón, T. (2003): *Elementos de Meteorología y Climatología*. Ed. Trillas. México.

Barry, R.G. and Chorley R.J. (2010): *Atmosphere, Weather and Climate*. London and New York, 40 pp.

Beniston, M. and Stephenson, D.B. (2004): *Extreme climatic events and their evolution under changing climatic condition*. Global and planetary change. Ed. Elsevier, Amsterdam.

Buendía, E., Azpra, E., Delgado, O., Villacaña, F. y Patiño, R., julio (2008): *Ciclones Tropicales en la Cuarta Región Meteorológica*. Ed. Ommac. México.

Casas, C.C. y Alarcón J.M. (1999): *Metereología y clima*. Ediciones UPC.

CONAGUA, Enero 2011: *Reporte del clima en México*. Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico Mediano y Largo Plazo. México.

Conde, C., R. Ferrer, C. Gay (1998): Variabilidad climática en la agricultura. GEOUNAM. 5, I:26-32.

Fedor Mesinger, Geoff DiMego, Eugenia Kalnay, Kenneth Mitchell, Perry C. Shafran, Wesley Ebisuzaki, Dusan Jovic, Jack Woollen, Eric Rogers, Ernesto H. Berbery, Michael B. Ek, Yun Fan, Robert Grumbine, Wayne Higgins, Hong Li, Ying Lin, Geoff Manikin, David Parrish, and Wei Shi (2005): *NORTH AMERICAN REGIONAL REANALYSIS*. Bulletin of the American Meteorological Society.

Frich P., Alexander L.V., Della M.P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M. Y Peterson T. (2002): *Observed Coherent Changes in Climate Extremes During the Second Half of the Twentieth Century*. Climate.

García, E. (2004) *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F.

García, E. (1986): *Apuntes de Climatología*. Talleres Larios, México D. F. 1986.

García, E. (2003): *Distribución de la precipitación en la República Mexicana*. Investigaciones geográficas, boletín, núm 50, Instituto de Geografía, UNAM, México.

Hartkamp A.D., De Beurs K., Stein A., White J.W., *Interpolation Techniques for Climate Variables*. Series 99-01. NGR. Wageningen, The Netherlands

Hartmann, D.L. (1994): *Global Physical Climatology*. San Diego: Academic Press. Seattle, Washington.

Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. (2005): *Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land*. *International Journal of Climatology*, 25: 1965–1978.

INEGI (1997): *Estadísticas del medio ambiente*. México 1997. Archivo 3.
<http://buscador.inegi.org.mx/>

IPCC (2001): *Tercer informe de evaluación. Cambio climático 2001*. La base científica. Contribución del Grupo de trabajo I al tercer informe de evaluación. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

IPCC (2007): *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

López D.F. (2009): *Metodología para el análisis de Eventos Extremos de Temperatura. Un Estudio de caso en Apizaco, Tlaxcala*. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias de la Tierra. CCA, UNAM, México. II-3 pp.

Lutgens, F.K. and Tarbuck, E.J. (2004): *The Atmosphere, An Introduction to meteorology* Pearson. Tenth Edition. U.S.A

Magaña R.V. (1999): *Los impactos del niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México.

MAPFRE (2000): *El Niño: climatología, efectos y predicción*. Editores científicos: Ricardo García y Emiliano Hernández. Universidad Complutense de Madrid. Ed. MAPFRE, S.A.

Mendez, J., Navar, J. y Gonzalez, V. (2008): *Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México*, Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México D.F.

NARR, 2011: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/> y
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.html>

OMM (1999): *El Episodio El Niño de 1997-1998: Una retrospectiva Científica y Técnica*.

ONI (2012): *Running 3-Month Mean ONI values*. Pág. <http://ggweather.com/enso/oni.htm>.

Pavia Lopez, E. G., F. Graef Ziehl y J. Reyes Rodriguez De La Gala. (2009): Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*. 29(9):

1324-1329 p.

Peixoto J. P., Oort, A. (1992): *Physics of climate*. American Institute of Physics, New York.

Sendiña, Irene y Pérez, Vicente (2006): *Fundamentos de Meteorología*. Universidad de Santiago de Compostela. España.

SMN (2012): *Climatología*. Pág.: <http://smn.cna.gob.mx/>

Smoyer, K.E. (1998): *A Comparative Analysis of Heat Waves and Associated Mortality in St. Louis, Missouri – 1980 and 1995*. International Journal of Biometeorology, 42, 44-50.

Stringer, E.T. (1972): *Foundations of Climatology*. W. H. Freedman and Company, 319 -327 pp. San Francisco.

Stephenson, D. (2010): *Statistical Methods for diagnosing extreme weather and climate*. Mathematics Research Institute.

Trenberth, K.E. (1997): *The Definition of El Niño*. Bulletin of the American Meteorological Society, 78, 2771-2777.

Vidal, Rosalia (2005): *Las Regiones Climáticas de México*. Instituto de Geografía, UNAM.

Wilks, D. S. (2006): *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Second edition. Ed. ELSEVIER. Amsterdam. USA.

WMO (2006): *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. Preliminary seventh edition. WMO-No 8. USA.

WMO (2012): *How is the climate determined? (Earths energy budget)*. http://www.wmo.int/pages/themes/climate/understanding_climate.php

Zhang, Q., Xu, C.Y., Zhang, Z., Ren, G., and Chen, Y.D. (2007): *Climate change or variability? The case of Yellow river as indicated by extreme maximum and minimum air temperature during 1960-2004*. Theoretical and Applied Climatology. 1-9. DOI 10.1007/s00704-007-0328-y.

Willmott, C.J. and K. Matsuura (1995): *Smart interpolation of annually averaged air temperature in the US*. J. Applied Met., 34, 2577-2586.