



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO WRF PARA  
REPRODUCIR LAS VARIACIONES DE LA TEMPERATURA EN  
MÉXICO DURANTE LA DÉCADA DE LOS 80

## TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

**JAIME MEZA CARRETO**

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ROSARIO DE LOURDES ROMERO CENTENO  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX, OCTUBRE 2018



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

---

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO WRF PARA  
REPRODUCIR LAS VARIACIONES DE LA TEMPERATURA EN  
MÉXICO DURANTE LA DÉCADA DE LOS 80

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
JAIME MEZA CARRETO

DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. ROSARIO DE LOURDES ROMERO CENTENO



---

## *Agradecimientos*

---

A los miembros del grupo Interacción Océano-Atmósfera por sus valiosos comentarios, sugerencias y observaciones, los cuales fueron fundamentales en el desarrollo de este estudio.

De manera especial a la Dra. Rosario de Lourdes Romero Centeno y al Dr. Jorge Zavala Hidalgo, por compartir conocimientos invaluable, por su paciencia e incondicional apoyo.

A los miembros del jurado, M.C. René Garduño López, Dra. Graciela Herrera Zamarrón, Dr. Arturo Quintanar Isaías y Dra. Erika López Espinoza por sus importantes sugerencias, correcciones y comentarios para mejorar el trabajo de tesis.

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Este trabajo forma parte de los proyectos de investigación:

PAPIIT-IA101813  
SENER-CONACyT-Hidrocarburos 201441  
LANCAD-UNAM-DGTIC-110.

---

## *Índice general*

---

Índice de figuras . . . . .	III
Índice de tablas . . . . .	XIII
Resumen . . . . .	XIV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	5
1.2. Hipótesis . . . . .	5
<b>2. Marco teórico</b>	<b>6</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	6
2.2. Modelación numérica . . . . .	12
2.3. Medidas estadísticas de desempeño y métodos gráficos . . . . .	22
2.4. Metodología para la evaluación . . . . .	25
<b>3. Desarrollo del experimento numérico</b>	<b>28</b>
3.1. Configuración del modelo WRF . . . . .	28
3.2. Datos Observados . . . . .	32
<b>4. Resultados</b>	<b>33</b>
4.1. Análisis espacial de los promedios mensuales de <i>TMax</i> y <i>TMin</i> en la década de los 80s . . . . .	33
4.2. Evaluación puntual . . . . .	42
4.3. Análisis general por estados . . . . .	63
4.4. Análisis climatológico . . . . .	70
<b>5. Conclusiones</b>	<b>85</b>
<b>6. Anexos</b>	<b>87</b>
6.1. Análisis espacial. . . . .	88
6.2. Análisis puntual. . . . .	112
6.3. Percentiles 90 y 10. . . . .	157
6.4. Índice TX90p . . . . .	161
6.5. Índice TX90p . . . . .	163
6.6. Índice TN10p . . . . .	165
<b>Referencias</b>	<b>175</b>

---

## *Índice de figuras*

---

1-1. Diagrama de los componentes del sistema terrestre y de las interacciones entre ellos. . . . .	1
1-2. Sistemas meteorológicos que afectan a la República Mexicana. . . . .	2
1-3. Esquema representativo de los modelos de predicción numérica. . . . .	3
2-1. Ubicación del volcán el <i>Chichonal</i> . . . . .	10
2-2. Diagrama de flujo de los componentes del modelo WRF. . . . .	14
2-3. Coordenada vertical $\eta$ en el modelo WRF. . . . .	16
2-4. Interacción entre los sistemas superficiales (suelo y vegetación) y la atmósfera. . . . .	17
2-5. Componentes de los esquemas LSM. . . . .	18
2-6. Representación de los procesos físicos en los esquemas Noah y Noah-MP . .	19
2-7. Malla del producto de observaciones y del modelo WRF . . . . .	26
2-8. Esquema de la función <i>wrf_ll_to_ij</i> . . . . .	27
3-1. Dominio considerado para las simulaciones realizadas con el modelo WRF. .	29
3-2. Series de uso de suelo (INEGI y USGS) . . . . .	30
3-3. Ejemplo del producto de Observaciones . . . . .	32
4-1. Mapas e histogramas del <i>RMSE</i> para <i>TMax</i> . . . . .	34
4-2. Mapas e histogramas del <i>MAE</i> para <i>TMax</i> . . . . .	35
4-3. Mapas e histogramas de <i>ME</i> para <i>TMax</i> . . . . .	36
4-4. Mapa de altura de canopia para la República Mexicana. . . . .	37
4-5. Mapas e histogramas del <i>RMSE</i> para <i>TMin</i> . . . . .	38
4-6. Mapas e histogramas de <i>MAE</i> para <i>TMin</i> . . . . .	39
4-7. Mapas e histogramas de <i>ME</i> para <i>TMin</i> . . . . .	40
4-8. Mapa de la densidad de estaciones climatológicas del SMN en la <i>RM</i> que cuentan con al menos el 80 % de la información correspondiente a la década de los 80s. . . . .	41
4-9. Sitios de interés para la evaluación puntual del modelo WRF durante 1982-1983. . . . .	42
4-10. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Presa Potrerillos, Ags., durante 1982-1983. . . . .	45
4-11. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Presa Potrerillos, Ags. . . . .	46

4-12. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Presa Potrerillos, Ags. . . . .	47
4-13. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Colonia Moctezuma, CDMX, durante 1982-1983. . . . .	48
4-14. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Colonia Moctezuma, CDMX. . . . .	49
4-15. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Colonia Moctezuma, CDMX. . . . .	50
4-16. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Cinco Señores, Gto., durante 1982-1983. . . . .	51
4-17. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Cinco Señores, Gto. . . . .	52
4-18. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Cinco Señores, Gto. . . . .	53
4-19. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Guadalajara, Jal., durante 1982-1983. . . . .	54
4-20. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Guadalajara, Jal. . . . .	55
4-21. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Guadalajara, Jal. . . . .	56
4-22. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Sonoyta, Son., durante 1982-1983. . . . .	57

4-23. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Sonoyta, Son. . . . .	58
4-24. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Sonoyta, Son. . . . .	59
4-25. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación El Tejar, Ver., durante 1982-1983. . . . .	60
4-26. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación El Tejar, Ver. . . . .	61
4-27. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación El Tejar, Ver. . . . .	62
4-28. Posición de 167 estaciones climatológicas elegidas para la evaluación general del desempeño del WRF para reproducir la temperatura superficial en la RM. . . . .	63
4-29. Comparación de los valores promedio por estado del estadístico ME usando los esquemas <i>Noah</i> y <i>Noah-MP</i> para (a) <i>TMax</i> y (b) <i>TMin</i> en el periodo 1982-83. . . . .	66
4-30. Comparación de los valores promedio por estado del estadístico MAE usando los esquemas <i>Noah</i> y <i>Noah-MP</i> para (a) <i>TMax</i> y (b) <i>TMin</i> en el periodo 1982-83. . . . .	67
4-31. Comparación de los valores promedio por estado del estadístico RMSE usando los esquemas <i>Noah</i> y <i>Noah-MP</i> para (a) <i>TMax</i> y (b) <i>TMin</i> en el periodo 1982-83. . . . .	68
4-32. Comparación de los valores promedio por estado del coeficiente de correlación $r$ usando los esquemas <i>Noah</i> y <i>Noah-MP</i> para (a) <i>TMax</i> y (b) <i>TMin</i> en el periodo 1982-83. . . . .	69
4-33. Caída de ceniza en el camino entre Coatzacoalcos y Villahermosa ocasionada por la erupción del Chichonal. (Tomada de Cruz-Reyna et al., 2008). . . . .	70
4-34. AOD promedio global y para los hemisferios norte y sur. . . . .	73
4-35. AOD para 1982-83. . . . .	73
4-36. Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación de Presa Potrerillos, Ags., durante 1982-83. . . . .	75

4-37. Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación Colonia Moctezuma, CDMX, durante 1982-83. . . . .	76
4-38. Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación Cinco Señores, Gto., durante 1982-83. . . . .	77
4-39. Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación Guadalajara, Jal., durante 1982-83. . . . .	78
4-40. Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación Sonoyta, Son., durante 1982-83. . . . .	79
4-41. Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación El Tejar, Ver., durante 1982-83. . . . .	80
4-42. Mapas del índice TX90p para los meses de Enero a Abril de 1982. . . . .	82
4-43. Mapas del índice TX90p para los meses de Enero a Abril de 1983. . . . .	83
4-44. Mapas del índice TN10p para los meses de (a) febrero de 1981,(b) febrero de 1982 y (c) febrero de 1983. . . . .	84
6-1. Climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMax durante los meses de enero a junio. . . . .	88
6-2. Climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMax durante los meses de julio a diciembre. . . . .	89
6-3. Climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMin durante los meses de enero a junio. . . . .	90
6-4. Climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMin durante los meses de julio a diciembre. . . . .	91
6-5. Climatología mensual de <i>MAE</i> para TMax. . . . .	92
6-6. Climatología mensual de <i>MAE</i> para TMax. . . . .	93
6-7. Climatología mensual de <i>MAE</i> para TMin durante los meses de enero a junio. . . . .	94
6-8. Climatología mensual de <i>MAE</i> para TMin durante los meses de julio a diciembre. . . . .	95
6-9. Climatología mensual de <i>ME</i> para TMax. . . . .	96
6-10. Climatología mensual de <i>ME</i> para TMax. . . . .	97
6-11. Climatología mensual de <i>ME</i> para TMin durante los meses de enero a junio. . . . .	98
6-12. Climatología mensual de <i>ME</i> para TMin durante los meses de julio a diciembre. . . . .	99
6-13. Histogramas de la climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMax durante los meses de enero a junio. . . . .	100
6-14. Histogramas de la climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMax durante los meses de julio a diciembre. . . . .	101
6-15. Histogramas de la climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMin durante los meses de enero a junio. . . . .	102

6-16. Histogramas de la climatología mensual de <i>RMSE</i> para TMin durante los meses de julio a diciembre. . . . .	103
6-17. Histogramas de la climatología mensual de <i>MAE</i> para TMax durante los meses de enero a junio. . . . .	104
6-18. Histogramas de la climatología mensual de <i>MAE</i> para TMax durante los meses de julio a diciembre. . . . .	105
6-19. Histogramas de la climatología mensual de <i>MAE</i> para TMin durante los meses de enero a junio. . . . .	106
6-20. Histogramas de la climatología mensual de <i>MAE</i> para TMin durante los meses de julio a diciembre. . . . .	107
6-21. Histogramas de la climatología mensual de <i>ME</i> para TMax durante los meses de enero a junio. . . . .	108
6-22. Histogramas de la climatología mensual de <i>ME</i> para TMax durante los meses de julio a diciembre. . . . .	109
6-23. Histogramas de la climatología mensual de <i>ME</i> para TMin durante los meses de enero a junio. . . . .	110
6-24. Histogramas de la climatología mensual de <i>ME</i> para TMin durante los meses de julio a diciembre. . . . .	111
6-25. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Los Robles, BCS., durante 1982-1983. . . . .	112
6-26. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Los Robles, BCS. . . . .	113
6-27. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Los Robles, BCS. . . . .	114
6-28. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Champotón., Camp., durante 1982-1983. . . . .	115
6-29. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Champotón., Camp. . . . .	116
6-30. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Champotón, Camp. . . . .	117

6-31. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación C.E.M. Ciudad Deportiva, Chih., durante 1982-1983. . . . .	118
6-32. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación C.E.M. Ciudad Deportiva, Chih. . . . .	119
6-33. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación C.E.M. Ciudad Deportiva, Chih. . . . .	120
6-34. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Ramos Arizpe., Coah., durante 1982-1983. . . . .	121
6-35. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Ramos Arizpe., Coah. . . . .	122
6-36. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Ramos Arizpe., Coah. . . . .	123
6-37. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Peña del Águila, Dgo., durante 1982-1983. . . . .	124
6-38. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Peña del Águila, Dgo. . . . .	125
6-39. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Peña del Águila, Dgo. . . . .	126
6-40. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación La Begoña, Gto., durante 1982-1983. . . . .	127
6-41. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación La Begoña, Gto. . . . .	128

6-42. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación La Be-goña, Gto. . . . .	129
6-43. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la es-tación Chapala, Jal., durante 1982-1983. . . . .	130
6-44. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Chapala, Jal. . . . .	131
6-45. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Chapala, Jal. . . . .	132
6-46. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la es-tación Antunez, Mich., durante 1982-1983. . . . .	133
6-47. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Antu-nez, Mich. . . . .	134
6-48. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Antunez, Mich. . . . .	135
6-49. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la es-tación Cerro Blanco, Nay., durante 1982-1983. . . . .	136
6-50. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Cerro Blanco, Nay. . . . .	137
6-51. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Cerro Blanco, Nay. . . . .	138
6-52. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la es-tación Icamole, N.L., durante 1982-1983. . . . .	139

6-53. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Icamole, N.L. . . . . .	140
6-54. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Icamole, N.L. . . . . .	141
6-55. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Cofradia, Oax., durante 1982-1983. . . . .	142
6-56. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Cofradia, Oax. . . . .	143
6-57. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Cofradia, Oax. . . . .	144
6-58. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Huahuaxtla, Pue., durante 1982-1983. . . . .	145
6-59. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Huahuaxtla, Pue. . . . .	146
6-60. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Huahuaxtla, Pue. . . . .	147
6-61. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación El Carrizo, Sin., durante 1982-1983. . . . .	148
6-62. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación El Carrizo, Sin. . . . .	149
6-63. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación El Carrizo, Sin. . . . .	150

6-64. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Teapa, Tab., durante 1982-1983. . . . .	151
6-65. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación Teapa, Tab. . . . .	152
6-66. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación Teapa, Tab. . . . .	153
6-67. Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación R. Española, Tamps., durante 1982-1983. . . . .	154
6-68. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMax</i> en la estación R. Española, Tamps. . . . .	155
6-69. Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para <i>TMin</i> en la estación R. Española, Tamps. . . . .	156
6-70. Climatología mensual del percentil 90 ( $P_{90}$ ) para TMax, de enero a junio. . . . .	157
6-71. Climatología mensual del percentil 90 ( $P_{90}$ ) para TMax, de julio a diciembre . . . . .	158
6-72. Climatología mensual del percentil 10 ( $P_{10}$ ) para TMin, de enero a junio. . . . .	159
6-73. Climatología mensual del percentil 10 ( $P_{10}$ ) para TMin, de julio a diciembre . . . . .	160
6-74. Índice TX90p de enero a junio de 1982. . . . .	161
6-75. Índice TX90p de julio a diciembre de 1982. . . . .	162
6-76. Índice TX90p de enero a junio de 1983. . . . .	163
6-77. Índice TX90p de julio a diciembre de 1983. . . . .	164
6-78. Índice TN10p invierno 1980-81. . . . .	165
6-79. Índice TN10p invierno 1982-83. . . . .	166
6-80. Champotón. Anomalías estandarizadas. . . . .	167
6-81. EL Jabalí, Chis. Anomalías estandarizadas. . . . .	168
6-82. Ramos Arizpe. Anomalías estandarizadas. . . . .	169
6-83. C.E.M. Ciudad Deportiva. Anomalías estandarizadas. . . . .	170
6-84. Peña del Águila. Anomalías estandarizadas. . . . .	171
6-85. Chapala. Anomalías estandarizadas. . . . .	172
6-86. Antunez. Anomalías estandarizadas. . . . .	173
6-87. Cerro Blanco. Anomalías estandarizadas. . . . .	174

---

## *Índice de tablas*

---

2-1. Principales diferencias entre los núcleos ARW y NMM. . . . .	13
2-2. Componentes del WPS. . . . .	13
2-3. Componentes del núcleo ARW. . . . .	13
2-4. Principales fuentes de datos en el sistema CFSR. . . . .	21
3-1. Configuración del modelo WRF. . . . .	28
3-2. Tiempos de proceso en la supercomputadora Miztli. (sst=sea surface temperature; sfc=surface; pres=pressure levels) . . . . .	29
4-1. Datos de las estaciones utilizadas para la evaluación puntual durante el período de 1982-83. . . . .	43
4-2. Número de estaciones por estado consideradas en el análisis general . . . . .	63
4-3. Promedio de las métricas estadísticas para TMin considerando las 167 estaciones seleccionadas y según el esquema de LSM utilizado para el período de 1982-83. . . . .	64
4-4. Promedio de las métricas estadísticas para TMax considerando las 167 estaciones seleccionadas y según el esquema de LSM utilizado para el período de 1982-83. . . . .	64
4-5. Efectos de los aerosoles en la atmósfera. . . . .	71

# Evaluación del desempeño del modelo WRF para reproducir las variaciones de la temperatura en México durante la década de los 80

## Resumen

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el desempeño del modelo numérico de mesoescala WRF (*Weather Research & Forecasting*) para reproducir las variaciones de la temperatura superficial (a dos metros sobre el suelo) en la República Mexicana durante la década de los 80 e identificar aspectos relevantes en la configuración del modelo que conduzcan a la obtención de mejores resultados. Para ello, se implementó una simulación con el modelo WRF para el período de 1980 a 1989, considerando como condiciones iniciales y de frontera los datos del reanálisis CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*), con una resolución espacial de 10 kilómetros y temporal de una hora. Dichas simulaciones tienen un costo computacional considerable, por lo que se generaron en el sistema de supercómputo *Miztli* de la UNAM.

Como base para comparar con las salidas del modelo, se utilizó un producto de datos diarios de alta resolución espacial ( $\sim 1.8km$ ) de las temperaturas máximas (*TMax*) y mínimas (*TMin*) cerca de la superficie para México, que fue generado a partir de los datos observados en las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, observaciones de estaciones de los EUA y datos del reanálisis *North American Regional Reanalysis*.

En este estudio se consideró que el modelo WRF es sensible a los diferentes esquemas de física superficial (*LSM*, Land Surface Models), especialmente para el cálculo diagnóstico de la temperatura a dos metros sobre la superficie. El experimento numérico está basado en el esquema *Noah*; sin embargo, con el propósito de obtener mayor información respecto a la importancia de los LSM, se analizaron también los esquemas *Térmico-difusivo (TD)* y *NoahMP* para los años de 1982-1983 ya que durante este período se presentaron eventos que tuvieron un impacto climático importante en el país: la erupción del volcán el *Chichónal* y un evento intenso de *El Niño*. Para la evaluación del modelo se calcularon diversas métricas estadísticas, como son la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*), el error promedio (*ME*), el error promedio absoluto (*MAE*), el coeficiente de correlación de Pearson (*r*) y el índice de concordancia de Willmott (*IOA*). También se utilizaron métodos gráficos como los diagramas de dispersión y de Taylor.

En general, el modelo resultó mejor para representar las variaciones de la *TMin* en México. Sin embargo, existen diferencias espaciales y también de un mes a otro. En términos climatológicos, el modelo subestima la *TMin* hacia el noroeste y parte del norte del país, especialmente en Baja California durante los meses de Junio a Octubre, así como en Sonora, Durango, Chihuahua y parte de Sinaloa durante los meses de Noviembre a Febrero. Por otra parte, el modelo subestima las *TMax* en gran parte del país durante los meses de Noviembre a Mayo, mientras que de Junio a Octubre las sobrestima principalmente hacia la mitad occidental del país. No obstante, habría que señalar que en las zonas donde se tiene muy baja densidad de datos observados el análisis del desempeño del modelo es poco confiable.

Para el análisis de sensibilidad del modelo a cambios en los *LSM*, se realizó una comparación puntual de las series de tiempo de *TMax* y *TMin* obtenidas con las simulaciones y las observadas en sitios específicos. Para la *TMin* los tres esquemas presentaron resultados bastante aceptables, obteniéndose los siguientes valores promedio de los estadísticos considerando todos los sitios elegidos: coeficiente de correlación  $r > 0.866$ ,  $RMSE \sim 2.3$  °C,  $ME \sim -0.32$  °C y  $MAE \sim 1.86$  °C. Mientras que para la *TMax* las diferencias fueron más marcadas. En general, con los esquemas *Noah* y *Noah-MP* se obtuvieron mejores comparaciones con las observaciones que con el esquema *TD*, y mejores con *Noah-MP* que con *Noah*. En promedio para los sitios elegidos, usando el esquema *Noah-MP* se redujo el valor de los estadísticos obtenidos con *Noah* de 2.99 a 2.78 °C para el  $RMSE$ , de 1.93 a 1.54 °C para el  $ME$  y de 2.55 a 2.32 °C para el  $MAE$ , y un coeficiente de correlación de 0.86 y 0.85 respectivamente.

# Performance evaluation of the WRF model to reproduce temperature variations in Mexico during the 1980s

## Abstract

The main objective of this work is to evaluate the performance of the mesoscale numerical *Weather Research & Forecasting* model (WRF) to reproduce the variations of the surface temperature (two meters above the ground) in Mexico during the 80s and to identify relevant aspects in the configuration of the model that lead to obtaining better results. For this, *WRF* model simulations were implemented for the period 1980 to 1989 using data of the *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) for the initial and boundary conditions, with a spatial resolution of 10 km and hourly temporal resolution. Such simulations have a considerable computational cost, so they were generated in the supercomputing system *Miztli* of the UNAM.

As a basis to compare with the model outputs, a daily high-spatial-resolution data product of near-surface maximum (*TMax*) and minimum (*TMin*) temperatures for Mexico was used, which was generated from observations of climatological stations of the National Weather Services of Mexico and the U.S., and data from the *North American Regional Reanalysis*.

In this study, it was considered that the WRF model is sensitive to different Land Surface Model (*LSM*) schemes, especially for the diagnostic calculation of the temperature at two meters above the surface. The numerical experiment is based on the Noah scheme; however, in order to obtain more information regarding the importance of *LSMs*, the Thermal-diffusive (*TD*) and the *Noah-MP* schemes were also analyzed for the years 1982-1983, since during this period events that had an important climatic impact in the country occurred: the eruption of *Chichonal* volcano and an intense *El Niño* event. For the evaluation of the model, several statistical metrics were calculated, such as the root mean squared error (*RMSE*), the mean error (*ME*), the mean absolute error (*MAE*), the Pearson correlation coefficient (*r*), and the Willmott index of agreement (*IOA*). Graphical methods such as the dispersion and Taylor diagrams were also used.

In general, the model performed better to represent the variations of *TMin* in Mexico. However, there are spatial differences and also from one month to another. In climatological terms, the model underestimates *TMin* towards the northwest and part of the north of the country, especially in Baja California from June to October and in Sonora, Durango, Chihuahua and part of Sinaloa from November to February. On the other hand, the model underestimates *TMax* in much of the country during the months of November to May, while from June to October overestimates it mainly in the western half of the country. However, it should be noted that in areas where there is very low density of observed data, the analysis of the model's performance is little reliable.

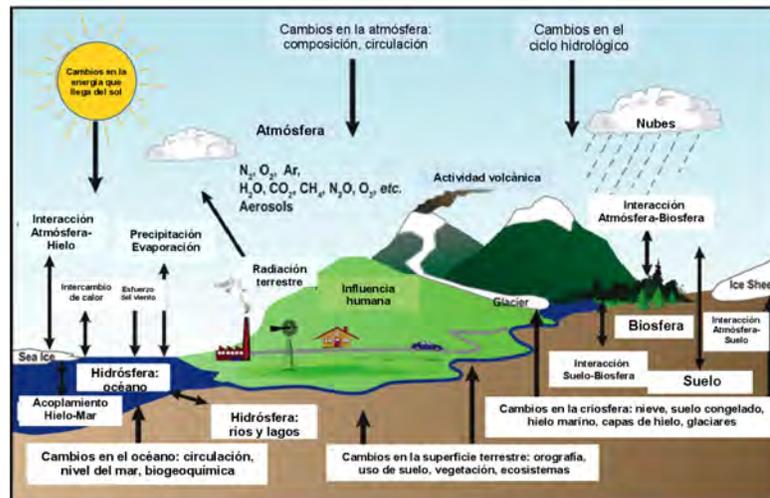
For the model sensitivity analysis to changes in *LSM*, a punctual comparison was made between the *TMax* and *TMin* time series obtained from the simulations and those observed at specific sites. For the *TMin*, the three *LSM* schemes presented quite acceptable results, with average values of the statistics considering all the chosen sites of: *correlation coefficient*  $> 0.866$ , *RMSE*  $\sim 2.3$  °C, *ME*  $\sim -0.32$  °C y *MAE*  $\sim 1.86$  °C.

For the *TMax* the differences were greater. In general, with the *Noah* and *Noah-MP* schemes better comparisons with the observations were obtained than with the *TD* scheme, and better with *Noah-MP* than with *Noah*. On average for the chosen sites, using the *Noah-MP* scheme the values of the statistics obtained with *Noah* were reduced from 2.99 to 2.78 °C for the *RMSE*, from 1.93 to 1.54 °C for the *ME*, and from 2.55 to 2.32 °C for the *MAE*. The correlation coefficient was 0.86 y 0.85 respectively.

## Capítulo 1

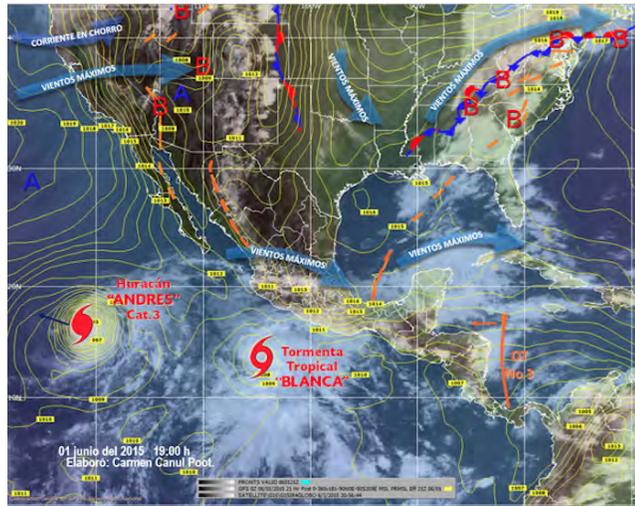
### Introducción

El sistema terrestre es muy complejo. Su fuente principal de energía proviene del Sol y en él se presentan múltiples interacciones entre sus componentes: la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera. Por ejemplo, los intercambios entre la atmósfera y el océano se presentan fundamentalmente a través de flujos de calor, masa y momento; sin embargo, para entender el sistema de manera integral también se tienen que considerar los cambios internos en la circulación y en la composición de éstos, de la cubierta de hielo y de la superficie terrestre (Fig. 1-1). Adicionalmente, dentro de este complejo sistema, habría que considerar los impactos que producen las actividades humanas en cada uno de sus componentes.



*Fig. 1-1: Diagrama de los componentes del sistema terrestre y de las interacciones entre ellos.*

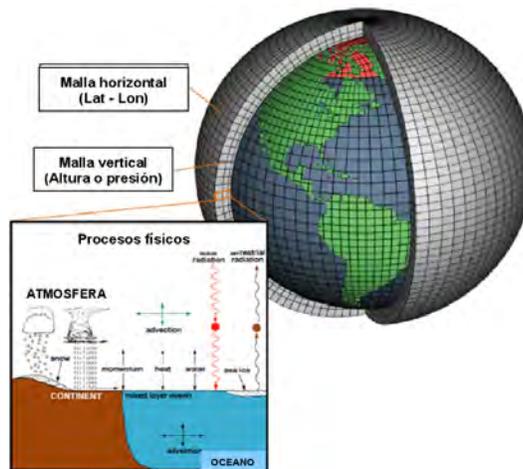
A nivel regional, el clima está determinado en buena medida por la interacción de los sistemas meteorológicos locales (que controlan el transporte de calor, humedad y momento) con la topografía compleja y los mares adyacentes. En particular, el territorio mexicano se ve afectado por una gran diversidad de fenómenos meteorológicos, tanto de latitudes medias como de los trópicos, tales como: frentes fríos, nortes, ciclones tropicales, ondas del este, corrientes en chorro, la zona de convergencia intertropical, sistemas convectivos de mesoescala, etc. (Fig. 1-2). Adicionalmente, tenemos que considerar los forzantes de baja frecuencia, los cuales actúan en distintas escalas de tiempo, como son el fenómeno de *El Niño Oscilación del Sur (ENSO)*, la *Oscilación Decadal del Pacífico*, la *Oscilación Multidecadal del Atlántico*, entre otros.



*Fig. 1-2: Sistemas meteorológicos que afectan a la República Mexicana. Representación tomada de la página del Servicio Meteorológico Nacional.*

Resulta entonces un reto enorme tratar de hacer predicciones a futuro del estado del tiempo o del clima del planeta o de una región específica. En la actualidad, gracias a los enormes avances en los sistemas computacionales (hardware y software), es posible tener buenos pronósticos meteorológicos basados en las simulaciones de modelos numéricos. Sin embargo, generalmente los modelos tienen dificultades para representar valores extremos, como aquéllos asociados a la temperatura y la precipitación (Sheffield et al., 2013), y es fundamental entender cuáles son sus posibles fuentes de error. La identificación de tales errores puede conducir a investigaciones enfocadas a entender por qué ocurren, lo cual a su vez puede conducir a un mayor entendimiento de los procesos físicos subyacentes, a mejorar los modelos y eventualmente a mejorar los pronósticos (Jolliffe, 2012; WMO, 2008).

Los modelos numéricos de predicción son un conjunto de programas de cómputo que resuelven sistemas de ecuaciones diferenciales para simular los procesos físicos involucrados en el sistema. Existen modelos de distinta complejidad, desde los modelos muy simples de equilibrio radiativo (o de dimensión cero), que incluyen la radiación solar incidente, el albedo y la emisividad terrestre pero que no consideran la distribución de la temperatura sobre el planeta o los factores que mueven la energía alrededor de éste; hasta los modelos muy complejos de circulación general y con acoplamiento entre el océano y la atmósfera que consideran las ecuaciones de movimiento y transferencia de energía y las integran en el tiempo. Estos modelos dividen al planeta en mallas tridimensionales o celdas con cierta resolución horizontal y vertical (Fig. 1-3).



**Fig. 1-3: Esquema representativo de los modelos de predicción numérica.**  
 (Adaptado de <https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/>)

Muchos de los procesos físicos involucrados en el sistema se encuentran parametrizados en los modelos debido a la imposibilidad (analítica y/o numérica) de resolver todas las escalas de movimiento, sobre todo aquéllos de escala muy pequeña.

Uno de estos modelos complejos de la circulación atmosférica es el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) (Skamarock et al., 2008), el cual permite realizar simulaciones del estado del tiempo con una alta resolución sobre áreas específicas. El modelo WRF se ha estado utilizando ampliamente para los pronósticos de corto plazo y para realizar simulaciones climáticas, así como para hacer downscaling (reducción de escala) dinámicos. En particular, el grupo Interacción Océano-Atmósfera del CCA de la UNAM ha implementado un pronóstico operacional para México usando dicho modelo, cuya información se actualiza diariamente y puede consultarse en línea (<http://grupo-iaa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia>).

Una tarea fundamental es evaluar el desempeño y confiabilidad del modelo para capturar las variaciones espaciales y temporales de las condiciones observadas. Generalmente la evaluación o validación de las salidas de un modelo se lleva a cabo mediante la comparación con datos observados, de modo que se pueda tener alguna medida cuantitativa de su habilidad y confiabilidad. Sin embargo, se debe tener claro que los resultados del modelo representan las condiciones promedio de las variables en un cuadro de malla, mientras que las observaciones in situ describen las condiciones afectadas por características muy locales, por lo cual no se puede considerar como una comparación entre similares (Rivington et al., 2008).

Esto conlleva a “errores de representación” importantes, por ejemplo en áreas con terreno complejo. Adicionalmente, en México no se cuenta con amplias y densas redes de observación del tiempo y del clima que proporcionen mediciones confiables y por largos períodos de tiempo, lo cual complica la aplicación de métodos de evaluación de los modelos numéricos y también la interpretación de los resultados obtenidos.

Otro problema es que no existe una metodología única, consensuada y sistemática, para realizar la evaluación sino que existe una gran cantidad de métricas, puntajes o índices que pueden calcularse. Cada una de estas medidas o estadísticos tienen fortalezas particulares, pero todos ellos tienen también debilidades, por lo que en la mayoría de los casos se requiere el cálculo de más de un puntaje o métrica para obtener un panorama informado sobre el desempeño del modelo a evaluar. Por ello, un sistema de evaluación o verificación generalmente incluirá el cálculo de varios estadísticos, los cuales son elegidos de acuerdo con los objetivos del estudio.

Como parte de dos proyectos de investigación (*PAPIIT-IA101813* y *SENER-CONACyT-Hidrocarburos 201441*) se estableció el compromiso de generar un reanálisis, basado en el modelo WRF, para obtener una base de datos de distintas variables climáticas con alta resolución espacial y temporal que fuera útil para realizar estudios de la variabilidad del clima en México y los mares adyacentes. Un reanálisis incluye un método para producir registros completos, en una malla uniforme, de distintas variables meteorológicas sobre un período de tiempo suficientemente largo. Dicho método utiliza un sistema de asimilación de datos fijo para integrar objetivamente observaciones pasadas con pronósticos numéricos de corto plazo, con el objeto de generar la mejor estimación del estado y evolución del medio ambiente (*Reanalysis Workshop Report, 2000*). Los reanálisis típicamente se extienden en el tiempo abarcando varias décadas y son usados ampliamente en investigaciones del clima y para realizar análisis de la variabilidad de parámetros meteorológicos en distintas escalas espaciales y temporales, incrementando de manera sustancial nuestro entendimiento de la evolución de los procesos atmosféricos (*www.reanalyses.org*).

El presente trabajo de tesis forma parte del esfuerzo de generación de dicho reanálisis para la República Mexicana (*RM*) y de las tareas realizadas para evaluar el desempeño del modelo WRF para reproducir las condiciones meteorológicas en décadas pasadas, específicamente la temperatura del aire cercana a la superficie durante el período 1980-1989.

### 1.1. *Objetivos*

- *Objetivo general:* Evaluar el desempeño del modelo numérico de mesoescala WRF para reproducir las variaciones de la temperatura superficial (a 2 m sobre el suelo) en la *RM* durante la década de los 80 y sugerir posibles cambios para mejorarlo.
- *Objetivos particulares:*
  1. Implementar la configuración adecuada del WRF y obtener la simulación numérica para el período de estudio utilizando como condiciones iniciales y de frontera los datos del reanálisis *CFSR*.
  2. Revisar la base de datos de temperatura observada para la *RM*, que fue generada a partir de los datos de las estaciones climatológicas del *SMN*, para utilizarla en los análisis comparativos (mapas y series de tiempo puntuales).
  3. Evaluar el desempeño del modelo *WRF* para reproducir la temperatura superficial en México durante el período de estudio aplicando distintas métricas estadísticas y métodos gráficos.
  4. Determinar las limitaciones del modelo para reproducir las variaciones de la temperatura en México y proponer posibles estrategias para mejorar su desempeño.

### 1.2. *Hipótesis*

Las métricas estadísticas obtenidas mediante los métodos de evaluación espacial y puntual ayudarán a identificar aspectos relevantes en el desempeño del modelo *WRF*, tanto a nivel regional como local. Asimismo, la aplicación de diferentes esquemas de la física de superficie (*LSM*, por sus siglas en inglés), sugerirá cuál es el más adecuado para realizar simulaciones para la *RM*.

#### 2.1. Antecedentes

##### 2.1.1. Evaluación de los modelos de predicción numérica del tiempo

En la actualidad los modelos numéricos, ya sea de pronóstico de las condiciones meteorológicas a corto plazo o los modelos de simulación de las condiciones pasadas o futuras, son ampliamente utilizados para una gran diversidad de aplicaciones. En particular, resultan muy útiles para estudiar los procesos físicos involucrados en la generación y evolución de distintos fenómenos meteorológicos, proporcionan información en sitios donde las mediciones son escasas o nulas, o sirven para analizar la respuesta climática al calentamiento global, la cual varía de una región a otra. En cualquier caso, es fundamental evaluar la confiabilidad de las estimaciones de los modelos haciendo comparaciones con datos observados (Argüeso et al., 2011).

A partir de 1950, y particularmente desde la década de 1980, se han incrementando considerablemente los esfuerzos de investigación relacionados con las metodologías empleadas en la evaluación de pronósticos meteorológicos. Esto ha sido motivado por varios factores, incluyendo la disponibilidad de nuevas fuentes de datos, como satélites y radares, la necesidad de generar resultados que sean útiles para distintos usuarios, el advenimiento de nuevas estrategias de modelación, como los ensambles, y la evolución de modelos y pronósticos con una mayor resolución espacial y temporal (Casati et al., 2008).

Una forma de probar un modelo numérico es establecer si es capaz de capturar correctamente las variaciones espaciales y temporales de variables registradas históricamente; por ejemplo, mediante la comparación de los ciclos anuales, las distribuciones de frecuencias mensuales y estacionales, los patrones espaciales, la amplitud del ciclo diurno y la intensidad de eventos extremos. Para ello, es necesario determinar una configuración adecuada del modelo para realizar corridas históricas sobre el dominio de interés, así como los datos de entrada y los que se usarán para especificar las condiciones iniciales y de frontera para dicho dominio.

Existe una amplia variedad de métodos para la verificación de pronósticos, pero todos ellos involucran medidas de la relación entre el valor pronosticado y la observación correspondiente (Wilks, 2006). La verificación puede ser cualitativa o cuantitativa; en ambos casos

debe proporcionar información respecto a la naturaleza de los errores del pronóstico. Un sistema de verificación a menudo incluirá el cálculo de varios estadísticos elegidos para describir los atributos que son más pertinentes para cumplir con el objetivo de la verificación (Jolliffe, 2012).

Algunos de los atributos que contribuyen a la calidad de un pronóstico son (según Murphy, 1993 y Wilks, 2006):

- *Sesgo*: Es la correspondencia entre la predicción media y el valor medio observado.
- *Asociación*: Es una medida de la intensidad de la relación lineal entre los pronósticos y las observaciones (p. ej., el coeficiente de correlación mide esta asociación).
- *Exactitud*: Mide el nivel de correspondencia entre los pronósticos individuales y los eventos que predicen. La diferencia entre el pronóstico y la observación es el error; a errores menores, mayor la exactitud. Las medidas escalares de la exactitud pretenden resumir, en un sólo número, la calidad general de un conjunto de pronósticos.
- *Habilidad*: Mide la precisión relativa del pronóstico con respecto a algún pronóstico de referencia o 'no calificado', el cual puede ser una posibilidad aleatoria, la persistencia o la climatología.
- *Confiabilidad*: Mide la concordancia promedio entre los valores pronosticados y los observados.
- *Resolución*: Es la capacidad del pronóstico de clasificar al conjunto de eventos en subconjuntos con diferentes distribuciones de frecuencias.
- *Agudeza*: Es la capacidad del pronóstico para predecir valores extremos.

En el trabajo de Murphy et al. (1989) se menciona que la verificación de la simulación de la temperatura tradicionalmente ha consistido en el cálculo de algunas medidas generales del desempeño del modelo, tales como la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*), el error promedio (*ME*) y el error absoluto promedio (*MAE*). En el marco de la evaluación objetiva de los modelos numéricos, destaca el trabajo de Nutter y Manobianco (1999), quienes realizaron la verificación del *modelo-ETA* de NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) para el período de mayo de 1996 a enero de 1998. Dicho estudio fue diseñado para evaluar el desempeño del modelo para simular, de manera puntual, procesos en la superficie y en niveles superiores de la atmósfera para tres localidades seleccionadas y considerando un período estacional cálido (mayo-agosto) y uno frío (octubre-enero). La evaluación estadística identificó que el modelo presentaba un error de sesgo debido a la parametrización inadecuada de los procesos físicos. Las variables que se evaluaron en el

trabajo de Nutter y Manobianco (1999) fueron la temperatura del aire y la temperatura de punto de rocío a 2 metros sobre la superficie y a 700 mb, la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie y la proporción de mezcla desde los 1000 hasta los 100 mb. Los estadísticos calculados fueron el sesgo, la desviación estándar y el *RMSE*.

Por otra parte, White et al. (1998) evaluaron la eficiencia de 6 diferentes modelos de pronóstico en la región occidental de la Unión Americana durante los meses de enero a marzo de 1996. Cuatro de estos modelos correspondían a productos operacionales de NCEP: *Eta*, *Meso-Eta*, *NGM (Nested Grid Model)* y *MRF (Medium Range Forecast model)*; mientras que los dos restantes eran los modelos de investigación con las condiciones iniciales de los modelos de NCEP: *Utah-LAM (Local Area Model)* y *MM5 (Mesoscale Model)*. El desempeño de cada modelo es descrito en términos del error del sesgo y del *RMSE* obtenidos a partir de un análisis de malla objetivo y observaciones de radiosonda. Los resultados más significativos del estudio de verificación mostraron que el modelo *Meso-Eta* es el que presenta mejor eficiencia operacional, con una mayor precisión en los pronósticos a 12 y 24 horas, mientras que el modelo *MM5* produce mejores pronósticos a 36 horas en comparación con el modelo *Utah-LAM*; por su parte, el modelo *MRF* aparenta simular con mayor precisión los campos de viento y de masa.

Se han realizado algunos estudios para la verificación de simulaciones numéricas en México. Entre ellos, Lobato (2003) implementó un esquema de asimilación y verificación del modelo *MM5*, el cual se instaló de manera operativa en el *SMN* desde el año 2000. El objetivo era verificar el desempeño del modelo en cuanto a la simulación de la precipitación, realizando comparaciones entre los datos registrados de lluvia y los resultados del modelo para la *RM*. El problema fundamental al implementar esta metodología fue encontrar la manera de comparar los datos obtenidos por un modelo numérico, el cual reporta sus resultados en una malla regularmente espaciada, con registros de estaciones que están irregularmente distribuidas. Para poder hacer las comparaciones, se interpolaron los datos observados a una malla regular que coincide exactamente con los nodos de la malla del modelo *MM5*. Para la evaluación del modelo se calculó el coeficiente de correlación lineal y se compararon las series temporales obtenidas con el modelo con los valores observados. Se concluyó que los resultados del modelo son consistentes con las observaciones, considerando necesario regionalizar esta metodología con el objetivo de evaluar eventos locales de precipitación.

Por su parte, López (2009) verificó la eficiencia del modelo *WRF* ante la ocurrencia de un evento meteorológico severo que afectó la región sur del Golfo de México y el sureste de la República Mexicana. Dicho evento ocurrió a finales de octubre e inicios de noviembre del año 2007, cuando el frente frío no. 4 y la masa de aire frío que lo impulsó interactuaron con una zona de inestabilidad atmosférica en el sureste del Golfo. Una de las variables

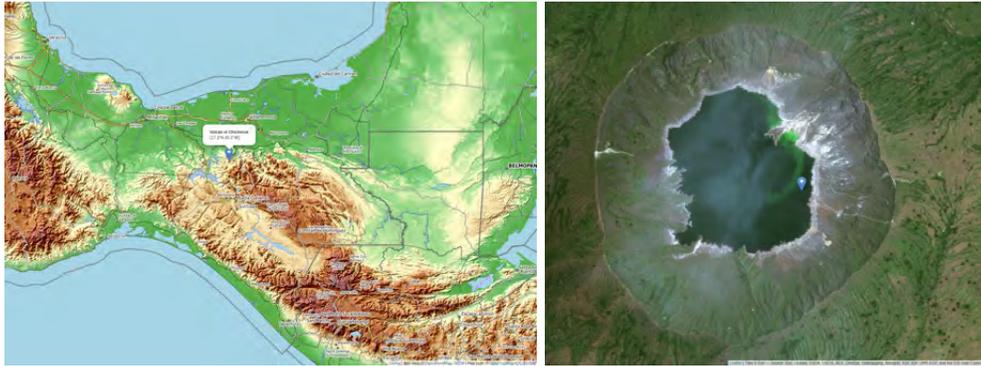
analizadas en este trabajo fue la temperatura y se encontró que el modelo fue capaz de reproducir adecuadamente su ciclo diario, determinando también que esta variable es sensible ante cambios abruptos en las condiciones atmosféricas. Para su estudio, el autor utilizó datos de los reanálisis de NCEP, estimaciones de precipitación del TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), así como datos de boyas y de estaciones meteorológicas para evaluar el desempeño del modelo WRF como un sistema de pronóstico aplicado a la RM. Para el análisis de la temperatura, los estadísticos calculados fueron el *RMSE*, el *MAE*, el *MAE* normalizado y el *ME*, con los cuales se determinó el comportamiento del modelo para sitios específicos.

La Subgerencia de Monitoreo Atmosférico Ambiental del SMN durante los años 2012 y 2013 desarrolló y probó una metodología de verificación objetiva de los modelos numéricos de la atmósfera, misma que se implementó de manera operativa a partir de enero de 2014. Los modelos que son evaluados son el GFS (*Global Forecast System*), WRF, ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) y RPM (*Rapid Precision Meso-scale model*). Dicha metodología incluye las técnicas que son sugeridas por la Organización Meteorológica Mundial en el documento *Guidelines on performance assessment of public weather services*, aunque la validación únicamente es para la precipitación. Los productos que se obtienen son: el mapa de sesgo (para este caso los datos observados se interpolan a la malla regular del modelo), el diagrama de dispersión, la gráfica de coherencia espacial, el histograma de frecuencias, las series de tiempo, la correlación espacial promedio, el coeficiente de correlación de Pearson, el porcentaje de error cuadrático y el diagrama de Taylor.

### **2.1.2. Aspectos climatológicos de la década de los 80s**

Durante la década de 1980 ocurrieron fenómenos naturales importantes que influyeron significativamente sobre las condiciones climáticas en México. Uno de esos fenómenos fue la erupción del volcán *El Chichón* o *Chichonal*, localizado en el noroeste del estado de Chiapas (17.3°N, 93.2°W) (Fig. 2-1).

Diversos trabajos han analizado el efecto de los aerosoles en la atmósfera producido por dicha erupción. Galindo et al. (1984) indican que la erupción del *Chichonal*, ocurrida entre el 28 de marzo y el 4 de abril de 1982, fue la primera cuyos efectos en la atmósfera han sido estudiados a detalle con el uso de instrumentos modernos. La erupción obtuvo un índice de explosividad volcánica de 5, es decir, un valor medio dentro de la escala de magnitud de las erupciones volcánicas, sin embargo, expulsó un gran volumen de partículas y gases hacia la estratósfera. Debido a efectos gravitacionales las partículas asociadas descienden y sólo permanecen en la estratósfera los componentes gaseosos.



**Fig. 2-1:** Izquierda: ubicación del volcán el Chichonal. Derecha: imagen satelital con acercamiento hacia el volcán.

La formación de los aerosoles estratosféricos se debe principalmente a los gases sulfurosos que se presentan en mayor abundancia en forma de  $\text{SO}_2$  (dióxido de azufre), estos sulfuros reaccionan con el  $\text{OH}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  presentes en la estratósfera, lo que produce  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en forma de aerosoles. Se estima que la erupción del volcán *El Chichón* inyectó aproximadamente 7 Mt (Megatonnes) de  $\text{SO}_2$  en la estratósfera, después de la transformación del  $\text{SO}_2$  en  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , se estima un total de 20 Mt de aerosoles estratosféricos. Este volumen de aerosoles presentó dos componentes de desplazamiento, una hacia el noreste y la otra hacia el suroeste. Debido a una corriente troposférica del oeste una nube de aerosoles de altitud relativamente baja alcanzó Cuba, sin embargo, fue la segunda componente la que alcanzó la estratosfera y se propagó tanto al centro de México como a las costas del Pacífico. Esta componente estratosférica se desplazó hacia el oeste y se estima que recorrió el mundo en aproximadamente tres semanas (Robock y Matson, 1983).

Por otra parte, Gay et al. (1990) analizaron datos de radiación solar (global y difusa) para las 10 y 11 horas durante el período de 1980 a 1985, obtenidos del observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, incluyendo el análisis de datos de máxima insolación registrados con un heliógrafo de Stokes. Con base en los promedios mensuales y anuales de esos conjuntos de datos, concluyeron que es evidente el efecto de los aerosoles ocasionados por la erupción del volcán *El Chichón* en la radiación difusa, mientras que en los promedios globales y de máxima insolación se observaron incrementos importantes producidos por el fenómeno de *El Niño (EN)* ocurrido durante 1982-83.

Entre 1982 y 1998 ocurrieron cuatro eventos de *EN* durante los inviernos de 1982-83, 1986-87, 1991-92 y 1997-98, considerando al primero y al último como los más intensos del siglo XX. Magaña et al., (2004) indican que una de las principales afectaciones de *EN* de 1982-83 fue la ocurrencia de sequías que produjeron incendios forestales en México y Centroamérica, cuyos daños tuvieron un costo que se estima en más de 600 millones de

dólares. Muestran también que el impacto de *EN* en las lluvias de invierno en México no es siempre el mismo, sino que varía dependiendo de cada evento; sin embargo, para el caso de *EN* de 1982-83 mencionan que se presentaron lluvias invernales por encima de lo normal.

Por otro lado, Mosiño y Morales (1988) estudiaron la posible relación entre los ciclones tropicales (*CTs*), *EN* y las precipitaciones en el observatorio meteorológico de Tacubaya en la Ciudad de México, encontrando que durante eventos de *EN* como el de 1982-1983, el número de *CTs* en el océano Atlántico disminuyó y las precipitaciones registradas en Tacubaya fueron escasas.

Con relación a los *CTs* y el fenómeno *ENSO*, Romero-Centeno et al. (2012) elaboraron un estudio a partir de la base de datos de las trayectorias (best tracks) del NHC (*National Hurricane Center*), el cual incluye una revisión estadística de aquéllos que tocaron tierra en las costas del Pacífico mexicano durante el período de 1970-2009, para el cual existen registros confiables de su trayectoria e intensidad basados en imágenes satelitales de alta calidad. El análisis incluye la variabilidad mensual, estacional, intraestacional e interanual de los impactos en tierra de los *CTs*, junto con su variación espacial y el tipo de trayectoria. Un aspecto importante que destacan los autores es que, de acuerdo al índice oceánico de *ENSO* (ONI, Oceanic Niño Index), ocurrieron 45 impactos en tierra en meses con condiciones neutrales; 27 en meses afectados por *La Niña* (*LN*) y 26 en meses afectados por *EN*. Mencionan que aunque el número total de impactos que ocurren cuando hay condiciones *EN* no es estadísticamente diferente al de las condiciones *LN*, sí lograron observar una diferencia significativa con respecto a la intensidad alcanzada por los *CTs* que tocan tierra, mostrando que los más intensos ocurrieron bajo condiciones de *EN*.

## 2.2. Modelación numérica

### 2.2.1. Descripción del modelo numérico de mesoescala WRF

Alrededor de 1995 se consideró iniciar un proyecto que permitiría la interacción directa entre el campo de la investigación y el ámbito operativo, creándose una asociación entre diversas dependencias, como son NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), USAF (*United States Air Force*), U.S. NRL (*Naval Research Laboratory*), la Universidad de Oklahoma y la FAA (*Federal Aviation Administration*), a partir del cual se desarrolló el sistema WRF (Powers et al., 2017).

WRF es un modelo atmosférico diseñado, como su nombre lo indica, tanto para la investigación científica como para la predicción numérica del tiempo (Skamarock et al., 2008). Oficialmente es respaldado por NCAR, sin embargo, el código del modelo está abierto a la comunidad con la finalidad de optimizar y mejorar cada una sus capacidades. Debido a lo anterior, en la actualidad se han desarrollado una gama de aplicaciones de predicción del sistema Tierra, tales como química del aire, hidrología, incendios forestales, huracanes y clima regional. La estructura del software del WRF permite que dichas aplicaciones puedan implementarse eficientemente en diversas plataformas computacionales. El código del WRF está escrito principalmente en Fortran y existen diversas opciones para su compilación; además, se ejecuta predominantemente en plataformas con sistemas operativos tipo UNIX y, por su flexibilidad, es posible implementarlo en equipos personales y en sistemas de supercómputo.

La dinámica atmosférica en el WRF se resuelve en núcleos o solucionadores numéricos. Actualmente cuenta con los núcleos ARW (*Advanced Research WRF*) y NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*) (Tabla 2-1). Para las simulaciones realizadas en este estudio se ocupó el núcleo ARW.

El WRF está disponible para generar dos clases de simulaciones para períodos largos, ya sea con una inicialización ideal o utilizando datos reales. En este estudio las simulaciones se generaron con datos reales, los cuales usualmente requieren ser preprocesados por el paquete WPS (*WRF Preprocessing System*) para obtener cada campo atmosférico y estático que corresponda con la resolución de malla elegida. En términos generales las simulaciones del modelo WRF comienzan con WPS, que está compuesto por los programas que se presentan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-1: Principales diferencias entre los núcleos ARW y NMM.

<b>ARW</b>	<b>NMM</b>
Se crea a partir del modelo MM5-NCAR.	Se crea a partir del modelo Eta-NCEP.
Mayor tiempo en proceso.	Menor tiempo en proceso.
Diseñado para ocuparse en pronóstico e investigación atmosférica, es el más utilizado por los centros de investigación científica.	Es utilizado principalmente para el pronóstico operativo.
Configuración física y dinámica compleja	Configuración física y dinámica limitada
Optimizado para dominios anidados.	Limitado en dominios anidados.

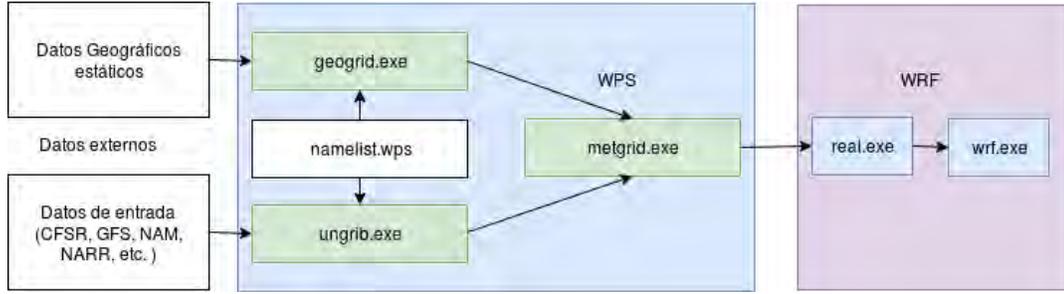
Tabla 2-2: Componentes del WPS.

<i>geogrid.exe</i>	Configura el dominio(s) considerado para la simulación. Interpola los campos terrestres estáticos a la malla del modelo (topografía, uso y cobertura de suelo, etc.). El usuario puede especificar información para definir el dominio de la simulación en el archivo de configuración <i>namelist.wps</i> .
<i>ungrrib.exe</i>	Decodifica los datos de entrada y crea los campos meteorológicos para inicializar el modelo. Para este estudio el modelo se inicializó con datos del sistema de reanálisis CFSR.
<i>metgrid.exe</i>	Interpola horizontalmente los campos meteorológicos a los dominios configurados con <i>geogrid.exe</i> .

Una vez concluida la etapa de preprocesamiento, es posible inicializar el núcleo dinámico WRF-ARW, cuyos componentes se muestran en la Tabla 2-3. El núcleo dinámico contiene los paquetes de física para procesos atmosféricos (por ejemplo, microfísica, radiación, capa límite planetaria, etc.). En la Fig. 2-2 se puede observar el diagrama de flujo general de las componentes del modelo WRF.

Tabla 2-3: Componentes del núcleo ARW.

<i>real.exe</i>	Se conoce como programa de inicialización de datos reales. Ocupa la salida del programa <i>metgrid.exe</i> para realizar una interpolación vertical a la coordenada del modelo.
<i>wrf.exe</i>	Se conoce como programa de integración numérica y se encarga de generar la simulación, ocupando el resultado obtenido por el programa <i>real.exe</i> .



*Fig. 2-2: Diagrama de flujo de los componentes del modelo WRF.*

Las salidas o resultados del modelo WRF pueden ser analizadas mediante diversos sistemas, como son: NCL (*The NCAR Command Language*), Matlab, VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers), ARWpost, etc.; a esta etapa se le conoce como postprocesamiento.

En cuanto a simulaciones idealizadas, el usuario puede estudiar procesos con una configuración simplificada, variando los parámetros y las condiciones iniciales al usar física limitada. En la actualidad, WRF proporciona 12 escenarios idealizados.

En los últimos años, el uso del WRF para la investigación climática regional ha aumentado y, en este sentido, su fuerte es resolver mejor los procesos atmosféricos y de superficie terrestre a menor escala que los modelos globales tradicionalmente utilizados para las proyecciones climáticas. Por otra parte, el Sistema de Asimilación de Datos del WRF (WRF-DA) presenta enfoques variacionales tridimensionales y de cuatro dimensiones (3DVAR, 4DVAR). Estas técnicas pueden asimilar una amplia gama de observaciones directas e indirectas, desde datos in situ tradicionales hasta mediciones basadas en satélites.

### 2.2.2. Ecuaciones de gobierno en el modelo *WRF-ARW*

Para determinar el estado de la atmósfera, el núcleo dinámico ARW integra ecuaciones de Euler compresibles, no hidrostáticas, las cuales se representan en forma de flujo usando variables escalares con propiedades de conservación (Skamarock et al., 2008). Dichas ecuaciones están definidas de la siguiente manera:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\phi_n) + \partial_n(p\phi_x) = F_U \quad (2-1)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\phi_n) + \partial_n(p\phi_y) = F_V \quad (2-2)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(p\partial_n - \mu) = F_W \quad (2-3)$$

$$\partial_t \theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\theta \quad (2-4)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (2-5)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(\nabla \cdot V\phi) - gW] = 0 \quad (2-6)$$

Los términos del lado derecho de las ecuaciones 2-1 a 2-4 ( $F_U, F_V, F_W, F_\theta$ ) representan forzamientos que surgen de la física del modelo, la mezcla turbulenta, las proyecciones esféricas y la rotación de la tierra. Las ecuaciones 2-1 y 2-2 representan las ecuaciones de momento horizontal, la 2-3 denota la ecuación de momento vertical, la 2-4 es la ecuación termodinámica, la 2-5 representa la ecuación de continuidad, y la 2-6 es la ecuación de altura geopotencial.

Estas ecuaciones se formulan usando una coordenada vertical de presión hidrostática que sigue el terreno, la cual se denota por  $\eta$  y se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{\mu} \quad (2-7)$$

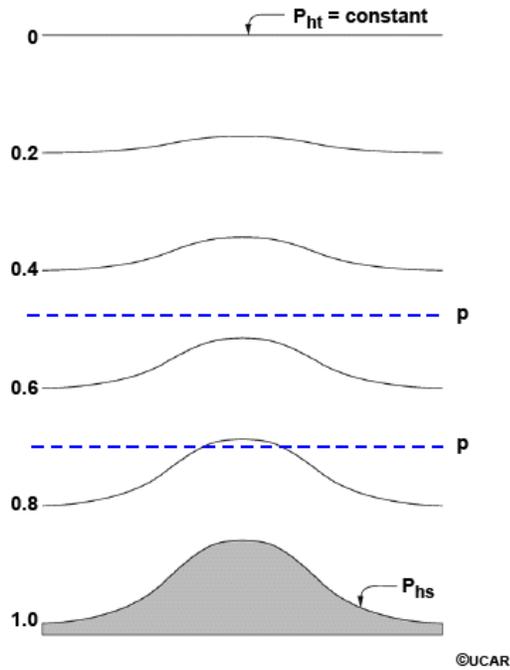
$$\mu = (p_{hs} - p_{ht}) \quad (2-8)$$

donde  $\mu$  es la masa por unidad de área dentro de la columna y  $p_h$  es el componente hidrostático de la presión, limitado por los valores en el tope y en la superficie,  $p_{ht}$  y  $p_{hs}$ , respectivamente (Fig. 2-3). El valor de  $\eta$  varía desde 1 en la superficie hasta 0 en el límite superior del dominio del modelo. La coordenada  $\eta$  puede relacionarse con la altura vertical ( $z$ ) de la siguiente manera:

$$\mu(x, y)\Delta\eta = \Delta p_h = -g\rho_d\Delta z \quad (2-9)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\rho_d$  es la densidad.

En términos generales el modelo WRF representa el estado de la atmósfera en una malla 3D (malla escalonada Arakawa C), que sigue la topografía, en términos de seis variables fundamentales: tres componentes del viento, temperatura, presión y humedad.



*Fig. 2-3: Coordenada vertical  $\eta$  en el modelo WRF.*

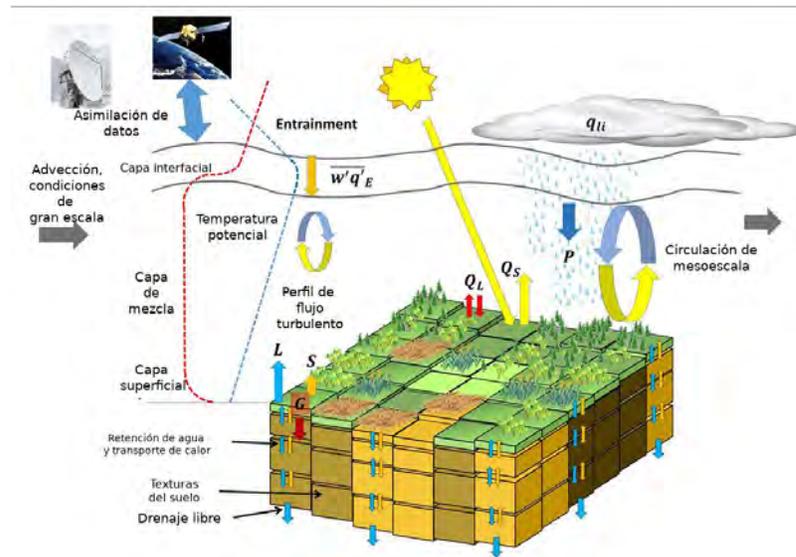
### 2.2.3. Esquemas de superficie terrestre (LSM, Land Surface Model)

El propósito de los esquemas de superficie terrestre o LSMs es representar los procesos que ocurren en la superficie y proporcionar condiciones límite en la parte inferior al modelo atmosférico, es decir, se encargan de cuantificar los intercambios de energía, momento y masa entre la superficie y la atmósfera.

En la Fig. 2-4 se muestra un ejemplo de la interacción suelo-vegetación-atmósfera, donde  $Q_S$  y  $Q_L$  denotan los flujos de radiación de onda corta y onda larga, respectivamente;  $L$ ,  $S$  y  $G$  son los flujos de calor latente, sensible y del suelo en la superficie terrestre;  $P$  es la precipitación y  $q_{li}$  es el contenido líquido de agua y hielo en las nubes.

#### Componentes de los LSMs:

- Física: Aproximación del efecto del fenómeno no resuelto por el modelo atmosférico, mediante un conjunto de algoritmos y en función de las variables que el modelo WRF sí es capaz de resolver.



**Fig. 2-4: Interacción entre los sistemas superficiales (suelo y vegetación) y la atmósfera.**

(Recuperado de: <http://www.gauss-centre.eu/>)

- Parámetros: Adaptan la aproximación física para trabajar en superficies heterogéneas (es decir, con diferentes tipos de vegetación y/o uso de suelo, etc.). Por lo que una representación física más compleja tiende a producir una mayor cantidad de parámetros y mejor representación de los diferentes procesos superficiales.

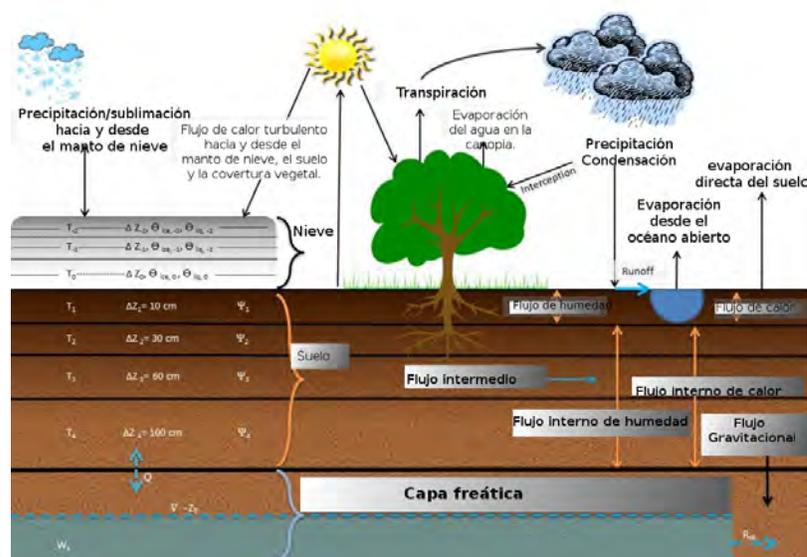
En la Fig. 2-5 se muestra un esquema con los componentes que integran a los LSMs.

Explícitamente los LSMs se encargan de calcular cuatro variables, que son: calor sensible, calor latente, albedo y temperatura superficial, mismos que sirven como base para representar los procesos que ocurren debido a la interacción de la superficie terrestre y la región más baja de la atmósfera.

Existen diversas opciones de LSM que pueden ser utilizadas con el modelo WRF. A continuación se describen las tres opciones consideradas en este estudio:

- *Difusión térmica (TD, Thermal Diffusion scheme)*

Este LSM simple se basa en el esquema de 5 capas utilizado en el modelo MM5. Las capas tienen 1, 2, 4, 8 y 16 cm de espesor. Considera el flujo de calor en el suelo dentro del balance de energía, lo que permite estimar la entrada o salida de energía en el suelo, además solo considera la transferencia de calor por difusión y supone que la variación de la temperatura del suelo durante el día se comporta como un armónico cuyo periodo es de 24 horas.



**Fig. 2-5: Componentes de los esquemas LSM.**  
 (Recuperado de: <https://www.jsg.utexas.edu/noah-mp>)

También permite una capa de cobertura de nieve, pero fija en el tiempo. La humedad del suelo también se fija con un valor constante dependiente del uso de suelo y de la estación del año, es decir, no existen efectos por tipo de vegetación explícitos.

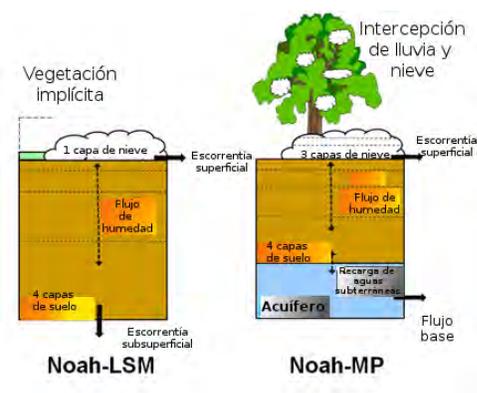
- **Noah-LSM**

El Noah-LSM es el sucesor del esquema OSU (Oregon State University)-LSM. Fue desarrollado conjuntamente por NCAR y NCEP y el código es unificado para fines de investigación y operativos. El nombre Noah proviene de las instituciones que contribuyeron a crear la parametrización: N por el NCEP, O por la Oregon State University, A por la Air Force, y H por el Hydrologic Research Lab. El esquema Noah divide el suelo en 4 capas con grosores de 10 cm, 30 cm, 60 cm y 100 cm respectivamente, hasta una profundidad total de dos metros. La ventaja de este esquema es que considera el tipo de uso de suelo (vegetación), la textura del suelo y la pendiente del terreno, aunque algunos parámetros como el albedo, la fracción de cobertura vegetal y el albedo por efectos de la cobertura de nieve son definidos como elementos bidimensionales, por lo que su estructura vertical no es considerada.

- *Noah-MP*

El Noah-MP es un LSM que utiliza múltiples opciones para estimar cuantitativamente el efecto de procesos debidos a la interacción suelo-vegetación-atmósfera (Niu et al., 2011). Por ejemplo, considera la parte superior e inferior de la canopia, el radio, ramas, hojas y raíces de los árboles, con dimensiones de orientación, densidad y propiedades radiométricas prescritas. El diseño del modelo Noah-MP tiene como base el modelo Noah, pero posee la capacidad de considerar la estructura vertical de diversos parámetros superficiales, como la vegetación, específicamente el dosel arbóreo o canopia.

En la Fig. 2-6 se muestra un esquema que representa los procesos físicos que consideran los esquemas Noah y Noah-MP.



*Fig. 2-6: Representación de los procesos físicos en los esquemas Noah y Noah-MP.*

*(Adaptado de: Mendoza et al., 2015)*

#### 2.2.4. Condiciones iniciales y de frontera: NCEP-CFSR

Desde 1996 se han puesto a disposición de la comunidad científica datos de reanálisis, con el propósito general de producir representaciones globales multianuales de última generación de los estados de la atmósfera. Estas representaciones son generadas por un modelo “fijo” (que no cambia en el tiempo) y un sistema de asimilación de datos también constante. El uso de un modelo constante tiene por objetivo eliminar tendencias ficticias producto de cambios en los modelos y/o en los sistemas de asimilación de datos.

Los datos de reanálisis son una combinación de datos observacionales de diferente procedencia (satelitales, radiosondas, boyas, etc.) con un modelo numérico del tiempo a través de una técnica denominada asimilación de datos. Una característica interesante de estos productos es que el método proporciona un conjunto grande de parámetros atmosféricos y, más importante, coherentes entre sí. Sin embargo, los primeros productos de reanálisis aunque tenían una buena resolución temporal (seis horas) tenían una resolución espacial pobre ( $2.5^\circ$  lat x  $2.5^\circ$  lon), que para muchos fines prácticos no eran suficientes.

En los últimos años se ha producido una nueva generación de datos de reanálisis en la que se ha logrado mejorar la física del modelo meteorológico usado y su resolución espacial, así como la resolución temporal. El sistema de reanálisis NCEP-CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (Saha et al., 2010), es un producto de tercera generación que incluye mejoras sustanciales con respecto a sus antecesores, como el acoplamiento entre la atmósfera y el océano para la generación del campo inicial (first guess), un modelo océano-hielo interactivo y la asimilación de radiancias satelitales a través de un esquema avanzado de interpolación.

La resolución horizontal del modelo atmosférico global del CFSR es del orden de 38 km, con 64 niveles verticales que se extienden hasta 0.26 hPa (es decir, abarca prácticamente toda la atmósfera). El modelo oceánico tiene una resolución horizontal de  $0.25^\circ$  en el ecuador y alrededor de  $0.5^\circ$  en las regiones extratropicales, con 40 niveles que alcanzan una profundidad de 4,737 m. El modelo global de superficie tiene cuatro niveles de suelo y el modelo de océano-hielo tiene tres niveles. Adicionalmente, el modelo atmosférico contiene variaciones observadas de la concentración de  $CO_2$  así como de otros gases de efecto invernadero. Asimismo, toma en cuenta la concentración de aerosoles (partículas en suspensión como polvo, hollín, etc.) presentes en la atmósfera.

Todas las observaciones convencionales y satelitales disponibles fueron incluidas en este producto de reanálisis. Las observaciones satelitales se usaron en forma de radiancias, es decir, antes de que se apliquen algoritmos de recuperación de información (retrievals) a fin de reducir incertidumbres en el proceso. De esta manera, los sesgos y errores de tipo sistemático fueron corregidos antes de usar estas radiancias en el proceso de asimilación de datos. También se usaron mecanismos dirigidos a permitir una transición suave cuando existieran cambios en los sistemas de observación satelital (por mejoras, introducción o retiro de ciertos satélites, etc.).

Específicamente, los análisis de cobertura de nieve, temperatura superficial del mar, precipitación y hielo marino son utilizados como datos de entrada por los subcomponentes del CFSR en forma de malla. Esto tiene razones históricas y/o prácticas. Algunas de estas variables, en la forma de las observaciones originales, son difíciles de asimilar por los sistemas actuales.

En la versión previa del CFSR (NCEP-R1), las observaciones satelitales fueron asimiladas, es decir, las observaciones de radiancia se convirtieron en algo parecido a un perfil de radiosondeo. Esto ya no es necesario porque el CFSR hace uso de las mediciones de radiancia directamente. En la Tabla 2-4 se muestran las diversas fuentes de datos asimilados por el sistema CFSR, incluyendo los que son observados por sistemas basados en radiancias satelitales y los sistemas de observación convencional.

*Tabla 2-4: Principales fuentes de datos en el sistema CFSR.*

<i>Sistemas de observación basados en radiancias satelitales.</i>	<i>Sistemas de observación convencionales</i>
METEOSAT	ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System)
TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS)	Radiosondeos
Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)	Observaciones Superficiales
National Environmental Satellite, Data and Information Service (NESDIS)	Satellite observations (SATOB).
Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)	Paid Observation, data from a manual analysis (PAOBS)
Challenging Mini-satellite Payload (CHAMP)	Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)
Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate (COSMIC)	ERS-1 y ERS-2 (European Remote-Sensing Satellite)
GMS (Geosynchronous meteorological satellite)	Quick Scatterometer (QuikSCAT)
GOES (Geostationary operational environmental satellite)	WindSat of Naval Research Laboratory (NRL)

### 2.3. Medidas estadísticas de desempeño y métodos gráficos

Según las fuentes de cada tipo de error se pueden calcular diversos estadísticos, que también se conocen como medidas estadísticas, puntajes o scores, para determinar la habilidad del modelo numérico en la simulación de la atmósfera. Los estadísticos que se utilizaron en este trabajo se describen a continuación.

**Error cuadrático medio (Mean squared error):** El error cuadrático medio (*MSE*) es quizás uno de los estadísticos más utilizados para la medición del desempeño de un modelo numérico y se estima a partir de la siguiente expresión:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(O_i - S_i)]^2 \quad (2-10)$$

donde  $S_i$  es el valor obtenido a partir del modelo y  $O_i$  es el valor observado en el tiempo  $i$ , mientras que  $n$  es el número total de comparaciones entre ambos conjuntos de datos. Al elevar esta diferencia al cuadrado  $[(O_i - S_i)]^2$ , el *MSE* da el mismo peso a los errores positivos y negativos por lo cual es una medida del error total del modelo. El *MSE* incluye tanto los componentes sistemáticos como los aleatorios, que se pueden separar calculando medidas de error sistemático y aleatorio, como el error promedio (*ME*) y la desviación estándar, respectivamente. Además, el *MSE* se emplea con frecuencia para evaluar la magnitud del error en la simulación de temperatura y velocidad del viento.

**Raíz del error cuadrático medio (Root mean squared error o RMSE):** Es una medida del error "promedio", ponderado de acuerdo con el cuadrado del error. No indica la dirección de las desviaciones. El *RMSE* está más influenciado por errores grandes que por errores pequeños.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(O_i - S_i)]^2} \quad (2-11)$$

**Error absoluto promedio (Mean absolute error o MAE):** Una forma simple para evitar la compensación entre errores positivos y negativos en el resultado del modelo es considerar el error absoluto medio (*MAE*), definido como el promedio de los valores absolutos de las diferencias entre los datos obtenidos a partir del modelo y las observaciones. El *MAE* se calcula mediante la siguiente expresión:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (2-12)$$

Aunque el *MAE* es computacionalmente menos costoso para calcular y más resistente a los errores de valores atípicos, el error cuadrático medio se utiliza más a menudo en la práctica. El valor absoluto de esta diferencia obliga al *MAE* a dar el mismo peso a los errores positivos y negativos, de modo que también es una medida del error total del modelo, e igualmente se emplea para evaluar la magnitud del error en la simulación de temperatura y viento.

**Error promedio o sesgo (*Mean Error*):** El error sistemático medio, error promedio o sesgo es una medida de la confiabilidad total del modelo y puede estimarse como se indica en la siguiente expresión:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \quad (2-13)$$

Es el promedio de las diferencias entre los valores obtenidos a partir de la simulación numérica y los datos observados. Como el *ME* no incluye un término elevado al cuadrado o de valor absoluto, permite cancelar los errores positivos y negativos individuales, lo cual deja únicamente el error sistemático excedente, pero puede obtenerse un puntaje perfecto si todos los errores se compensan. Se emplea con frecuencia para evaluar la magnitud de sobrestimación o subestimación de variables tales como temperatura y viento en la simulación del modelo. Los valores negativos indican una sobrestimación por parte del modelo, mientras que los valores positivos una subestimación.

**Coefficiente de correlación de Pearson (*r*):** Este coeficiente es una medida de la relación lineal entre dos variables cuantitativas continuas, en este caso los valores simulados y observados ( $S_i, O_i$ ). La manera más sencilla de saber si dos variables están correlacionadas es determinar si varían conjuntamente. La correlación es una medida normalizada de asociación o covariación lineal entre dos variables y se calcula como sigue:

$$r(S_i, O_i) = \frac{\mathbf{Cov}(S_i, O_i)}{\sqrt{\mathbf{Var}(S_i)\mathbf{Var}(O_i)}} \quad (2-14)$$

en donde  $\mathbf{Cov}(S_i, O_i)$  representa la covarianza entre  $S_i$  y  $O_i$  y  $\mathbf{Var}$  es la varianza.

Esta medida o índice de correlación  $r$  puede variar entre  $-1$  y  $+1$ , ambos extremos indicando correlaciones perfectas, negativa y positiva respectivamente. Un valor de  $r = 0$  indica que no existe relación lineal entre las dos variables. Una correlación positiva (negativa) indica que ambas variables varían en el mismo sentido (en sentidos opuestos).

**Índice de concordancia de Willmott (Index of Agreement o IOA):** Representa una medida del error entre los valores simulados y observados con respecto a una referencia, en este caso las desviaciones de las observaciones alrededor de su media. El IOA se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [O_i - S_i]^2}{\sum_{i=1}^n ([S_i - \bar{O}_i] + [O_i - \bar{O}_i]^2)} \quad (2-15)$$

El IOA es una medida adimensional, cuyos valores más cercanos a 1 indican una mejor concordancia.

**MAPE (Mean Absolute Percent Error):** Este estadístico proporciona una medida de la magnitud absoluta del error en términos porcentuales y se define por la siguiente expresión:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - S_i|}{O_i} * 100 \quad (2-16)$$

### **Métodos gráficos**

Los métodos gráficos utilizados en este trabajo incluyen la comparación de series de tiempo y de mapas, histogramas, diagramas de dispersión y diagramas de Taylor.

Los *histogramas* representan la distribución de frecuencias, para distintos rangos de valores, de la variable de interés. Proporcionan información sobre la ubicación, dispersión y asimetría de las distribuciones.

Los *diagramas de dispersión* representan los valores simulados contra los observados mediante un gráfico de puntos en el cual las escalas en los ejes son iguales, indicando la medida de correspondencia entre dichos valores. Una simulación perfecta estará representada por cualquier punto sobre la recta de 45 grados en el diagrama.

Los *diagramas de Taylor* proporcionan información sobre la habilidad relativa de uno o más modelos para reproducir las observaciones. En este tipo de diagramas están representados tres estadísticos: el coeficiente de correlación lineal, que está relacionado con el ángulo azimutal; la diferencia cuadrática media centrada o *CRMS*, que es proporcional a la distancia radial desde el punto sobre el eje horizontal identificado como la observación; y la desviación estándar, que es proporcional a la distancia radial desde el origen.

Un punto cercano a la ubicación del símbolo que representa al valor observado (OBS), estaría indicando una correlación alta, una desviación cuadrática pequeña y una variabilidad similar a la observada. En este trabajo se representan las cantidades normalizadas, es decir, divididas entre la desviación estándar de las observaciones.

## 2.4. Metodología para la evaluación

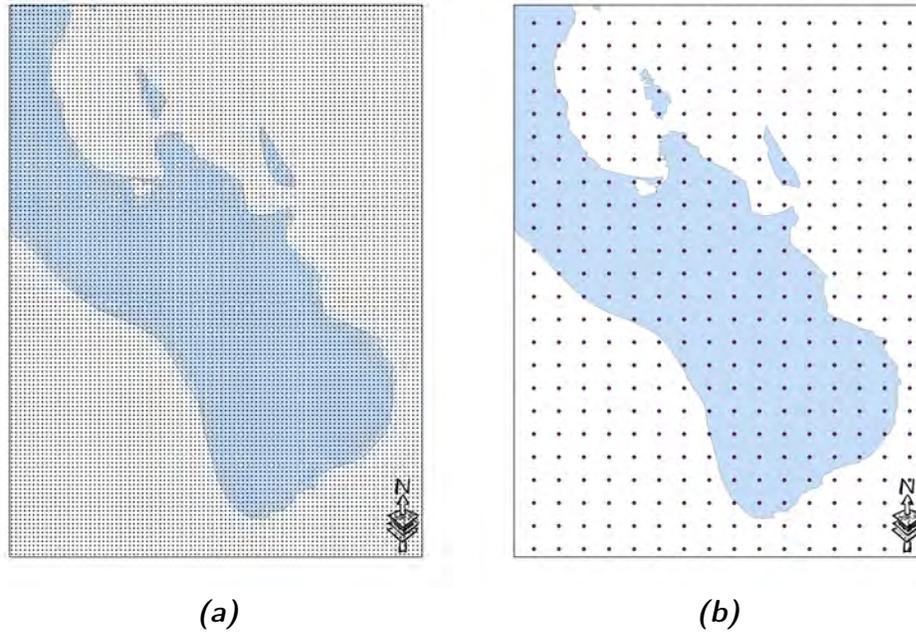
La metodología utilizada para la evaluación del modelo consiste en la combinación de dos métodos de comparación entre los datos simulados y los observados, que corresponden al análisis espacial y al puntual.

### 2.4.1. Análisis espacial

Este método consiste en la comparación de los datos del modelo en formato de malla contra un producto de observaciones que también tenga este formato. Para este caso se utilizó un producto de datos diarios de alta resolución espacial de las temperaturas máximas (*TMax*) y mínimas (*TMin*) cerca de la superficie para la *RM* (Carrasco, 2013; Olguín y Casanova, 2016) (ver la sección 3.2).

Uno de los aspectos más relevantes en este tipo de evaluación es la necesidad de hacer compatibles las mallas que se deben comparar, es decir, conseguir que tengan la misma resolución y estructura para así comparar cada punto de malla. Para lograrlo se interpoló, mediante el método bilineal, la malla de datos observados ( $\sim 1.8km$ ) a la malla del modelo WRF ( $10km$ ) (Fig. 2-7) utilizando la función *ESMF\_regrid* de *NCL*.

La función *ESMF\_regrid* puede analizar tres tipos de mallas: rectilínea, curvilínea y no-estructurada. Una *malla rectilínea* es una matriz rectangular básica de datos, usualmente las coordenadas que las representan son unidimensionales (*1D*). En una *malla curvilínea*, como la que posee el modelo WRF, los arreglos de latitud y longitud deben de estar definidos por matrices *2D*, ya que debe asignarse un valor tanto de latitud como de longitud a cada punto de malla del modelo. Finalmente, una *malla no estructurada* está definida por puntos y celdas de varias formas, aunque por lo general se emplean triángulos o cuadriláteros, ya que los puntos que definen cada celda no tienen una resolución horizontal fija sino que el espacio entre cada punto es variable.



**Fig. 2-7:** (a) Malla del producto de datos observados ( $\sim 1.8\text{km}$ ). (b) Malla del modelo WRF ( $10\text{km}$ ).

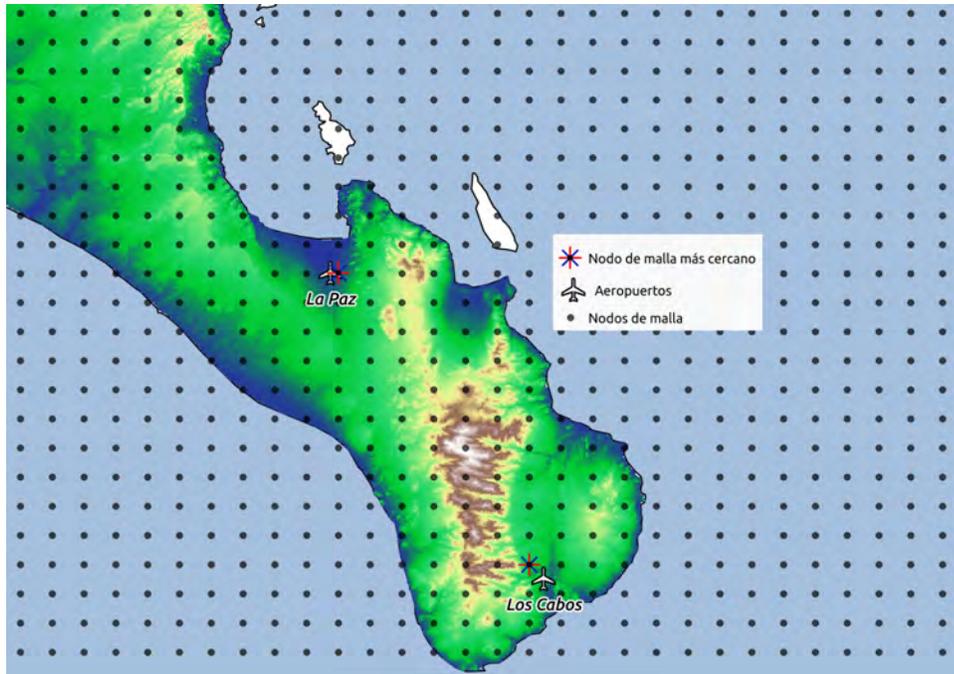
#### 2.4.2. Análisis puntual

Hay dos maneras de extraer datos puntuales de la salida del modelo WRF con NCL:

1. La primera opción es mediante la función `wrf_ll_to_ij`, la cual localiza los índices  $(i, j)$  que definen el nodo de malla más cercano a la ubicación especificada mediante coordenadas de longitud y latitud.
2. La segunda opción es mediante la función `rcm2points`, que interpola una malla curvilínea a una malla rectilínea. Específicamente lo que hace esta función es buscar, en los arreglos de latitud y longitud del modelo WRF, los cuatro puntos que rodean la ubicación del sitio de interés e interpola con el método IDW (Inverse Distance Weighting).

Se realizaron cálculos con ambas opciones pero sólo se presentan los resultados obtenidos con la opción que considera el punto de celda más cercano (`wrf_ll_to_ij`), ya que con este método se obtuvieron mejores resultados para el caso de valores extremos de la temperatura a 2 metros sobre la superficie.

En la Fig. 2- se busca esquematizar la distribución de nodos de la malla, espaciados cada 10 km, así como puntos de interés que corresponden a los aeropuertos de Los Cabos y La Paz, B.C.S., indicando los nodos más cercanos a las coordenadas de los aeropuertos.



*Fig. 2-8: Esquema de la distribución de nodos en la malla del modelo, la ubicación de dos puntos de interés (aeropuertos de La Paz y Los Cabos) y los nodos más cercanos a dichos puntos.*

## Capítulo 3

---

### Desarrollo del experimento numérico

---

#### 3.1. Configuración del modelo WRF

Se realizaron simulaciones numéricas de alta resolución con el modelo *WRF* para el período de 1980 a 1989, cuyas características de configuración se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Configuración del modelo WRF.

Resolución espacial	10 kilómetros
Resolución temporal	1 hora
Dimensión de la malla (xyz)	618 x 349 x 30
Condiciones iniciales y de frontera	NCEP-CFSR (0.5°x 0.5°)
Nuevos datos estáticos	Uso de suelo y cobertura vegetal de INEGI
Versión del modelo	3.8.1
Física superficial	Noah, Noah-MP, TD
Capa superficial	MM5 Monin-Obukhov
Capa límite planetaria	YSU
Microfísica	WSM 3-class simple ice
Radiación de onda larga	RRTM
Radiación de onda corta	Dudhia
Cúmulos	Kain-Fritsch

Un experimento numérico con esta resolución temporal y espacial no es posible generarla en un equipo de cómputo común. En nuestro caso se tuvo la oportunidad de utilizar el equipo de supercómputo *Miztli* de la UNAM (Proyecto LANCAD-UNAM-DGTIC-110), una supercomputadora con una capacidad de procesamiento de 118 *TeraFlops*, es decir, 118 billones de operaciones aritméticas por segundo (Supercómputo en la UNAM, 2018). El uso de equipo de supercómputo en este tipo de estudios es de gran importancia, ya que nos permite optimizar significativamente cada uno de los procesos y, a su vez, poder analizar períodos más largos de información. Asimismo, el contar con un sistema de cómputo de alto desempeño nos permite aumentar la resolución en los experimentos de simulación numérica y, por lo tanto, obtener una mejor representación de la atmósfera. En la Tabla 3-2 se muestran los tiempos aproximados en el proceso de cada uno de los programas de WPS y WRF en *Miztli*, esto considerando un año de simulación, y en la Fig. 3-1 se muestra el dominio utilizado en las simulaciones del modelo.

Tabla 3-2: Tiempos de proceso en la supercomputadora Miztli. (*sst*=sea surface temperature; *sfc*=surface; *pres*=pressure levels)

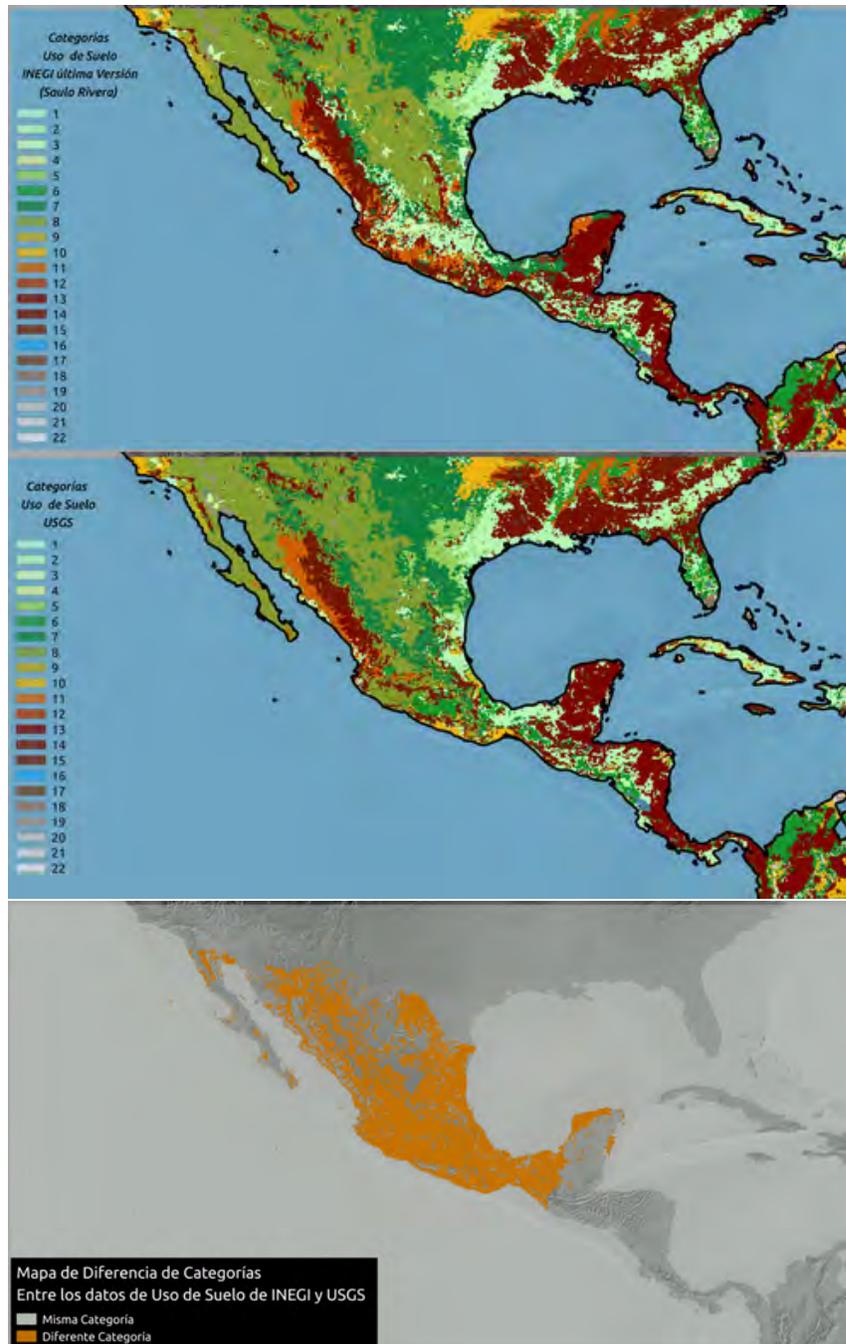
Programas	WPS					WRF-ARW	
	UNGRIB			GEOGRID	METGRID	REAL	WRF
	sst	sfc	pres				
Tiempo de proceso	~ 0.5hrs	~ 1.5hrs	~ 4hrs	~ 0.2hrs	~ 6hrs	~ 3hrs	~ 33hrs
Número de cores	1	1	1	8	16	128	128



Fig. 3-1: Dominio considerado para las simulaciones realizadas con el modelo WRF.

En términos de la inicialización estática del modelo WRF, existe una serie de datos terrestres predeterminada (*geog*) que proviene del USGS (Servicio Geológico de los EUA) (ver Fig. 3-2); sin embargo, también se tiene la opción de ingresar nuevas series de datos. Para lograr lo anterior, es necesario ingresar al modelo WRF los campos terrestres en el formato adecuado para que el WPS pueda procesar la información. Una manera de realizar la conversión de datos en formato ASCII al formato legible por WPS (binario) es mediante el software GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), el cual básicamente actúa como una biblioteca especializada para la escritura y lectura de datos geoespaciales, logrando obtener con éxito las series con el formato requerido. Por otra parte, dentro de la paquetería de WPS existe el programa *write\_geogrid.c*, que después de ser compilado es útil para transformar los datos al formato requerido.

Considerar nueva información estática-terrestre en el modelo WRF es un aspecto que conlleva cierta dificultad; sin embargo, puede reflejar cambios en las salidas del modelo, sobre todo cuando las nuevas series presentan mayor resolución. En un estudio previo (Rivera-Martínez, 2018) se desarrolló una metodología para procesar y obtener cinco series de uso de suelo y vegetación, reclasificadas a partir de los datos del INEGI para diferentes períodos de tiempo, que pueden ser utilizadas en la inicialización estática del WRF con el objeto de lograr un mejor desempeño.

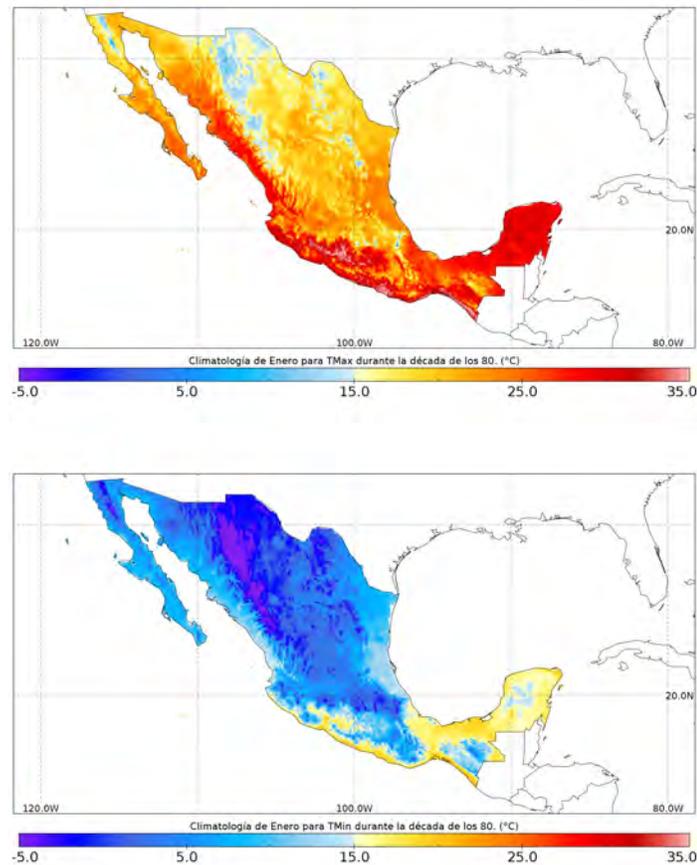


*Fig. 3-2: Series de uso de suelo y cobertura vegetal del INEGI (arriba) y del USGS (centro), y mapa de diferencias entre ambas series (abajo).*

En el presente trabajo se empleó la Serie 1 de Rivera-Martínez (2018) (Fig. 3-2), que corresponde al período de 1970 a 1988, y se utilizó la paquetería disponible dentro de WPS para la conversión del formato ASCII a binario. En la Fig. 3-2 se incluye también el mapa de las diferencias entre la base de datos del USGS, que es la serie predeterminada, y la obtenida con datos del INEGI, en donde se observa que los datos del USGS presentan categorías diferentes para gran parte del país en comparación con la base del INEGI.

### 3.2. Datos Observados

Para la evaluación del modelo WRF se utilizó un producto de datos diarios de alta resolución espacial ( $\sim 1.8km$ ) de las temperaturas máximas ( $TMax$ ) y mínimas ( $TMin$ ) cerca de la superficie para la República Mexicana (Carrasco, 2013; Olguín y Casanova, 2016), que fue generado a partir de los datos observados en las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, observaciones de estaciones de los EUA y datos del reanálisis NARR (*North American Regional Reanalysis*). En la Fig. 3-3 se muestran mapas de la climatología de enero durante la década de los 80, calculados a partir del producto diario de alta resolución de  $TMax$  y  $TMin$ .



*Fig. 3-3: Mapas de la climatología de enero para  $TMax$  (arriba) y  $TMin$  (abajo) considerando la década de los 80, calculados a partir del producto diario de alta resolución.*

### Resultados

---

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación del desempeño del modelo WRF para los meses de enero, mayo y octubre de la década de los 80s a partir de los diversos métodos aplicados. Se muestran los resultados de estos meses por considerarlos representativos de las condiciones climáticas en distintas épocas del año; el resto de los análisis se puede consultar en la sección de Anexos.

#### 4.1. Análisis espacial de los promedios mensuales de $T_{Max}$ y $T_{Min}$ en la década de los 80s

En esta sección se muestran los resultados que se obtuvieron usando el método de análisis espacial descrito previamente. En este caso se está considerando la simulación con el esquema *Noah-LSM*, ya que es el esquema base en este estudio. Los mapas representan datos espaciados cada 10 km. A partir de ellos, se calculó el porcentaje de nodos que caen dentro de diferentes rangos de valores para cada estadístico y los resultados se presentan mediante histogramas.

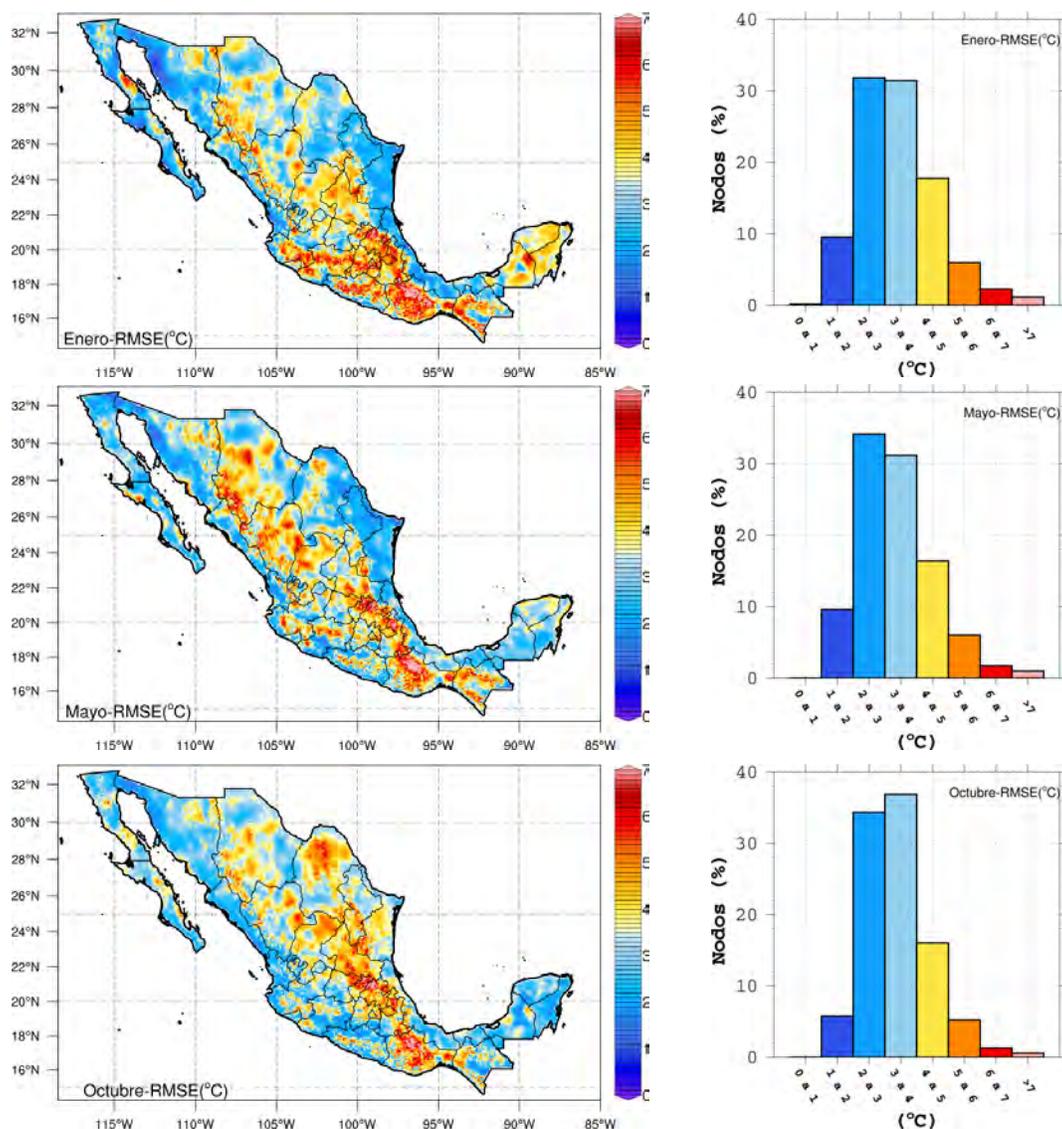
##### 4.1.1. Discusión de los resultados

###### *TMax*

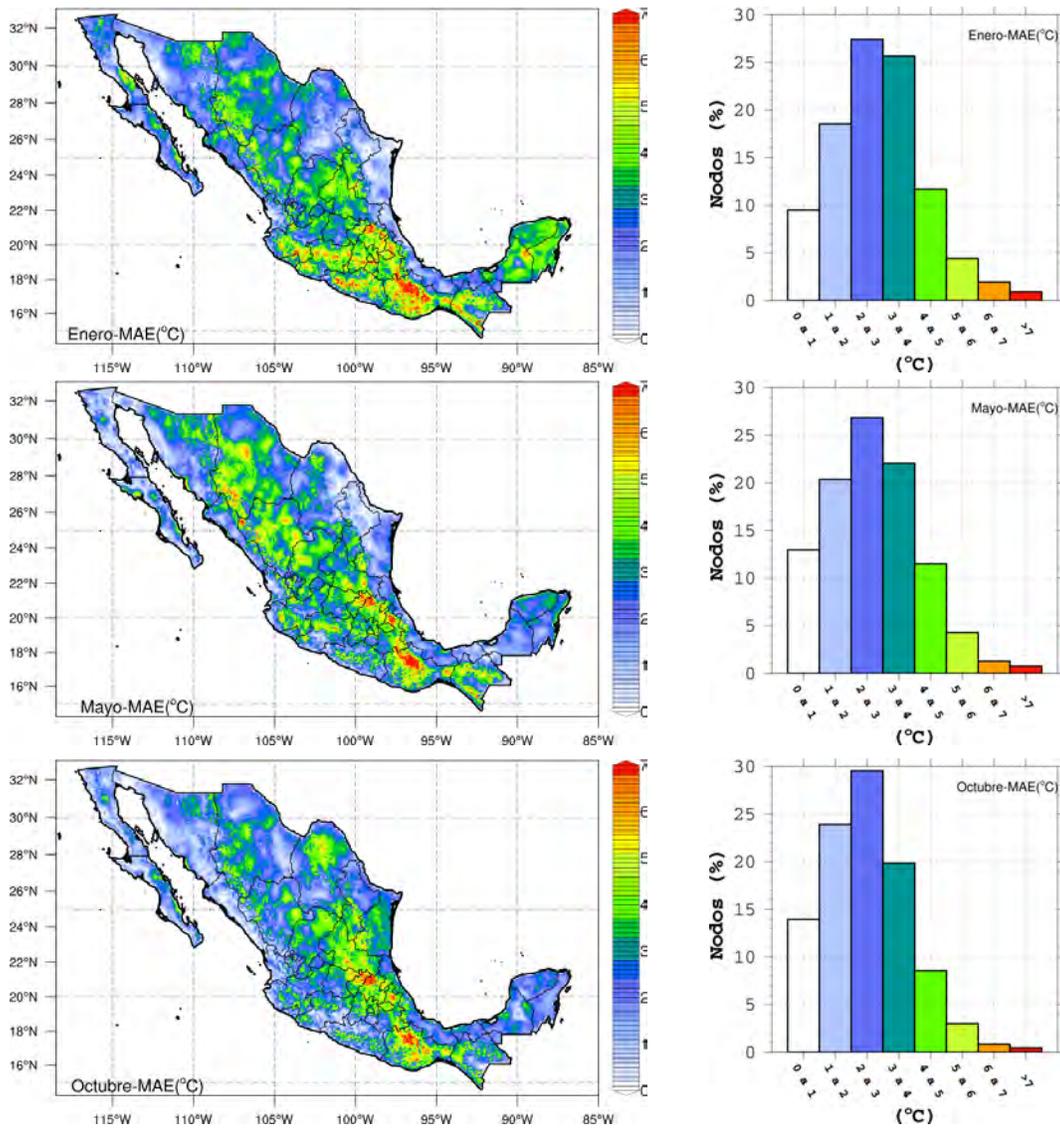
Para el caso del RMSE (Fig. 4-1) se observa que, en promedio para los tres meses, alrededor del 9% de los nodos de malla tienen valores en el rango de 0-2°C, 67% tiene valores entre 2-4°C, 22% tiene valores entre 4-6°C, y alrededor del 3% tiene valores  $\geq 6^\circ\text{C}$ . Con respecto al MAE (Fig. 4-2) se obtuvo que aproximadamente el 33% de los nodos tiene valores entre 0-2°C, 50% tiene valores entre 2-4°C, 15% tiene valores entre 4-6°C y alrededor del 2% tiene valores  $\geq 6^\circ\text{C}$ . Finalmente, para el ME (Fig. 4-3) resultó que aproximadamente el 5% de los nodos tiene valores negativos (entre 0 y -4°C), 28% tiene valores entre 0-2°C, 50% tiene valores entre 2-4°C, 14% tiene valores entre 4-6°C y alrededor del 3% muestra valores  $\geq 6^\circ\text{C}$ . Sin embargo, en los mapas se pueden observar algunas diferencias de un mes a otro en las distribuciones espaciales de cada estadístico.

Como se comentó anteriormente, los esquemas *LSM* tienen un papel importante en el cálculo diagnóstico de la temperatura cerca de la superficie; dependiendo del detalle de estos esquemas es que tendremos resultados más certeros. En el caso del esquema *Noah* es

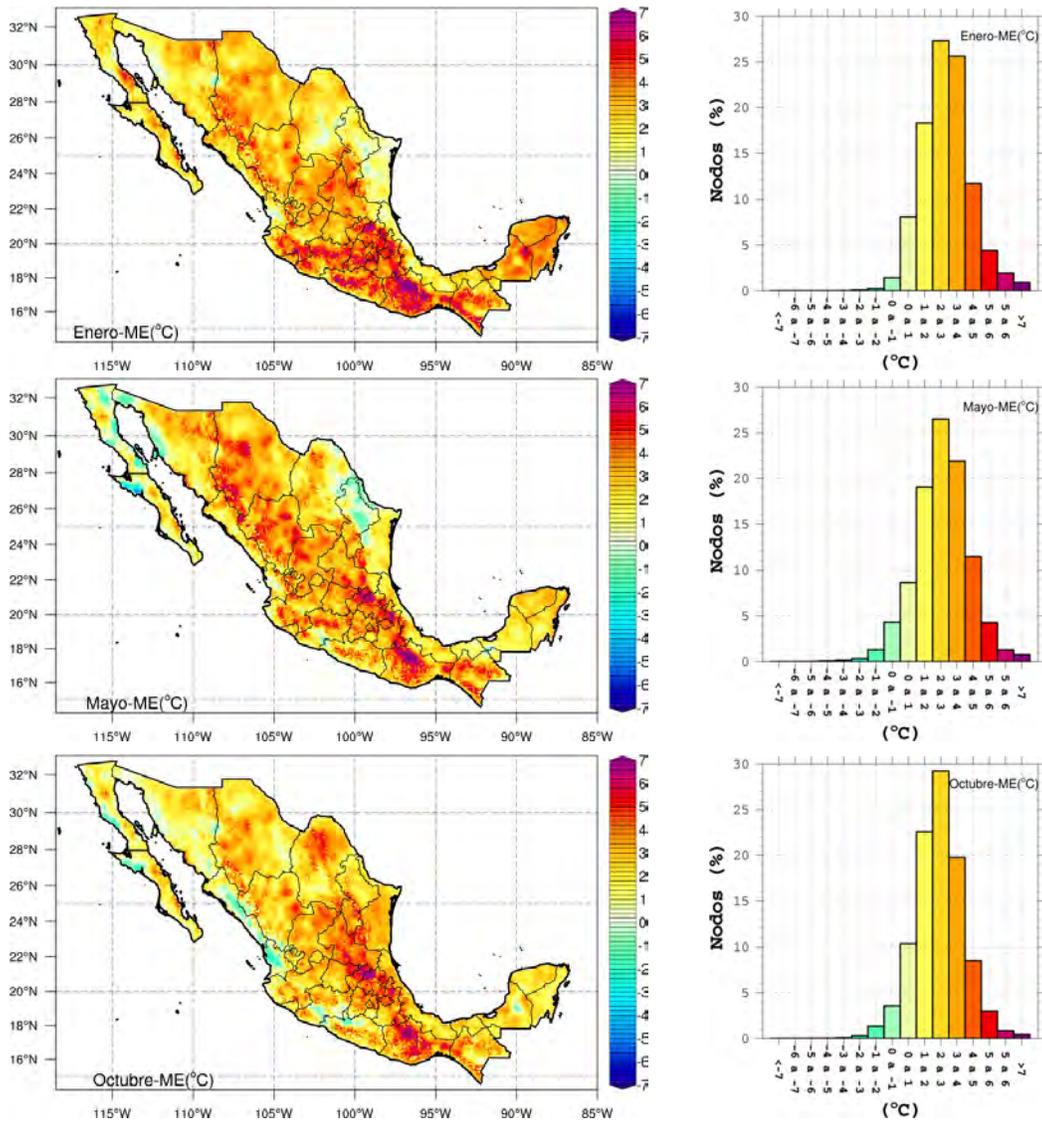
importante mencionar que tiene algunas limitaciones, como considerar la distribución de la vegetación sólo de manera horizontal, pero no verticalmente; esto le resta eficiencia en el cálculo de la temperatura superficial, ya que verticalmente existe una interacción compleja de diversos procesos entre el terreno y la atmósfera que prácticamente se están descartando en este esquema. El *NoahMP* es la versión mejorada del esquema *Noah* y considera la distribución tanto vertical como horizontal de la vegetación, inclusive es posible insertar datos de este tipo con resoluciones más finas que las que ya vienen predeterminadas; un ejemplo es la información de la altura de la canopia, que dentro del esquema *NoahMP* tiene un papel fundamental.



*Fig. 4-1: Mapas e histogramas del RMSE para TMax en enero (arriba), mayo (centro) y octubre (abajo).*

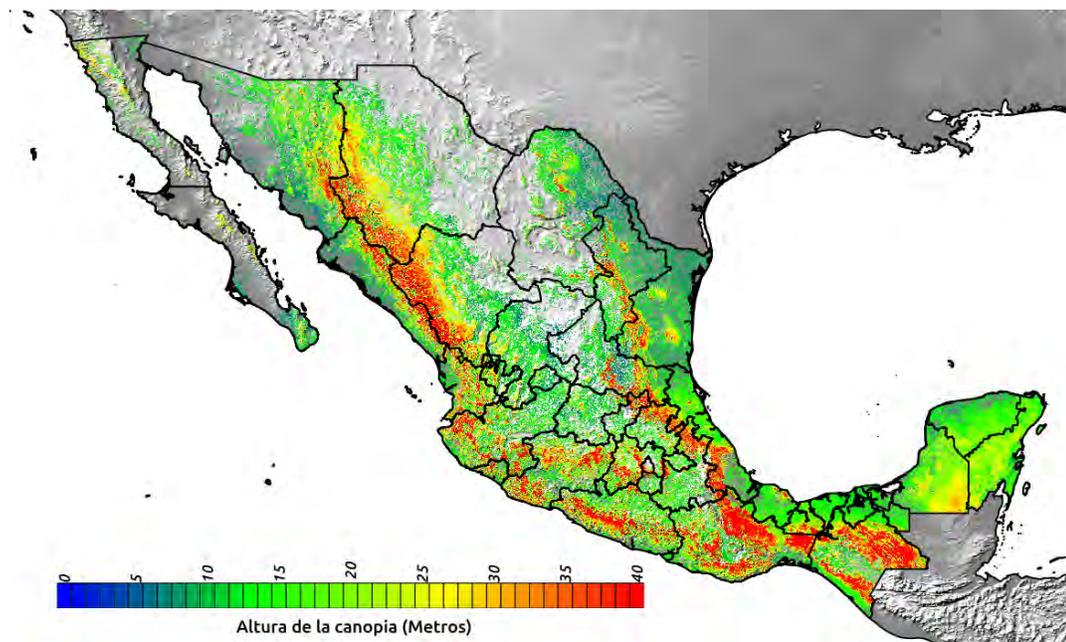


*Fig. 4-2: Mapas e histogramas del MAE para TMax en enero (arriba), mayo (centro) y octubre (abajo).*



*Fig. 4-3: Mapas e histogramas del ME para TMax en enero (arriba), mayo (centro) y octubre (abajo).*

En la Fig. 4-4 se muestra un mapa de altura de canopia para México, los datos de canopia fueron extraídos del producto global de 1km de resolución generado a partir de mediciones de los sensores ICESAT (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)/GLAS (Geoscience Laser Altimeter), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y TRMM, (Simard et al., 2011), se puede observar que las zonas con mayor altura de la canopia se encuentran en las partes altas de las regiones montañosas. Algunas de estas zonas coinciden con las regiones en donde se presentaron resultados poco favorables en los estadísticos para  $TMax$ , lo cual puede deberse a que el esquema *Noah* no considera la distribución vertical de la canopia.



**Fig. 4-4: Mapa de altura de canopia para la República Mexicana.**

(Información global disponible en: ORNL DAAC. 2017. Spatial Data Access Tool (SDAT). ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1388>)

### *TMin*

El modelo WRF parece reproducir mejor la  $TMin$  que la  $TMax$  en gran parte de la *RM*. Para el caso del RMSE (Fig. 4-5), y considerando el promedio de los tres meses, se observa que aproximadamente el 35 % de los nodos de malla tienen valores entre 0-2°C, 50 % tienen valores entre 2-4°C, 12 % tienen valores entre 4-6°C y alrededor del 3 % tienen valores  $\geq 6^\circ\text{C}$ . Con respecto al MAE (Fig. 4-6) se observa que aproximadamente el 62 % de los nodos de malla tienen valores entre 0-2°C, 27 % tienen valores entre 2-4°C, 9 % tienen

valores entre 4-6°C y alrededor del 2% muestran valores  $\geq 6^\circ\text{C}$ . Finalmente, para el ME (Fig. 4-7) resultó que el 10% de los nodos de malla tienen valores  $\leq -4^\circ\text{C}$ , 26% tienen valores entre -4 y  $-2^\circ\text{C}$ , 44% tienen valores entre -2 y  $0^\circ\text{C}$ , 19% presentan valores entre 0 y  $2^\circ\text{C}$ , y alrededor del 2% tienen valores  $\geq 2^\circ\text{C}$ .

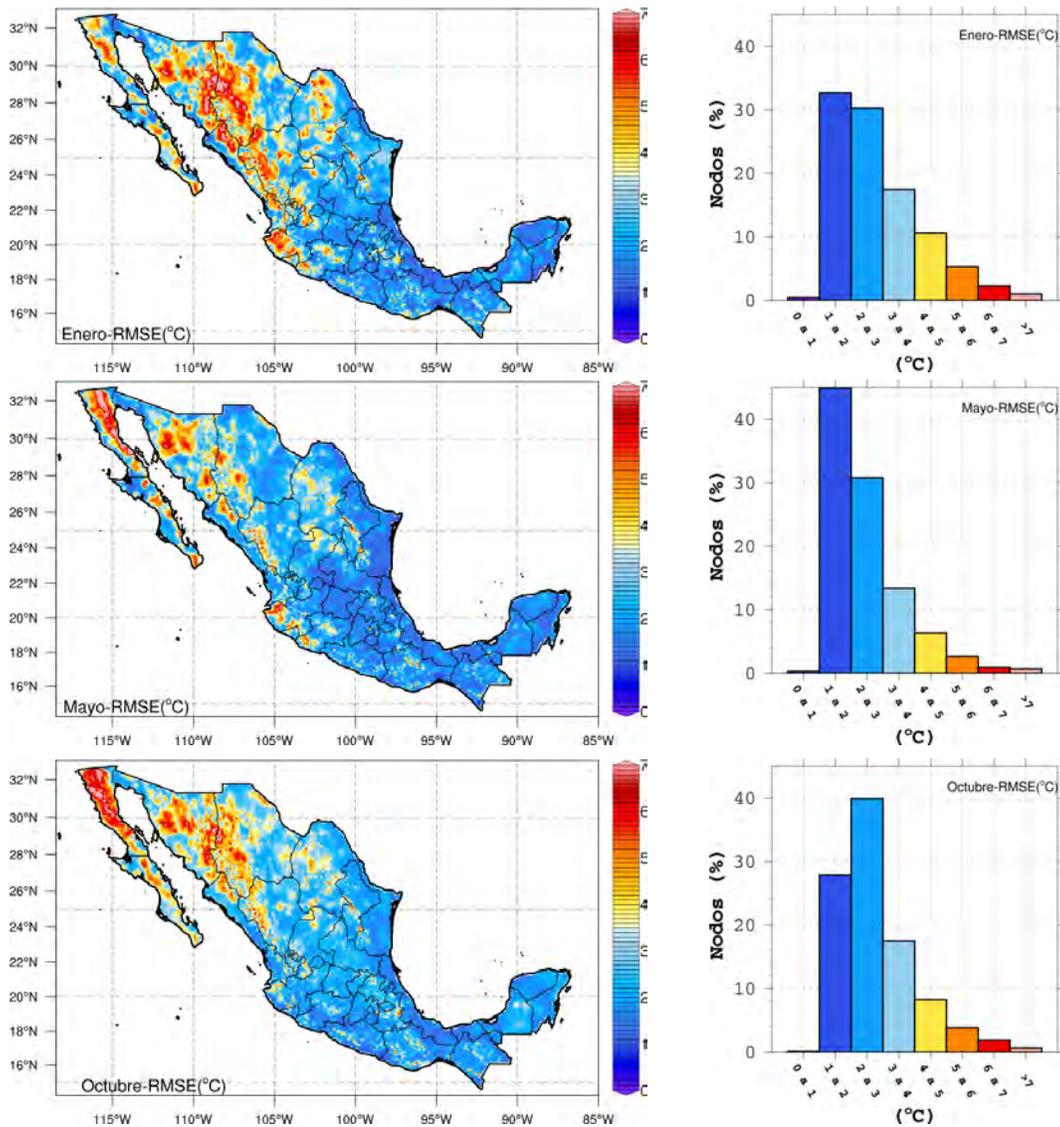
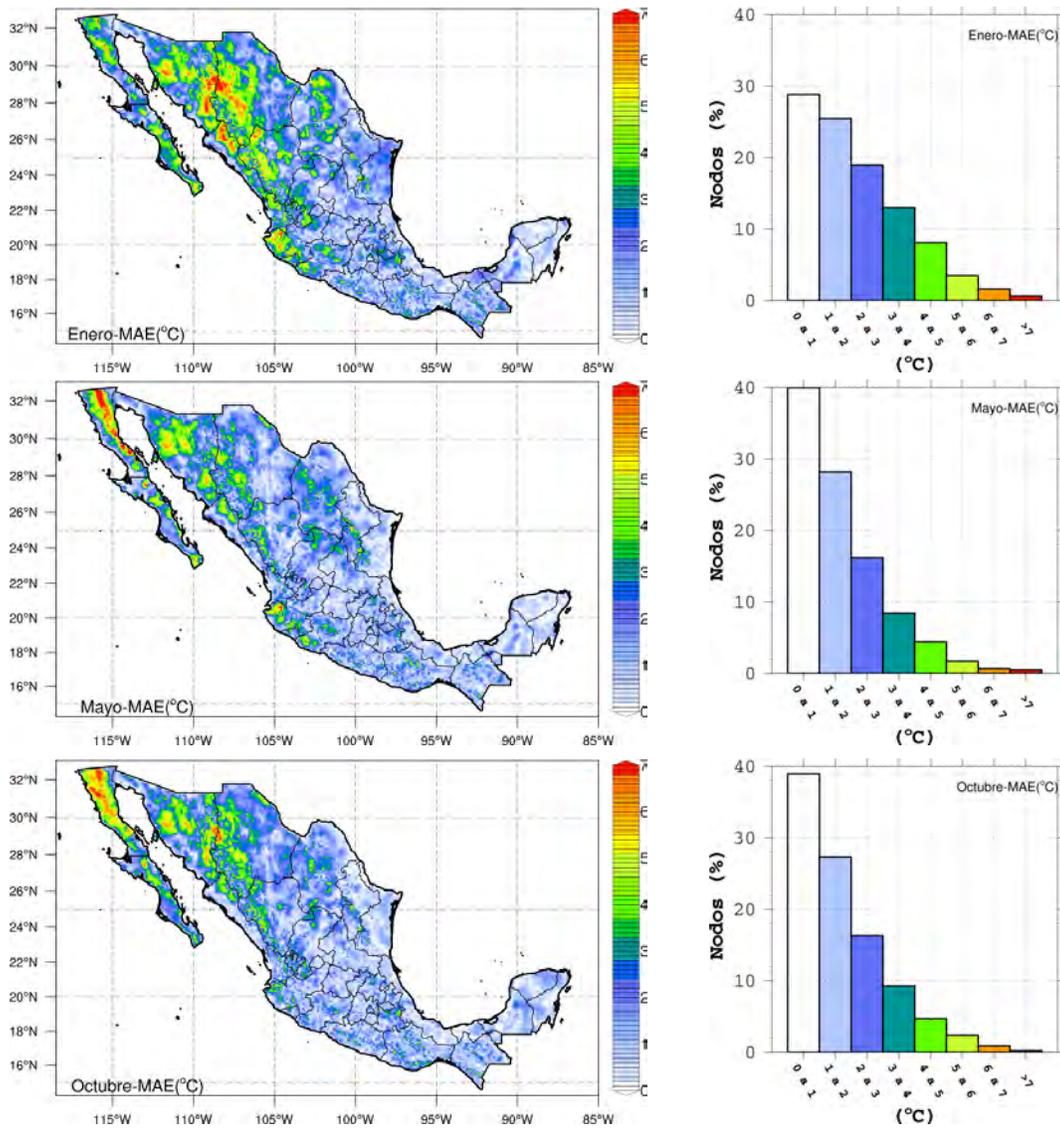
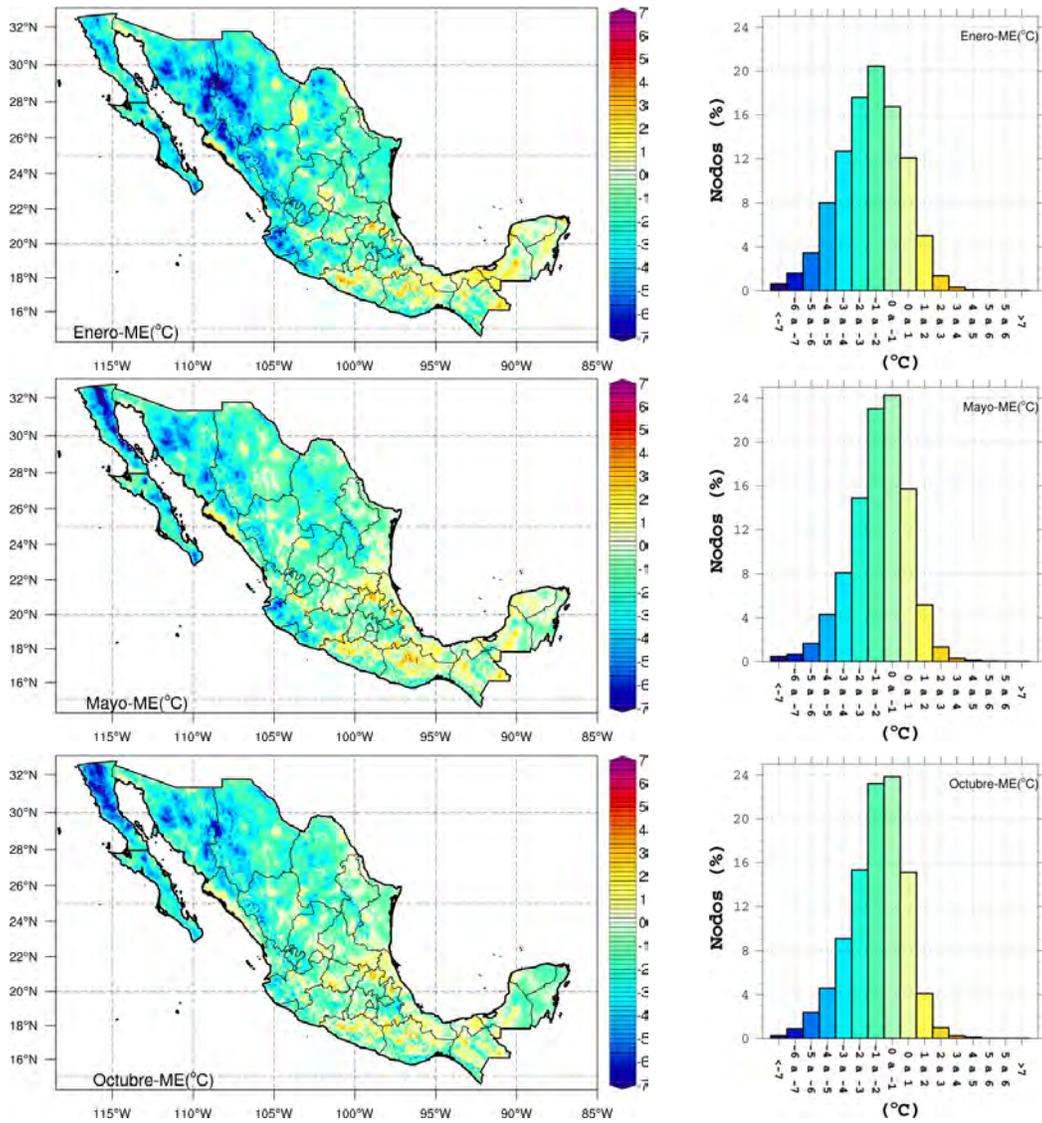


Fig. 4-5: Mapas e histogramas del RMSE para TMin en enero (arriba), mayo (centro) y octubre (abajo).



*Fig. 4-6: Mapas e histogramas del MAE para TMin en enero (arriba), mayo (centro) y octubre (abajo).*



*Fig. 4-7: Mapas e histogramas del ME para TMin en enero (arriba), mayo (centro) y octubre (abajo).*

Sin embargo, se puede observar que las regiones con errores más altos en  $TMin$  corresponden a zonas con baja densidad de estaciones para el periodo de estudio, por lo que las diferencias obtenidas también están relacionadas con la falta de información observada y no sólo con el desempeño del modelo. En la Fig. 4-8 se presenta un mapa con la densidad de estaciones para la década de los 80s; en este mapa se consideraron sólo las estaciones que tuvieron al menos el 80 % de la información requerida para este estudio.



*Fig. 4-8: Mapa de la densidad de estaciones climatológicas del SMN en la RM que cuentan con al menos el 80 % de la información correspondiente a la década de los 80s.*

#### 4.2. Evaluación puntual

En esta sección se presenta el análisis de comparación entre los datos de estaciones climatológicas y los valores del modelo WRF correspondientes al nodo más cercano a las coordenadas de los sitios de interés. A continuación se presentan diferentes estadísticos calculados para 20 sitios distribuidos en toda la *RM* (Fig. 4-9), considerando el periodo 1982-83 durante el cual ocurrieron eventos climáticos relevantes. Asimismo, se incluye el análisis de los tres diferentes esquemas de *LSM* previamente mencionados.



Fig. 4-9: Sitios de interés para la evaluación puntual del modelo WRF durante 1982-1983.

En la Tabla 4-1 se presenta información sobre la ubicación y elevación de las estaciones climatológicas analizadas.

Tabla 4-1: Datos de las estaciones utilizadas para la evaluación puntual durante el período de 1982-83.

Nombre	Lat.	Lon.	Elev (m)	Edo.
Presa Potrerillos	22.23	-102.42	2171	Ags.
Los Robles	24.04	-110.12	665	B.C.S.
Chamotón	19.36	-90.72	10	Camp.
Colonia Moctezuma	19.43	-99.11	2235	CDMX
C.E.M. Ciudad Deportiva	28.70	-105.98	1350	Chih.
Ramos Arizpe	25.53	-100.98	1470	Coah.
Peña del Águila	24.21	-104.66	1890	Dgo.
Cinco Señores	20.95	-100.89	2062	Gto.
La Begoña	20.84	-100.82	1850	Gto.
Chapala	20.29	-103.19	1530	Jal.
Guadalajara	20.70	-103.38	1567	Jal.
Antunez	19.90	-101.04	360	Mich.
Cerro Blanco	21.38	-104.62	965	Nay.
Icamole	25.94	-100.69	640	N.L.
Cofradía	16.75	-94.75	746	Oax.
El Carrizo	26.27	-109.04	8	Sin.
Sonoyta	31.86	-112.85	389	Son.
Teapa	17.55	-92.95	51	Tab.
República Española	23.70	-98.2	50	Tamps.
El Tejar	19.07	-96.16	10	Ver.

Enseguida se presenta un análisis resumido de los resultados de la evaluación puntual para  $TMax$  y  $TMin$  durante 1982-83, incluyendo los gráficos de las series de tiempo, diagramas de dispersión y diagramas de Taylor para los tres esquemas  $LSM$  utilizados. Las figuras se muestran alternadamente para  $TMax$  y  $TMin$  y se presentan únicamente los gráficos correspondientes a las siguientes estaciones: Presa Potrerillos, Ags. (Figs. 4-10 a 4-12); Colonia Moctezuma, CDMX (Figs. 4-13 a 4-15); Cinco Señores, Gto. (Figs. 4-16 a 4-18); Guadalajara, Jal. (Figs. 4-19 a 4-21); Sonoyta, Son. (Figs. 4-22 a 4-24), y El Tejar, Ver. (Figs. 4-25 a 4-27). Los gráficos para el resto de las estaciones se pueden consultar en el Anexo.

### **$TMax$**

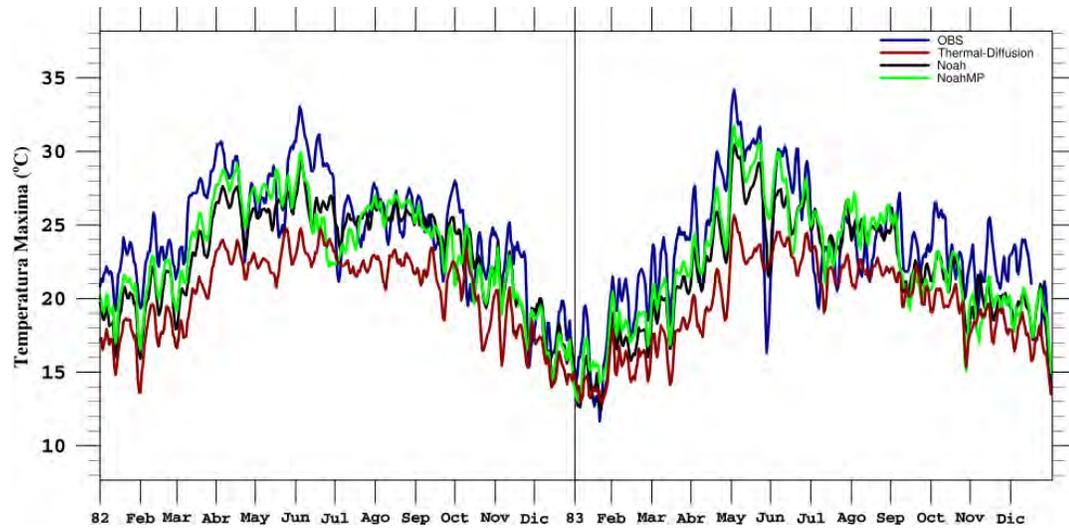
Como previamente se había identificado en el análisis espacial, el modelo tiende a subestimar las  $TMax$  en gran parte de la  $RM$ . En este caso, utilizando los tres esquemas de  $LSM$  es posible identificar con cuál de ellos se tiene un mejor desempeño en el cálculo diagnóstico de la temperatura superficial.

Se observa en las series de tiempo que tanto *Noah* como *Noah-MP* presentan resultados mucho mejores que el esquema *TD*. Otro aspecto importante es que tanto *Noah* como *Noah-MP* presentan un coeficiente de correlación alto y muy cercano entre un esquema y otro, como se puede observar en los diagramas de dispersión y en el diagrama de Taylor; sin embargo, los valores de los estadísticos *RMSE*, *MAE* y *ME* indican que usando el esquema *Noah-MP* se obtienen mejores resultados que con el esquema *Noah* en la mayoría de las estaciones analizadas.

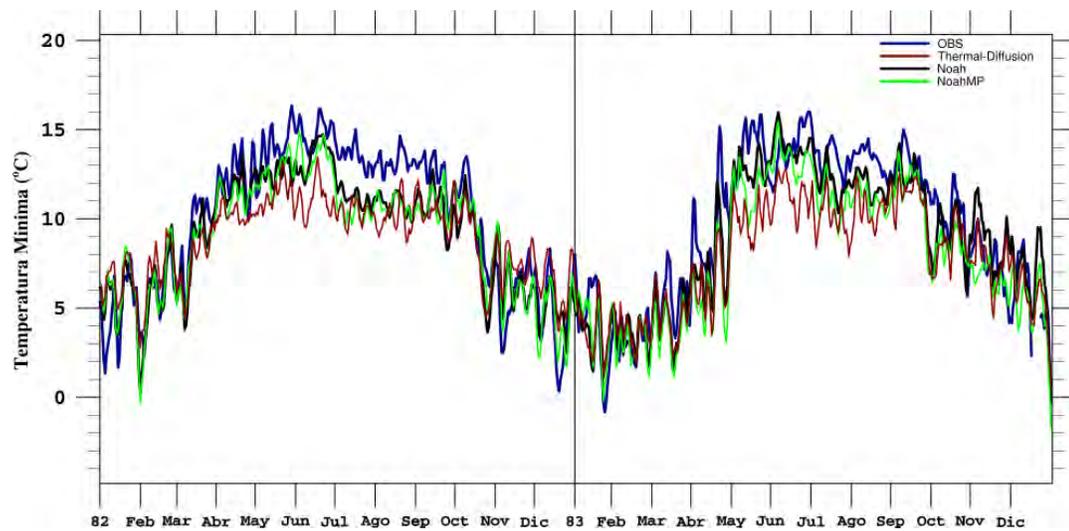
### ***TMin***

En cuanto a la *TMin*, los tres esquemas presentan buenos resultados; al igual que en el análisis espacial, se obtuvo que el modelo WRF tiene un mejor desempeño para simular las *TMin*. En este caso, el esquema *Noah-MP* presenta mejores resultados en cuanto a los estadísticos calculados en comparación con el *Noah* para las estaciones de los estados de Sonora, Baja California Sur, Ciudad de México, Oaxaca, Chiapas y Veracruz, mientras que el esquema *Noah* fue mejor en las estaciones de los estados de Puebla, Aguascalientes, Nuevo León, Tabasco y Tamaulipas. En la estación de Sinaloa los resultados fueron muy similares. Para la *TMin* los diagramas de dispersión y de Taylor nos permiten identificar que la correlación es alta y similar entre los tres esquemas; sin embargo, la diferencia está en el resultado de *MAE*, *ME* y *RMSE*, así como en la desviación estándar que se presenta en el diagrama de Taylor. En los diagramas de Taylor se observa que el esquema *TD*, para la mayoría de los casos, tiende a presentar menor varianza que los datos observados.

Presa Potrerillos, Ags.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 4-10: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Presa Potrerillos, Ags., durante 1982-1983.

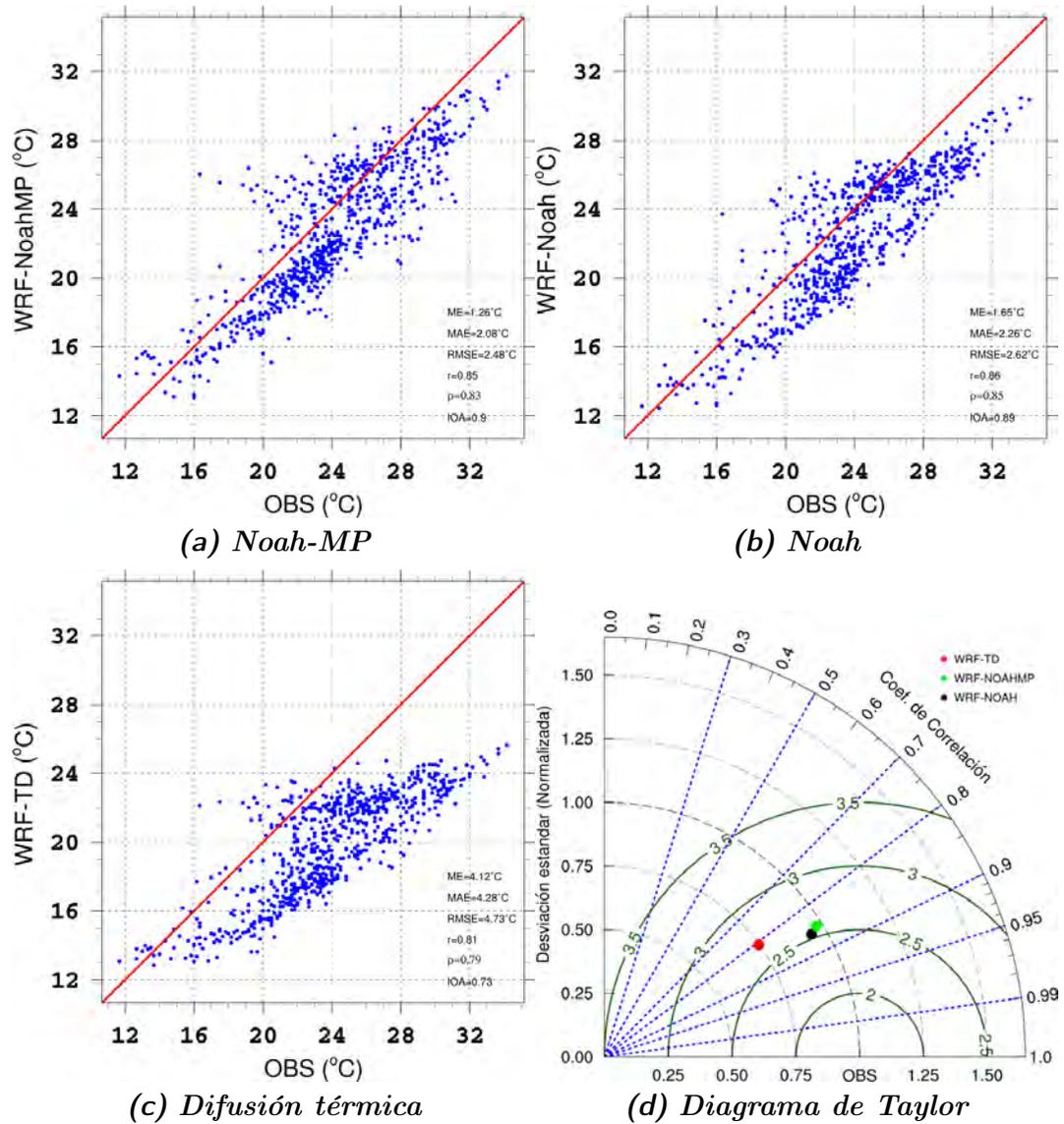


Fig. 4-11: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Presa Potrerillos, Ags.

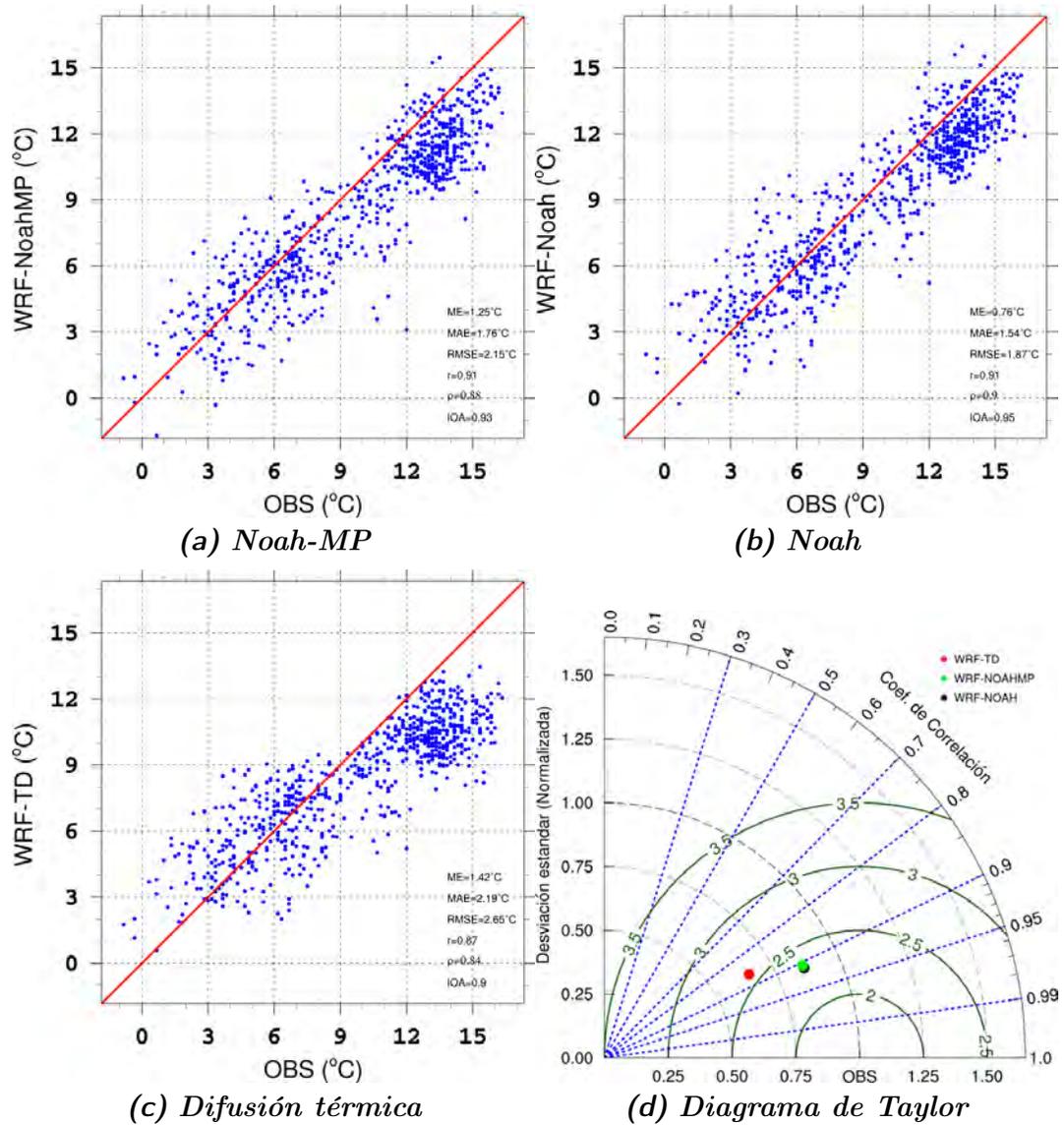
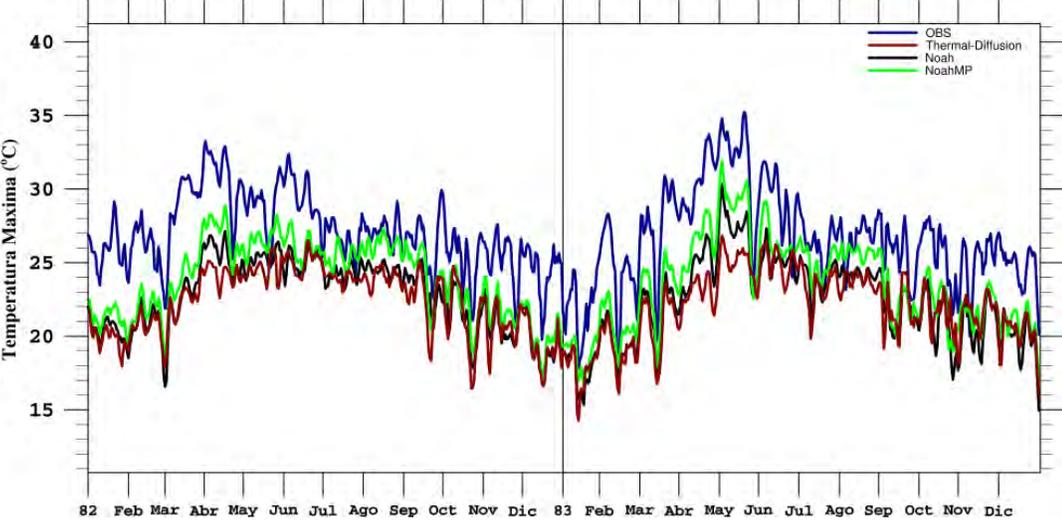
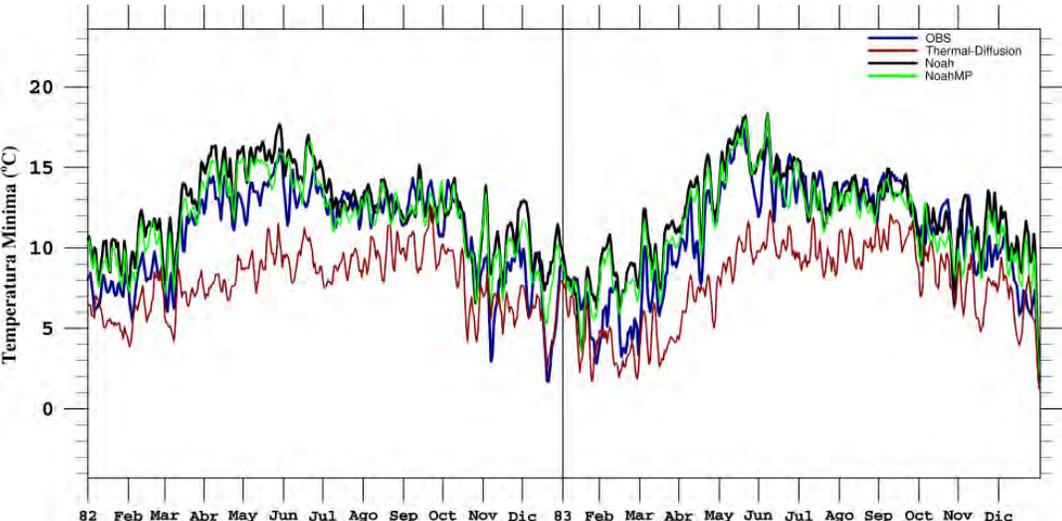


Fig. 4-12: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Presa Potrerillos, Ags.

Colonia Moctezuma, CDMX.

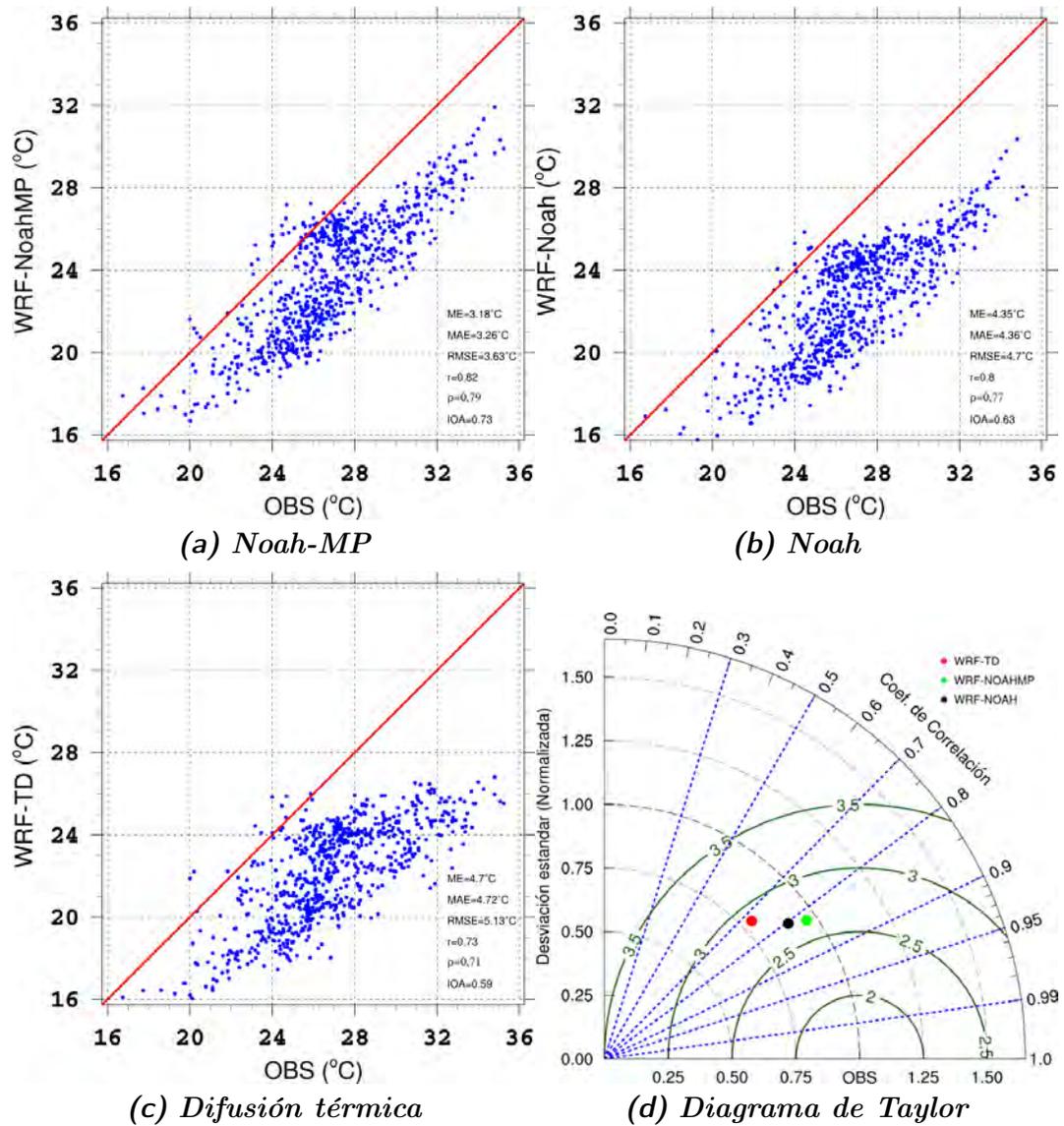


(a) TMax



(b) TMin

Fig. 4-13: Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Colonia Moctezuma, CDMX, durante 1982-1983.



*Fig. 4-14: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Colonia Moctezuma, CDMX.*

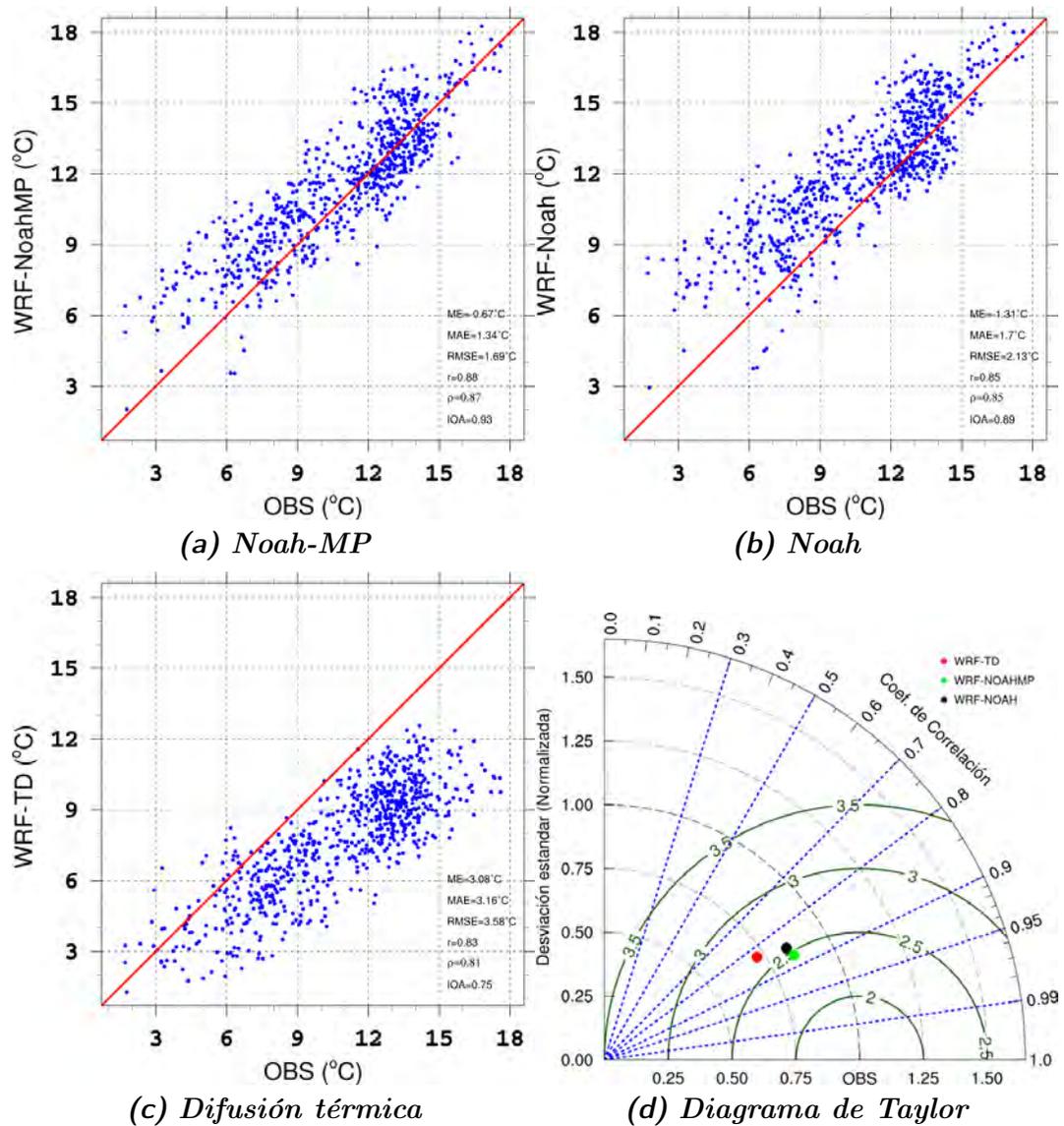
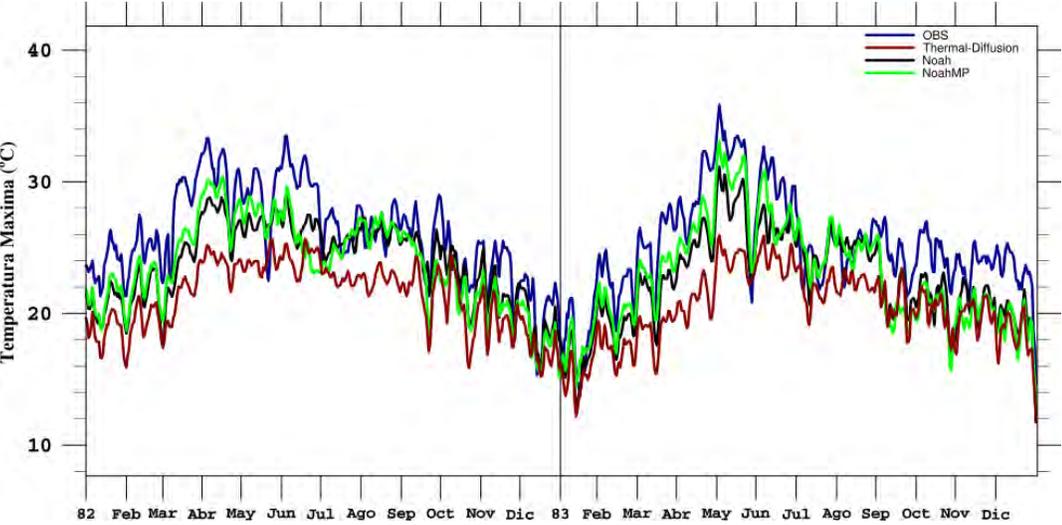
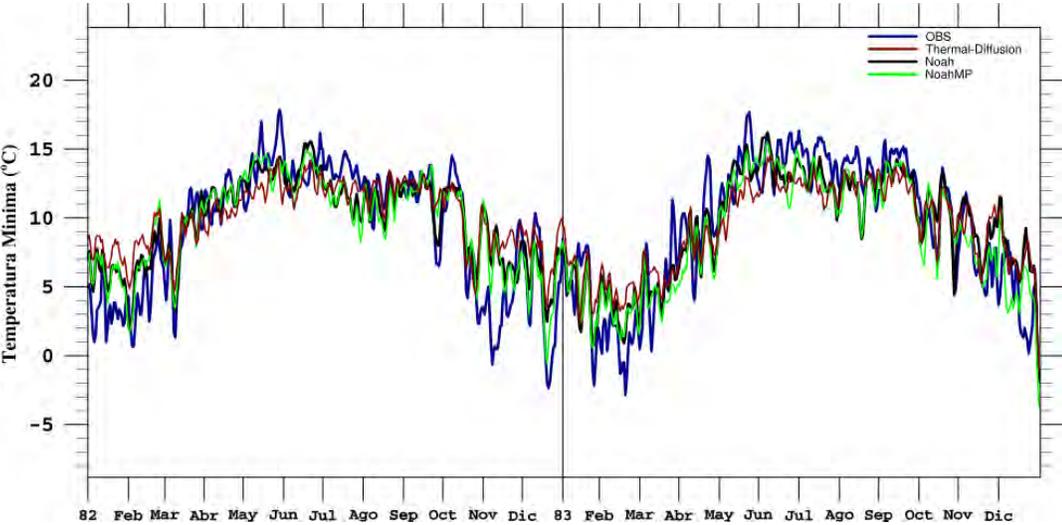


Fig. 4-15: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Colonia Moctezuma, CDMX.

Cinco Señores, Gto.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 4-16: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Cinco Señores, Gto., durante 1982-1983.

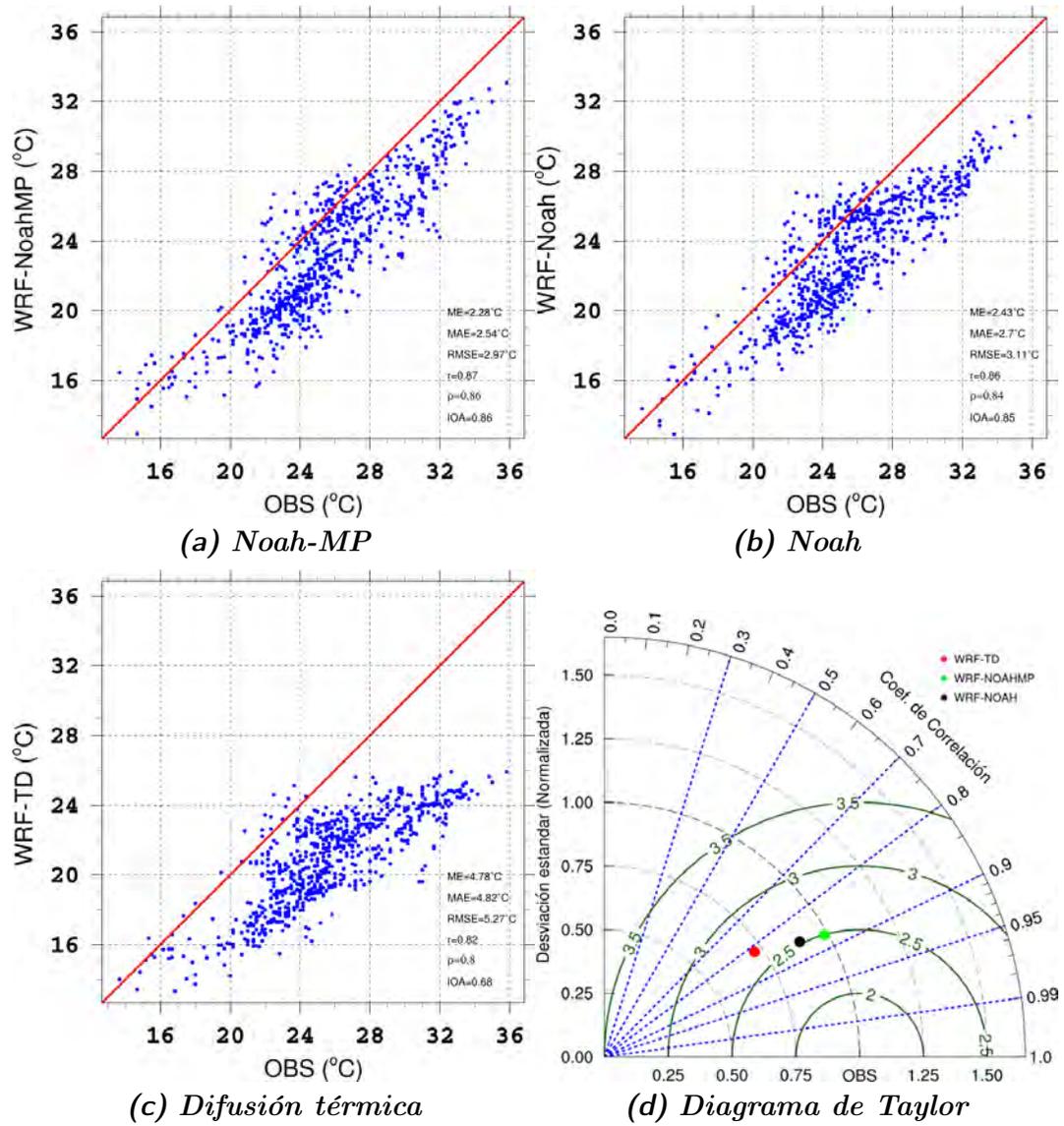


Fig. 4-17: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Cinco Señores, Gto.

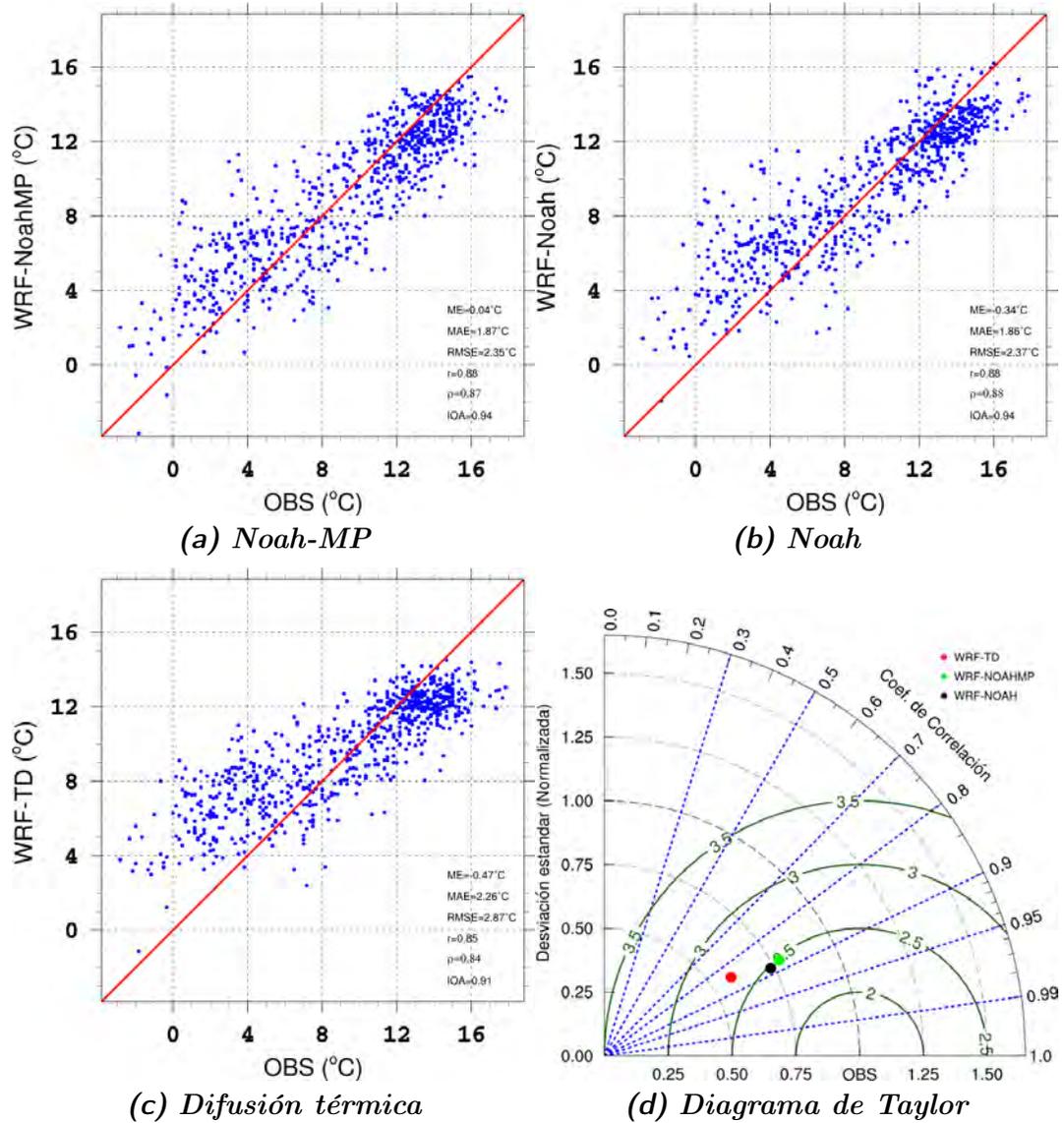
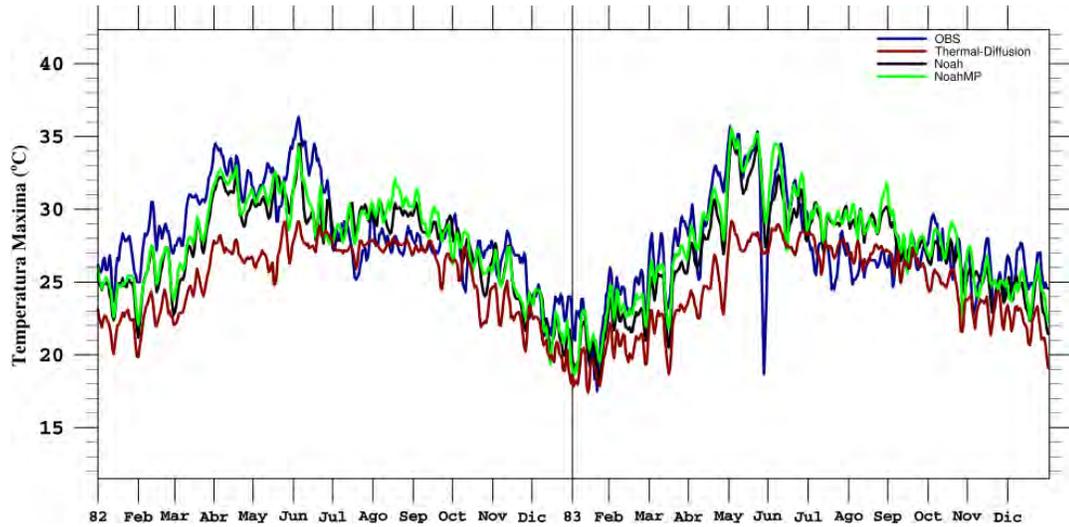
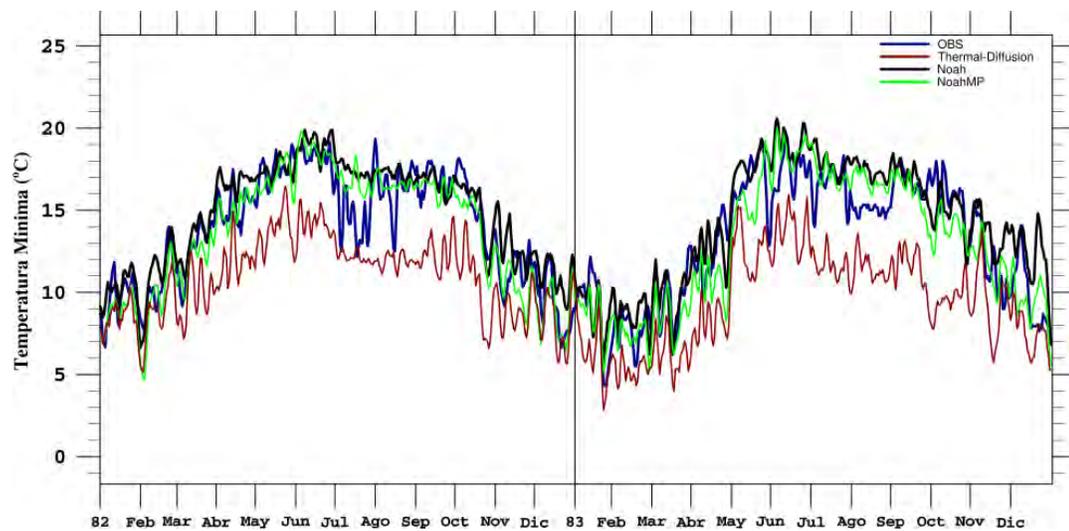


Fig. 4-18: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Cinco Señores, Gto.

Guadalajara, Jal.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

*Fig. 4-19: Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Guadalajara, Jal., durante 1982-1983.*

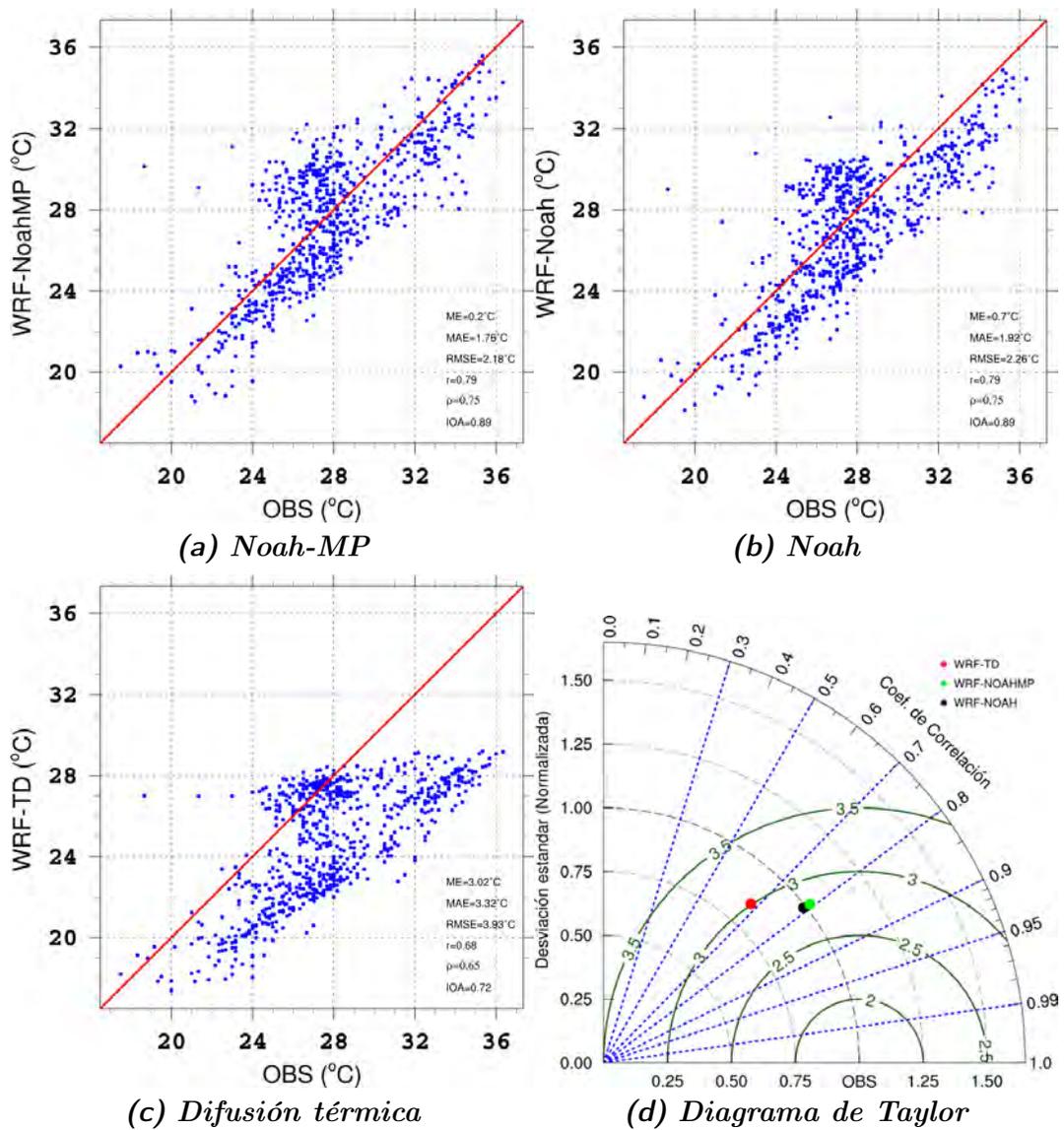


Fig. 4-20: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Guadaluajara, Jal.

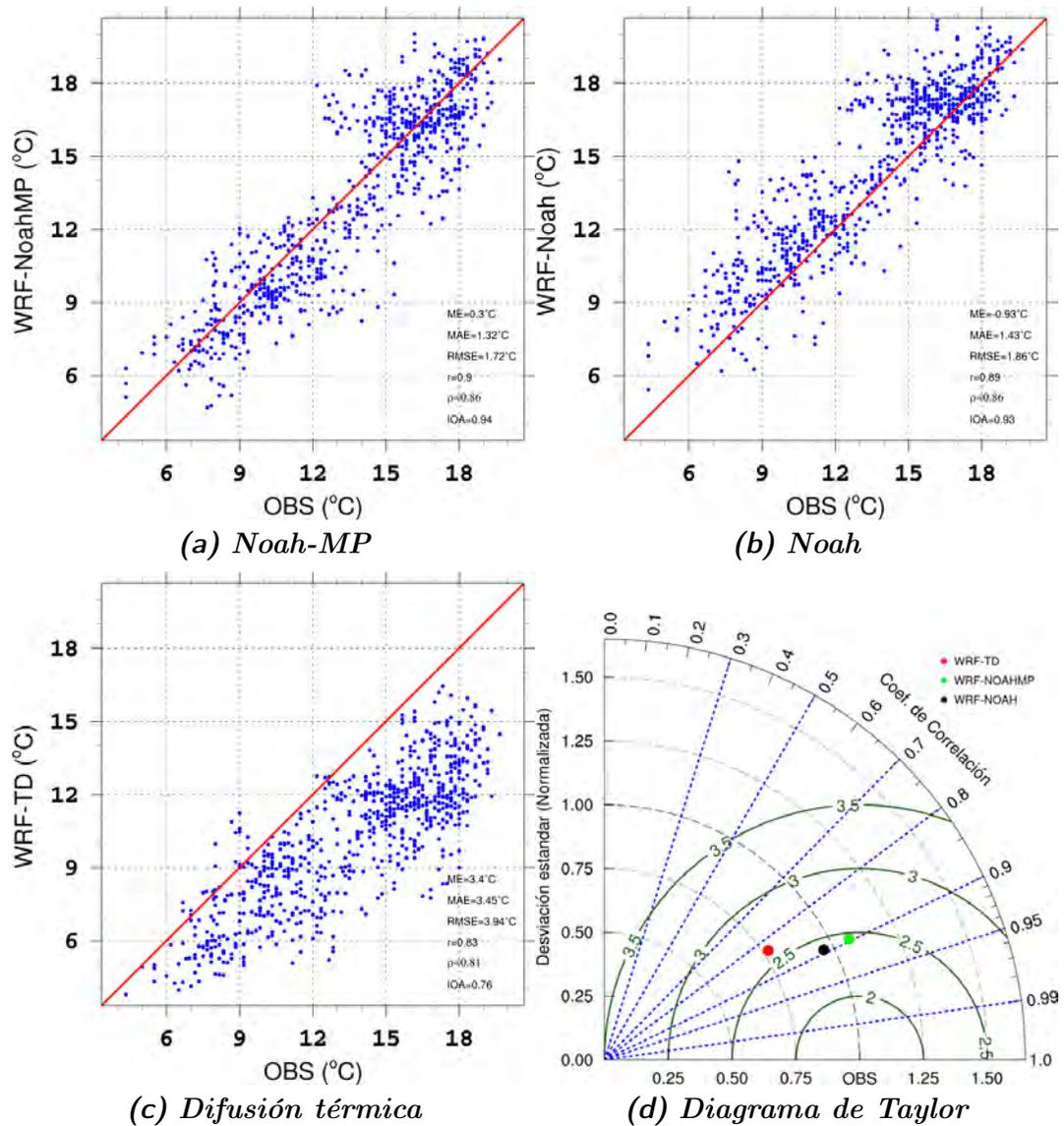
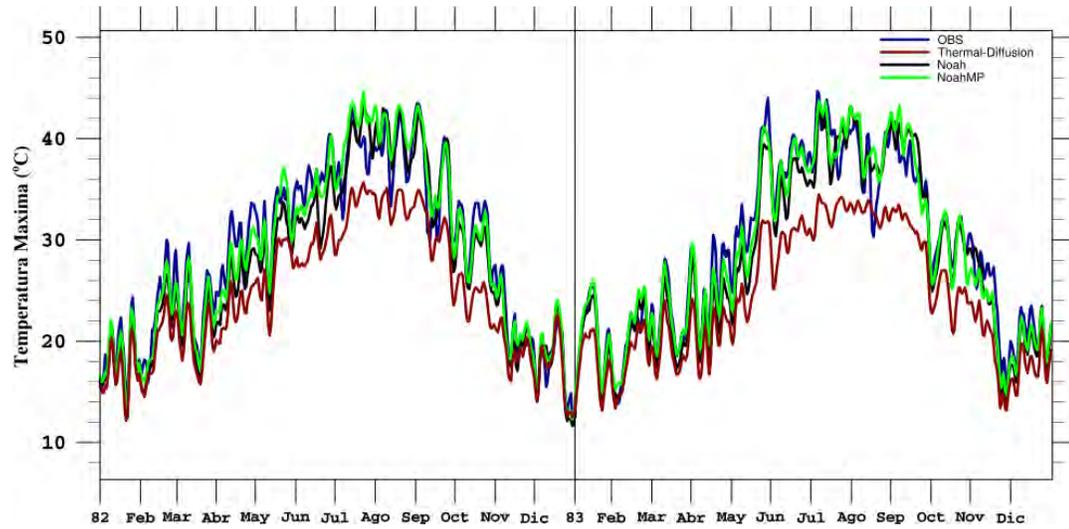
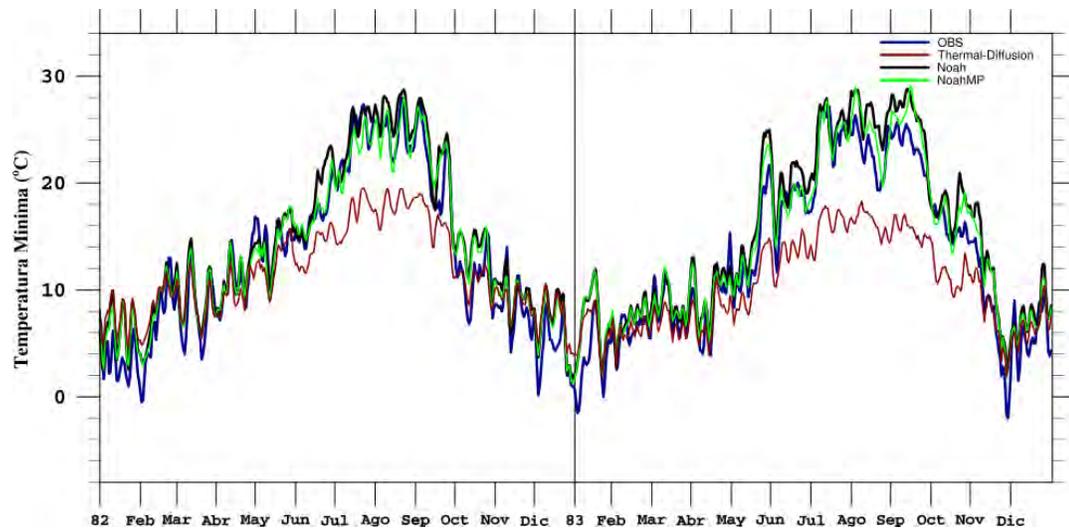


Fig. 4-21: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Guadalajara, Jal.

Sonoyta, Son.

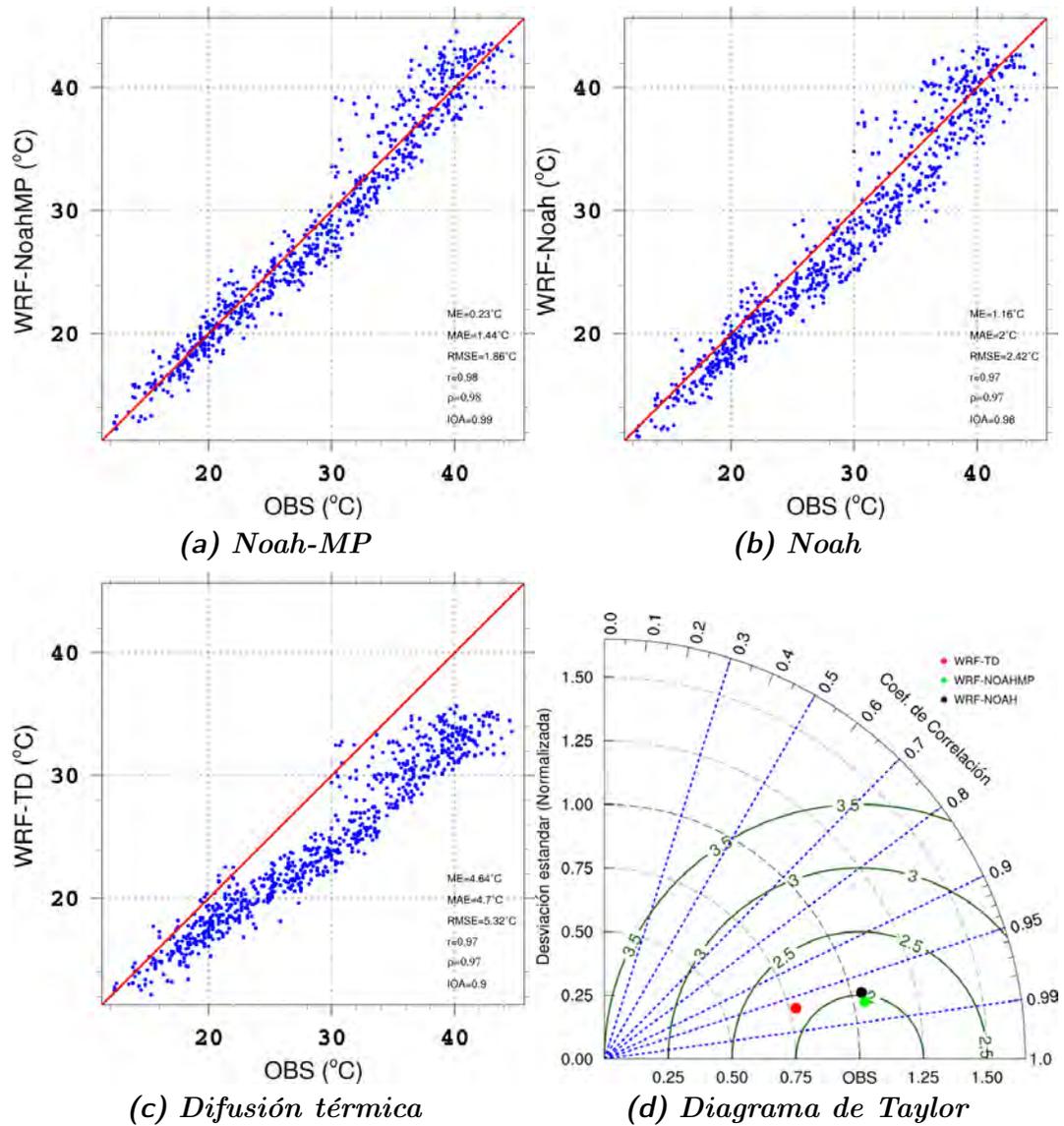


(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 4-22: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Sonoyta, Son., durante 1982-1983.



*Fig. 4-23: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Sonoyta, Son.*

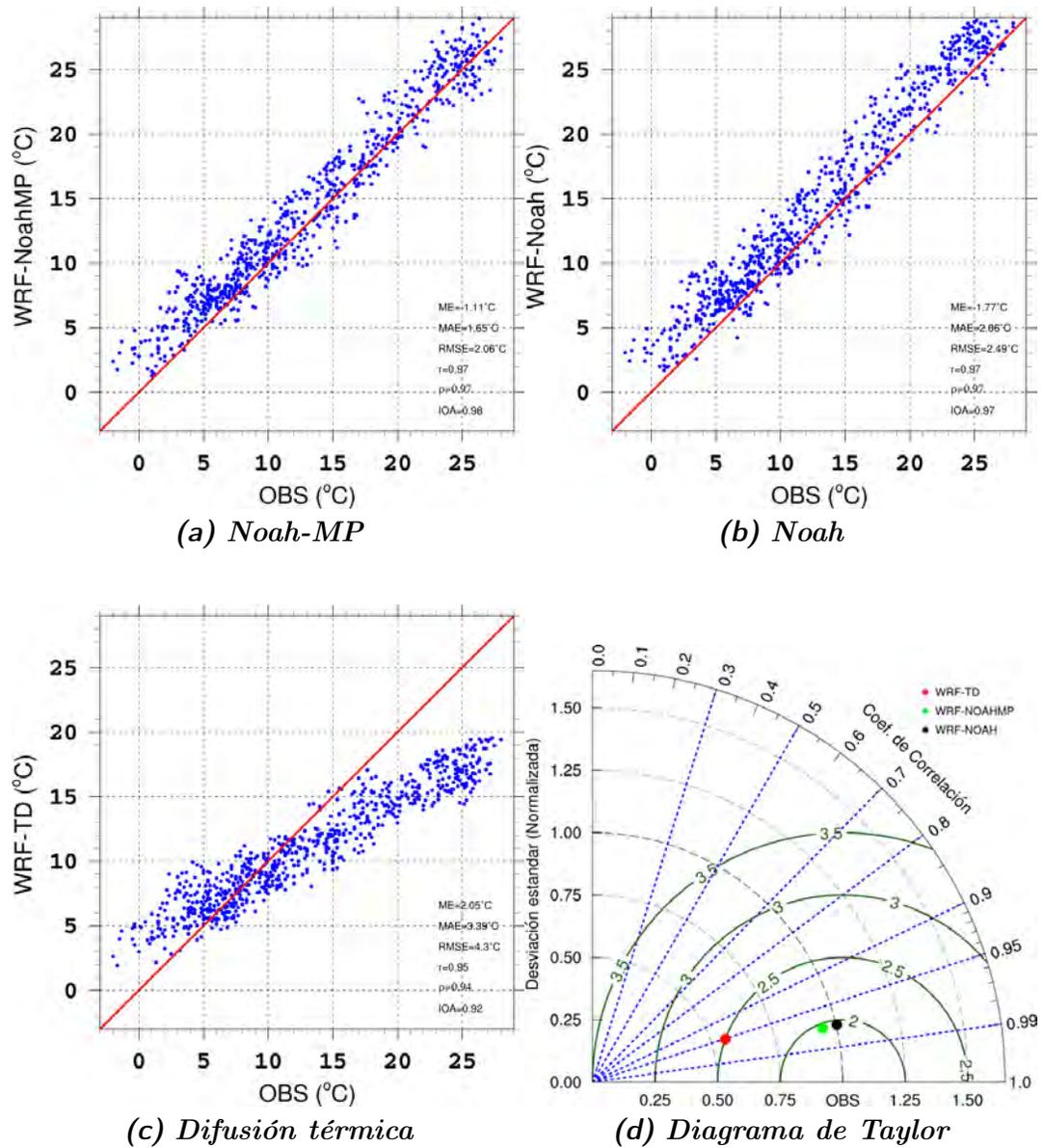


Fig. 4-24: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para  $T_{Min}$  en la estación Sonoyta, Son.

El Tejar, Ver.

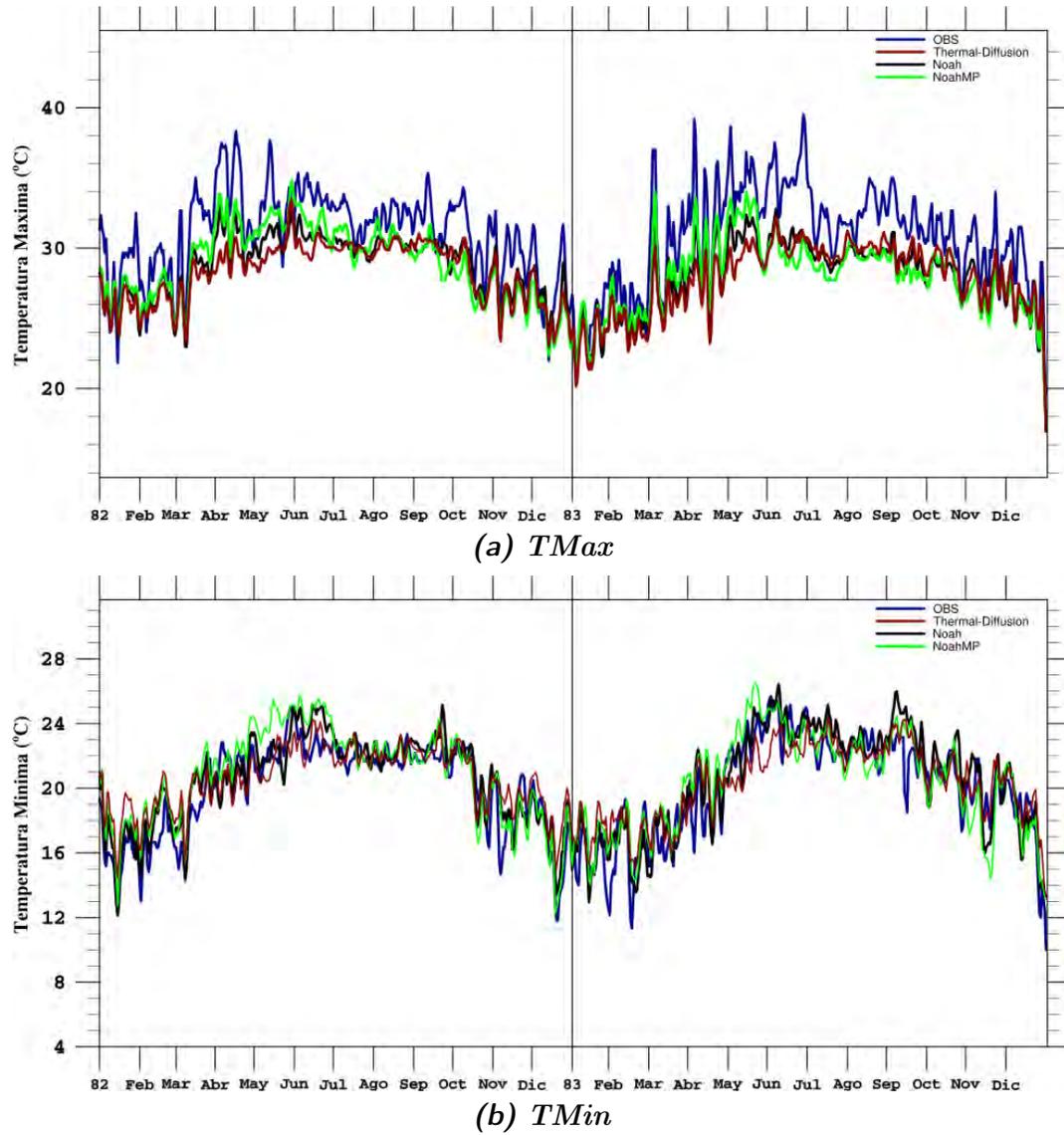


Fig. 4-25: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación El Tejar, Ver., durante 1982-1983.

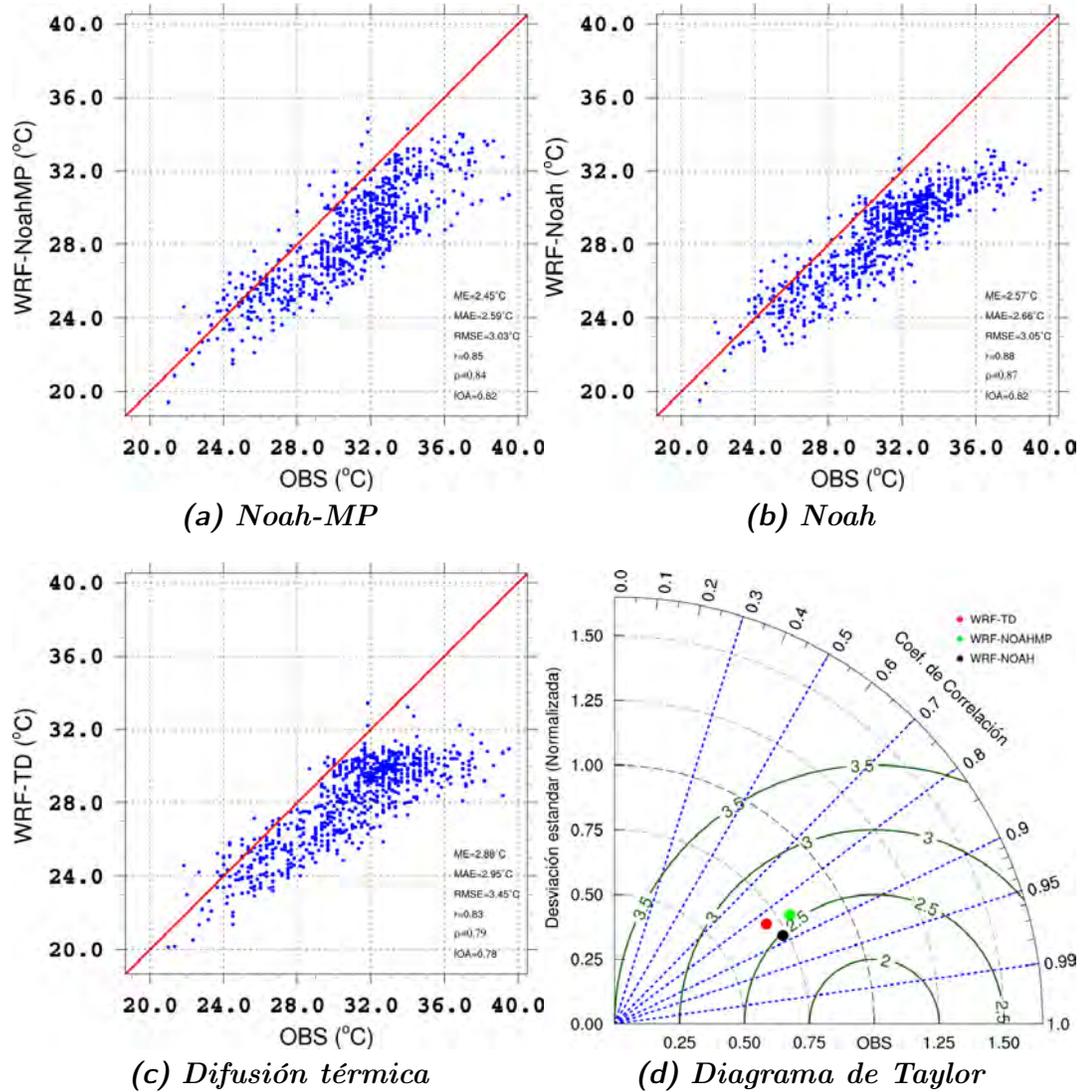


Fig. 4-26: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación El Tejar, Ver.

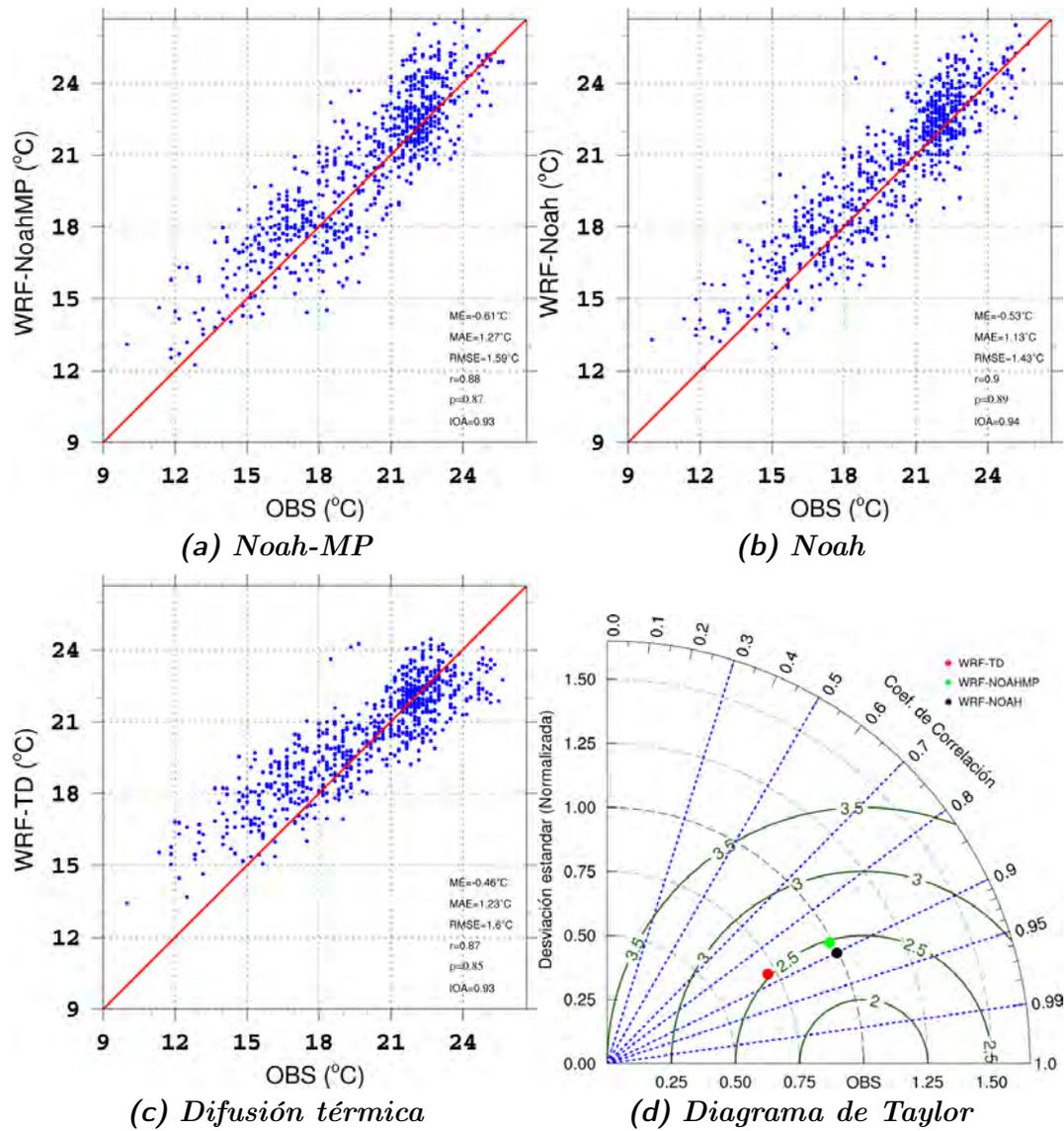


Fig. 4-27: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación El Tejar, Ver.

### 4.3. Análisis general por estados

En esta sección se presenta un análisis general considerando 167 estaciones distribuidas en gran parte del país (Fig. 4-28). El análisis se basa en los valores promedio por estado y en el promedio general para todas las estaciones elegidas, de los distintos estadísticos calculados. El número de estaciones por estado se determinó en dependencia de la disponibilidad de las mismas y de una inspección visual de las series de temperatura. En la Tabla 4-2 se presenta el número de estaciones por estado que se eligieron. Sin embargo, en las gráficas de los estadísticos promedio por estado se consideraron solamente aquéllos que tuvieran al menos 3 estaciones.

Tabla 4-2: Número de estaciones por estado consideradas en el análisis general

Estado	Núm. est.	Estado	Núm. est.	Estado	Núm. est.	Estado	Núm. est.
Ags.	10	Chihuahua	8	Jalisco	10	Sinaloa	4
B.C.S.	14	Coahuila	5	Michoacán	6	Sonora	5
Campeche	5	Durango	9	Nayarit	2	Tabasco	5
CDMX.	2	Guanajuato	5	N.L.	4	Tamaulipas	6
Chiapas	5	Quéretaro	6	Oaxaca	5	Veracruz	9



Fig. 4-28: Posición de 167 estaciones climatológicas elegidas para la evaluación general del desempeño del WRF para reproducir la temperatura superficial en la RM.

Uno de los objetivos del análisis general es tener un criterio que nos permita determinar cuál es el desempeño del modelo WRF para la estimación de  $T_{Max}$  y  $T_{Min}$  y, en su caso, también determinar cómo varía su desempeño según el esquema de  $LSM$  utilizado, y cuál

de los dos tipos de temperatura se representa mejor. Debido a lo anterior, en esta sección se introduce el estadístico conocido como *MAPE*, el cual proporciona una medida de la magnitud absoluta del error en términos porcentuales.

Mediante este análisis se logró obtener para la *TMax* y *TMin* un resumen o promedio general de los estadísticos antes mencionados, generado con las 167 estaciones consideradas e incluyendo los resultados de cada LSM, tal como se muestra en las Tabla 4-2 (*TMin*) y 4-3 (*TMax*).

Tabla 4-3: Promedio de las métricas estadísticas para *TMin* considerando las 167 estaciones seleccionadas y según el esquema de LSM utilizado para el período de 1982-83.

LSM	RMSE (°C)	MAE (°C)	ME (°C)	CP	MAPE (%)
NOAH	2.18	1.75	-0.49	0.87	9.49
NOAH-MP	2.08	1.68	-0.21	0.88	8.59
TD	2.65	2.16	-0.27	0.85	15.46

Tabla 4-4: Promedio de las métricas estadísticas para *TMax* considerando las 167 estaciones seleccionadas y según el esquema de LSM utilizado para el período de 1982-83.

LSM	RMSE (°C)	MAE (°C)	ME (°C)	CP	MAPE (%)
NOAH	2.99	2.55	1.93	0.85	16.98
NOAH-MP	2.78	2.32	1.54	0.86	15.38
TD	4.67	4.16	3.96	0.80	19.76

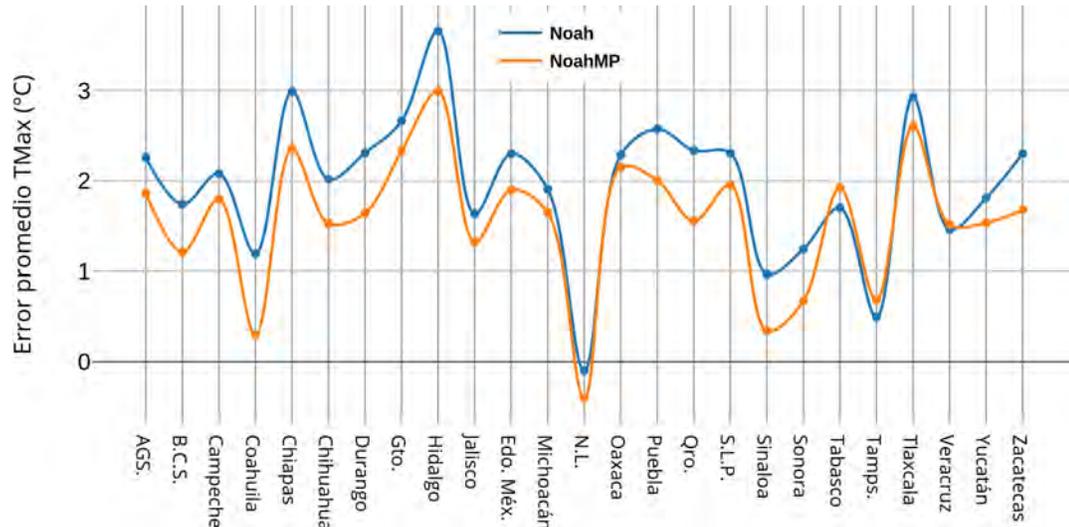
Para *TMin* las diferencias en los valores de los estadísticos son mínimas para el caso de los esquemas *Noah* y *Noah-MP* y un poco mayores para el caso del esquema *TD*, sin embargo, aunque sus resultados son bastante aceptables, es claro que los dos versiones de *Noah-LSM* consideradas son de mejor desempeño. En promedio para todos los sitios elegidos, usando el esquema *Noah-MP* se redujo el *RMSE* obtenido usando *Noah* de 2.18 °C a 2.08 °C, el *ME* de -0.49 °C a -0,21 °C y el *MAE* de 1.75°C a 1.68 °C, con un coeficiente de correlación de 0.87 y 0.88 respectivamente. Considerando los resultados del *MAPE* para *TMin* se podría indicar que el desempeño del esquema *Noah-MP* fue 0.9% mejor que el *Noah* y 6.87% mejor que el *TD*.

Para *TMax* las diferencias en los valores de los estadísticos son más marcadas. En general, con los esquemas *Noah* y *Noah-MP* se obtuvieron mejores comparaciones con los datos observados que con el esquema *TD*, y mejores con *Noah-MP* que con *Noah*. En promedio para todos los sitios elegidos, usando el esquema *Noah-MP* se redujo el *RMSE* obtenido

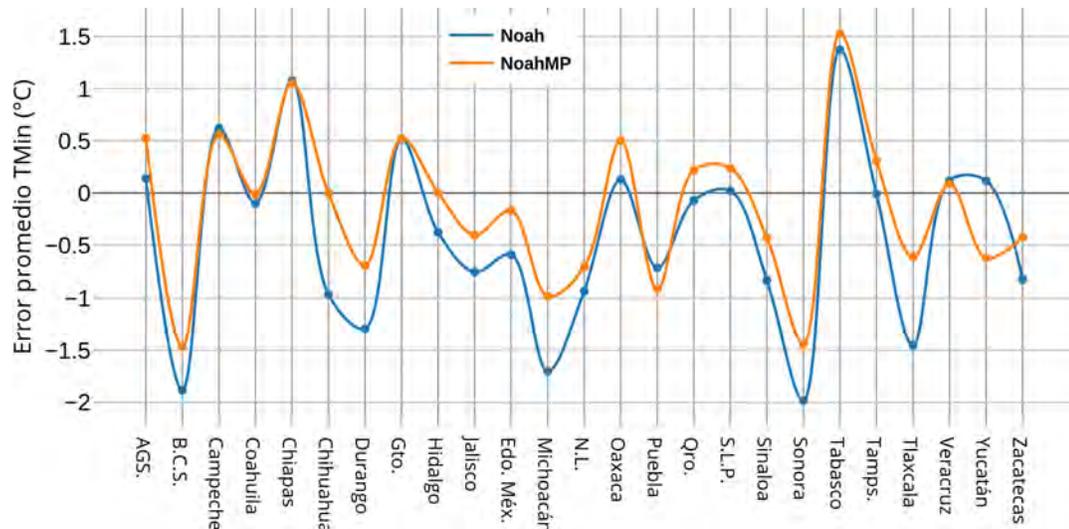
usando *Noah* de 2.99 °C a 2.78 °C, el *ME* de 1.93 °C a 1.54 °C y el *MAE* de 2.55°C a 2.32 °C, con un coeficiente de correlación de 0.86 y 0.85 respectivamente. Igualmente en terminos del *MAPE* para *TMax* se podría indicar que el desempeño del esquema *Noah-MP* es 1.6 % mejor que el *Noah* y 4.38 % mejor que el *TD*.

*ME* (Fig. 4-29), *MAE* (Fig. 4-30), *RMSE* (Fig. 4-31) y del coeficiente de correlación de Pearson (Fig. 4-32), tanto para *TMax* como para *TMin* en el periodo de 1982-83, considerando los tres esquemas de LSM utilizados.

Error promedio (ME)



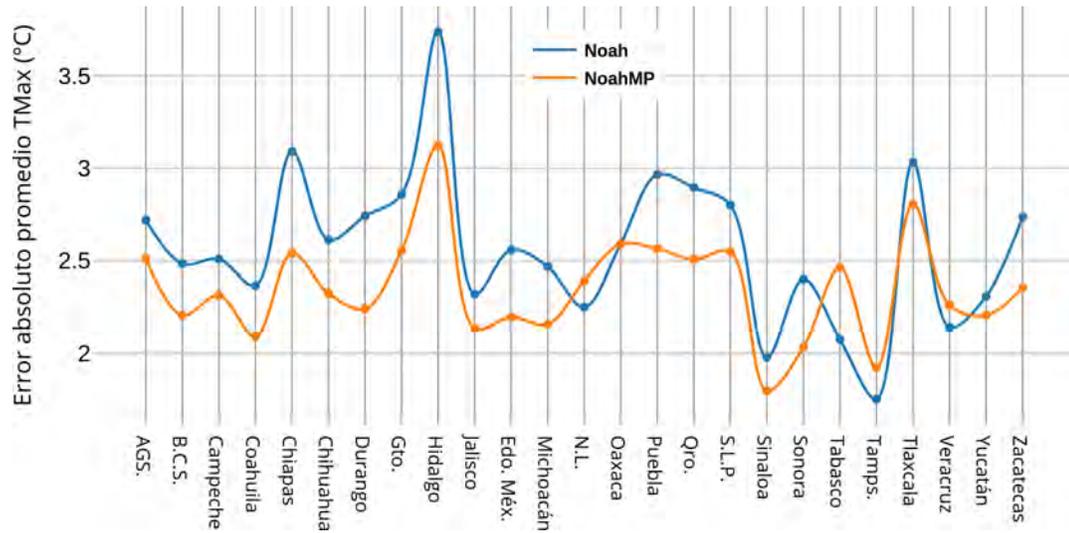
(a) *TMax*



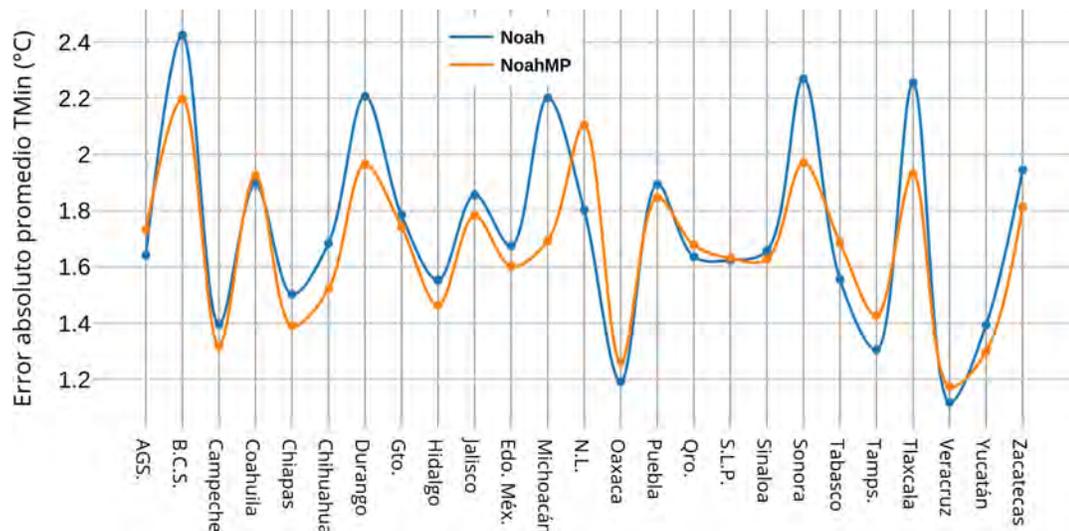
(b) *TMin*

Fig. 4-29: Comparación de los valores promedio por estado del estadístico ME usando los esquemas Noah y Noah-MP para (a) *TMax* y (b) *TMin* en el periodo 1982-83.

Error absoluto promedio (MAE)



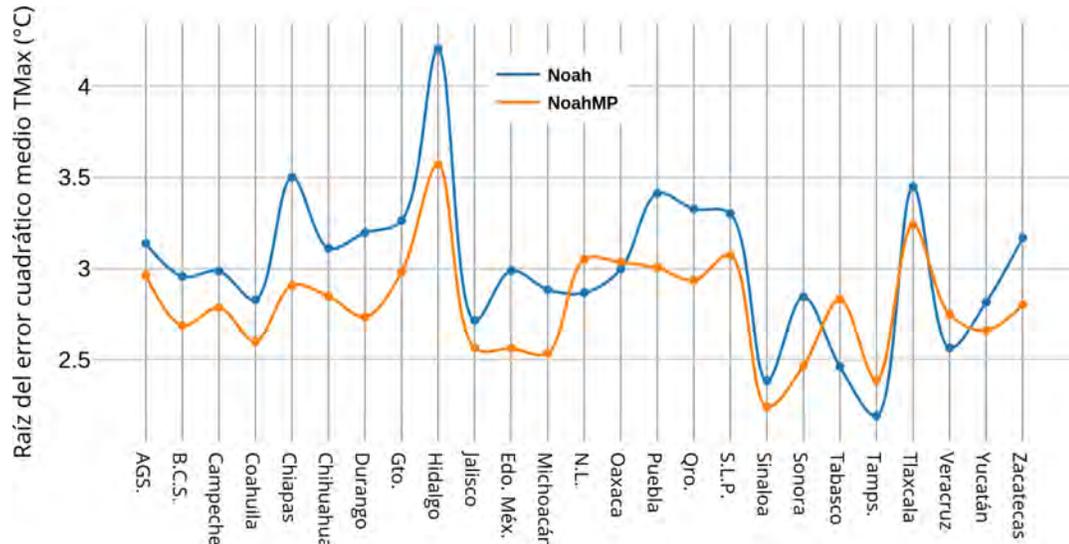
(a) TMax



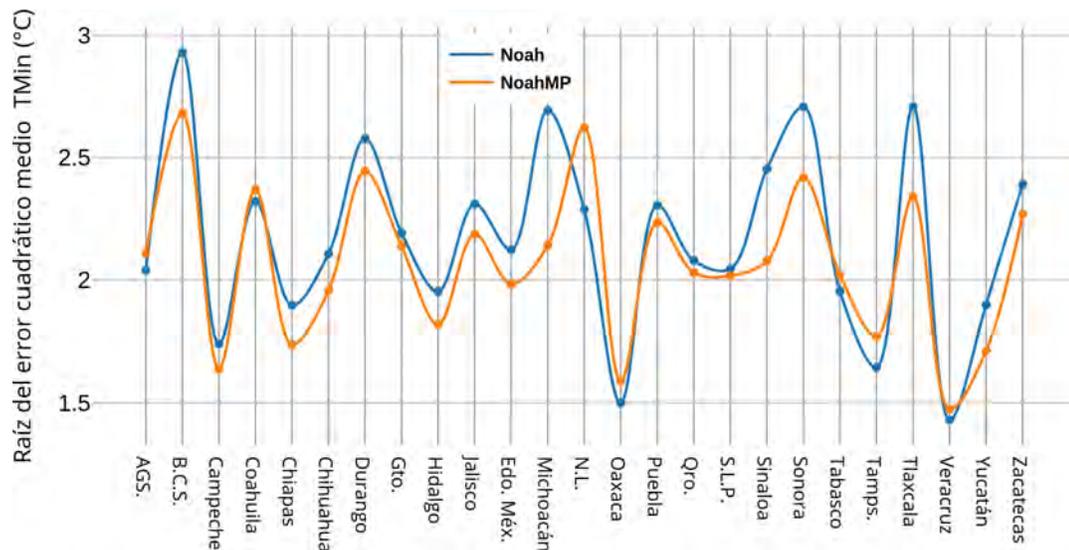
(b) TMin

Fig. 4-30: Comparación de los valores promedio por estado del estadístico MAE usando los esquemas Noah y Noah-MP para (a) TMax y (b) TMin en el periodo 1982-83.

Raíz del error cuadrático medio (RMSE)



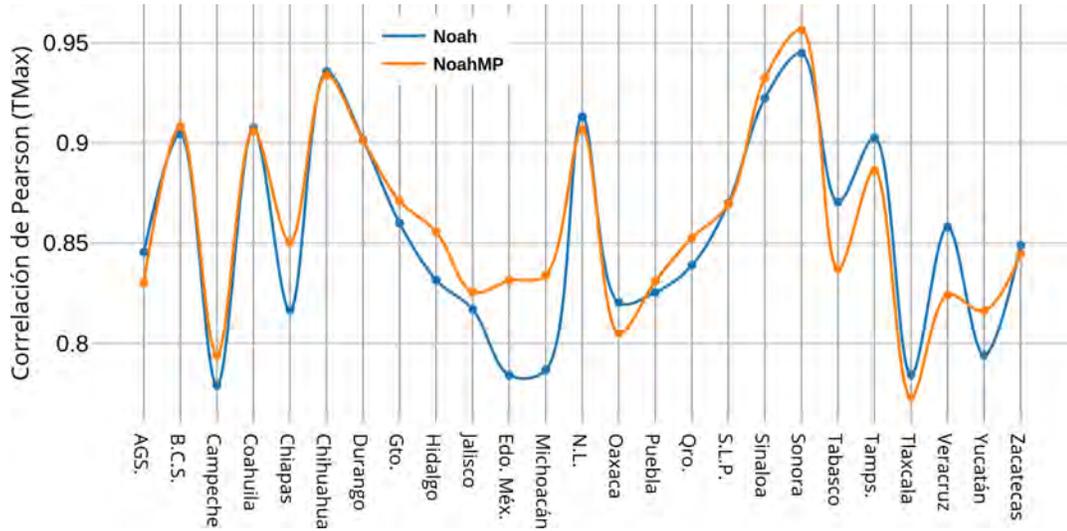
(a) TMax



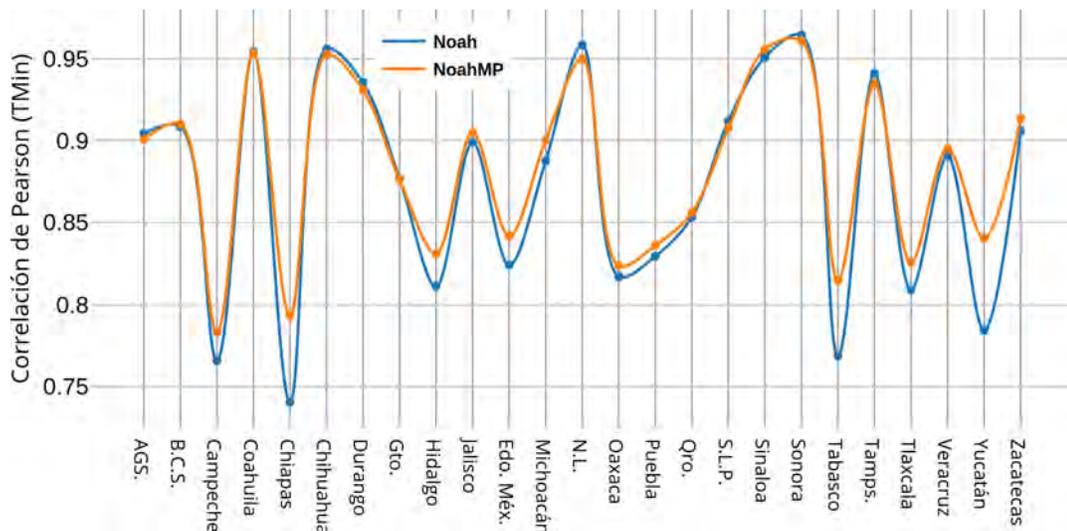
(b) TMin

Fig. 4-31: Comparación de los valores promedio por estado del estadístico RMSE usando los esquemas Noah y Noah-MP para (a) TMax y (b) TMin en el periodo 1982-83.

Correlación de Pearson ( $r$ )



(a)  $TMax$



(b)  $TMin$

Fig. 4-32: Comparación de los valores promedio por estado del coeficiente de correlación  $r$  usando los esquemas Noah y Noah-MP para (a)  $TMax$  y (b)  $TMin$  en el periodo 1982-83.

#### 4.4. Análisis climatológico

En esta sección se presenta un análisis que tuvo como propósito verificar si tanto los datos observados en las estaciones climatológicas como los simulados con el WRF muestran un posible efecto sobre las  $TMax$  y  $TMin$  en la RM relacionado con la erupción del volcán el *Chichonal* y con el evento intenso de *El Niño* de 1982-83. Para ello, se hace un análisis de las series de tiempo de las anomalías estandarizadas de  $TMax$  y  $TMin$  en estaciones ubicadas en distintas regiones del país y un análisis de la información obtenida a partir de dos índices climáticos basados en percentiles.

El *Chichonal* hizo erupción en dos ocasiones, la primera el 28 de marzo y la segunda, más fuerte que la primera, el 4 de abril de 1982. Ambas erupciones causaron una intensa caída de ceniza húmeda en la zona cercana y de ceniza fina a más de  $200km$  de distancia, lo que ocasionó el cierre de carreteras y aeropuertos (Cruz-Reyna et al., 2008). Estos eventos causaron cerca de 2,000 víctimas, el desplazamiento de 20,000 personas, impactos importantes en el uso y cobertura del suelo y daños económicos severos, no sólo en áreas próximas al volcán ( $< 10km$ ) sino también en áreas lejanas alcanzadas por la fuerte caída de ceniza y rocas (Fig. 4-33). En esa época el sistema de protección civil de México no tenía contemplado un plan para el caso de una erupción volcánica, dado que la escala temporal de ocurrencia es larga. Sin embargo, los efectos de la erupción no se limitaron a México. El *Chichón* liberó una cantidad notable de dióxido de azufre y partículas a la atmósfera que rodearon el planeta en pocas semanas. Este material ayudó a calentar la estratosfera alrededor de  $4^{\circ}C$  y enfrió el hemisferio norte entre  $0.4^{\circ}C$  y  $0.6^{\circ}C$ , uno de los casos más significativos de enfriamiento en los últimos siglos. ([www.wired.com/2012/03/looking-back-at-the-1982-eruption-of-el-chichon-in-mexico/](http://www.wired.com/2012/03/looking-back-at-the-1982-eruption-of-el-chichon-in-mexico/))



**Fig. 4-33:** Caída de ceniza en el camino entre Coatzacoalcos y Villahermosa ocasionada por la erupción del *Chichonal*. (Tomada de Cruz-Reyna et al., 2008).

Las erupciones volcánicas son una causa natural de variación climática en diversas escalas de tiempo, y los efectos químicos y radiativos de los aerosoles emitidos producen una respuesta en el sistema climático (Robock, A., 2000). La interacción de los aerosoles con la radiación solar y terrestre es el principal mecanismo por el cual hay una interacción con la atmósfera. Por sus propiedades ópticas, la interacción de los aerosoles con la radiación solar se lleva a cabo mediante el proceso de dispersión, ya que cierta parte de la radiación solar es retrodispersada al espacio, incrementando el albedo planetario. Esta retrodispersión de la radiación solar disminuye la cantidad que alcanza la superficie terrestre lo que resulta en un efecto de enfriamiento. El resto de la radiación solar es dispersada en dirección a la superficie terrestre produciendo un incremento en la radiación difusa que alcanza la superficie. El tiempo de residencia de los aerosoles oscila entre 1 y 3 años, debido a que son transportados alrededor del planeta.

En la Tabla 4-5 se presentan algunos efectos de las grandes erupciones volcánicas, los mecanismos que los generan, así como su momento de inicio y duración.

*Tabla 4-5: Efectos de las grandes erupciones volcánicas sobre el tiempo y el clima. (Adaptada de Robock, 2000)*

<b>Efecto</b>	<b>Mecanismo</b>	<b>Inicio</b>	<b>Duración</b>
Reducción del ciclo diurno	Bloqueo de radiación de onda corta y emisión de radiación de onda larga	Inmediato	1-4 días
Reducción de la precipitación tropical	Bloqueo de radiación de onda corta, reducción en la evaporación	1-3 meses	3-6 meses
Enfriamiento en verano de los trópicos y subtropicos en el H.N.	Bloqueo de radiación de onda corta	1-3 meses	1-2 años
Calentamiento estratosférico	Absorción estratosférica de radiación de onda larga y corta	1-3 meses	1-2 años
Calentamiento invernal de los continentes en el H.N.	Absorción estratosférica de radiación de onda larga y corta, dinámica	Medio año	1 o 2 inviernos
Enfriamiento global	Bloqueo de radiación de onda corta	Inmediato	1-3 años
Enfriamiento global por múltiples erupciones	Bloqueo de radiación de onda corta	Inmediato	10-100 años
Reducción de ozono y aumento de UV	Dilución, química heterogénea en aerosoles	1 día	1-2 años

Para el caso del análisis de las estaciones consideradas en este estudio, es importante tomar en cuenta el efecto de la reducción del ciclo diurno, el cual se debe ver reflejado en los datos de temperatura de esas estaciones ya que la disminución de la radiación de onda corta sobre la superficie afecta el balance de energía durante el día (Auchmann et al., 2013); además, durante la noche y durante el día, se espera un ligero aumento en la radiación neta superficial debido al posible aumento (muy pequeño) en la radiación de onda larga descendente. En conjunto, se espera que esto conduzca a una reducción del ciclo diurno.

El principal parámetro considerado para representar los aerosoles volcánicos en los modelos climáticos es la profundidad óptica de los aerosoles (Aerosols Optical Depth, AOD). La AOD es una cantidad adimensional que indica el peso que poseen las partículas del aerosol para atenuar la radiación en cierta longitud de onda al atravesar un medio material, en este caso la atmósfera. La AOD es independiente de la posición solar y de la concentración de otros componentes atmosféricos como el vapor y el ozono; es apropiada para estudiar los efectos de los aerosoles volcánicos y los intercambios radiativos, y corresponde a la suma de los coeficientes de absorción y dispersión integrados sobre toda la columna de aire.

Existe un conjunto de datos de AOD (Sato et al., 1993), el cual se divide en cuatro periodos de acuerdo al método con que fueron inferidos. El primer periodo (1850-1882) corresponde a los datos que se estimaron considerando sólo el volumen de aerosoles que podrían haber inyectado hacia la atmósfera las grandes erupciones volcánicas y por reportes cualitativos de evidencia volcánica. El segundo periodo (1883-1959) corresponde a mediciones de extinción solar, pero durante el tiempo de la principal actividad volcánica los datos se limitaron a observatorios situados en latitudes medias y en el hemisferio norte. Para el tercer periodo (1960-1978) se tienen mediciones más completas de extinción solar y estelar, eclipses lunares y algunas mediciones en sitio de las propiedades de los aerosoles. Para el cuarto periodo (1979-1993) ya se tienen mediciones más precisas provenientes de los satélites, esta base de datos se sigue actualizando y se tiene información hasta 2016.

En la Fig. 4-34 se muestran datos de AOD correspondientes al promedio global y en los hemisferios norte y sur desde 1850, en donde se observa el efecto de las grandes erupciones volcánicas. En la Fig. 4-35 se presentan datos de AOD correspondientes al periodo 1982-83 para diferentes latitudes, en la cual se observa un incremento posterior a la erupción del *Chichonal* (28 de marzo y 4 de abril de 1982) con un valor máximo de AOD en la latitud más cercana al volcán ( $19.6^{\circ}\text{N}$ ). El efecto más importante en el aumento de AOD varía dependiente de la latitud; para las latitudes inmediatamente superior ( $27.4^{\circ}\text{N}$ ) e inferior ( $11.7^{\circ}\text{N}$ ) a la posición del volcán los efectos se registraron aproximadamente un mes después; para la latitud cercana al ecuador ( $3.9^{\circ}\text{N}$ ) el efecto sobre la AOD se presentó 3 meses después, y para la latitud de  $35.2^{\circ}\text{N}$  el efecto se registró siete meses después de la erupción. Lo anterior nos podría sugerir que el efecto de la erupción sobre la temperatura superficial (a través del incremento de AOD), podría verse reflejado en cualquier estación del país. En el gráfico se observa también que, para el caso de México, el efecto de los aerosoles disminuyó desde el otoño de 1982 hasta mantenerse casi constante el resto de ese año y durante 1983, por lo que se podría inferir que los posibles impactos del evento de *El Niño* en las temperaturas superficiales durante el invierno, no se vieron influenciados por los aerosoles asociados al *Chichonal*.

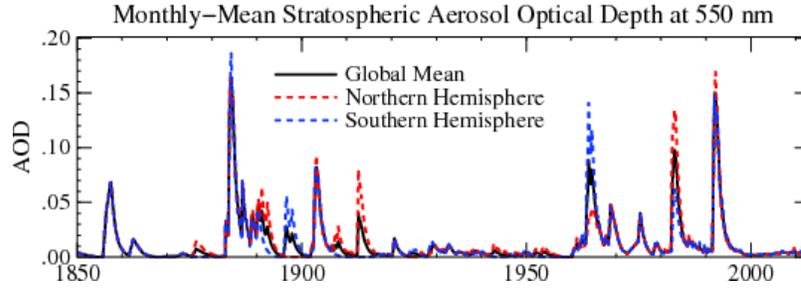


Fig. 4-34: AOD promedio global y para los hemisferios norte y sur.

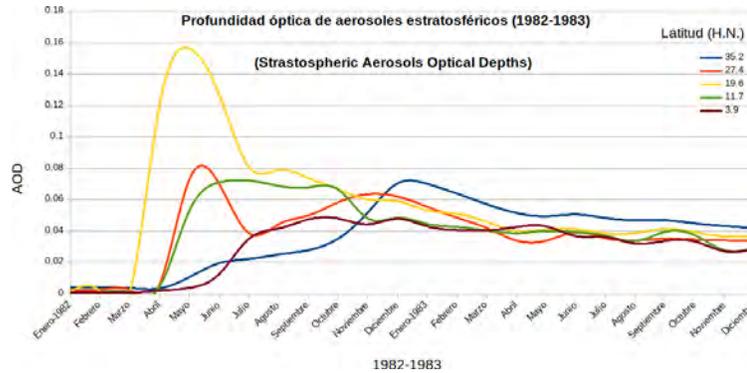


Fig. 4-35: AOD para 1982-83.

#### 4.4.1. Anomalías estandarizadas

Con el propósito de identificar la señal de ambos eventos en las series de tiempo de las temperaturas superficiales, se calcularon sus anomalías estandarizadas, las cuales remueven las características estacionales y específicas del lugar de interés. Las anomalías estandarizadas ( $Z$ ) se calculan restando la media climatológica a cada dato y dividiendo entre la desviación estándar, es decir:

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\bar{\sigma}} \quad (4-1)$$

donde  $X$  es el valor diario observado,  $\bar{X}$  es la media climatológica y  $\bar{\sigma}$  es la desviación estándar climatológica correspondientes al día en cuestión, ambas considerando la década de los 80s. Cabe mencionar que las anomalías estandarizadas son adimensionales, tienen media igual a cero y desviación estándar igual a uno, lo que nos permite comparar diferentes variables de una manera más sencilla.

A continuación se presentan las series de tiempo de las anomalías estandarizadas para

$TM_{max}$  y  $TM_{min}$  durante 1982-1983 obtenidas a partir de las observaciones y de las salidas del modelo WRF usando los tres esquemas de LSM. Se presentan solamente los gráficos correspondientes a las estaciones de Presa Potrerillos, Ags. (Fig. 4-36), Colonia Moctezuma, CDMX (Fig. 4-37), Cinco Señores, Gto. (Fig. 4-38), Guadalajara, Jal. (Fig. 4-39), Sonoyta, Son. (Fig. 4-40) y El Tejar, Ver. (Fig. 4-41). El resto de los gráficos se pueden consultar en el Anexo.

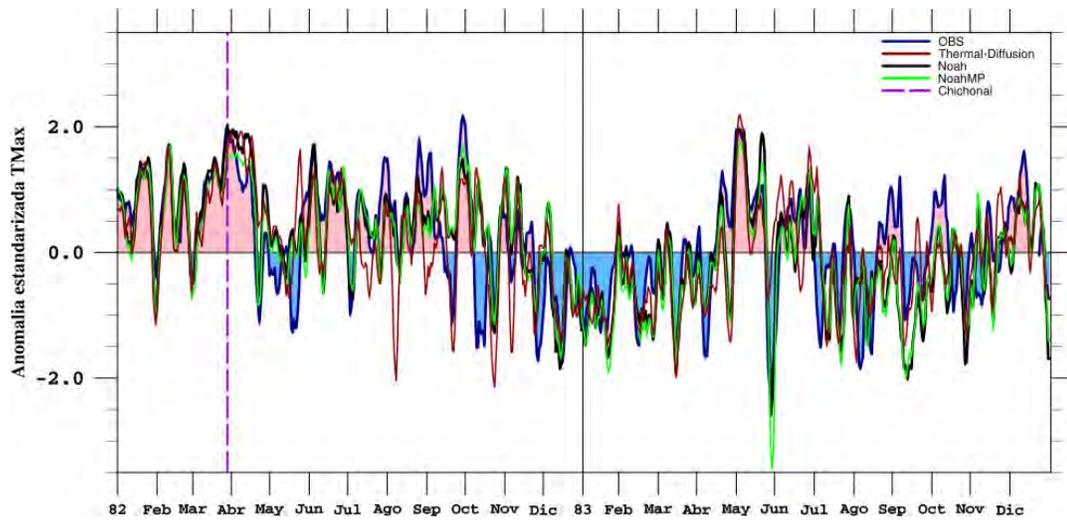
En las series de tiempo de las anomalías estandarizadas de  $TM_{max}$ , tanto de los datos observados como de los simulados, se observan valores negativos algunos días después de la segunda y más grande erupción del volcán, abarcando de mediados de abril a mediados o fines de mayo, en un buen número de las estaciones analizadas. Este período de anomalías negativas se observa principalmente, y de forma más clara, en estados del centro y oriente del país, como Aguascalientes, CDMX, Guanajuato, Hidalgo, Edo. de México, Puebla, Querétaro, Zacatecas, San Luis Potosí, Tlaxcala y Veracruz. Esta señal también es evidente en algunas estaciones del occidente, norte y noreste del país, por ejemplo en estados como Jalisco, Michoacán, Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, y es menos clara en estaciones del sureste aunque habría que mencionar que, en general, los datos de tales estaciones tienen deficiencias, como datos faltantes y variaciones pronunciadas de un día a otro. Desafortunadamente las estaciones del estado de Chiapas también muestran datos deficientes, aunque en algunas de ellas se aprecian también anomalías negativas de  $TM_{max}$  entre finales de abril y finales de mayo.

Con respecto a las anomalías estandarizadas de  $TM_{min}$ , no se observa una señal clara que pudiera vincularse directamente con la erupción volcánica; sin embargo, en buena parte de las estaciones analizadas se presentaron anomalías positivas que abarcan desde enero o marzo hasta mayo o meses posteriores, período que incluye las fechas de ocurrencia de las erupciones. Esto indicaría, en conjunto con las anomalías negativas de la  $TM_{max}$ , una reducción en la amplitud del ciclo diario de la temperatura en gran parte del territorio. Cabe mencionar que, por el contrario, unas cuantas estaciones muestran un comportamiento de la  $TM_{min}$  similar al de la  $TM_{max}$ , es decir, con anomalías negativas entre abril y mayo.

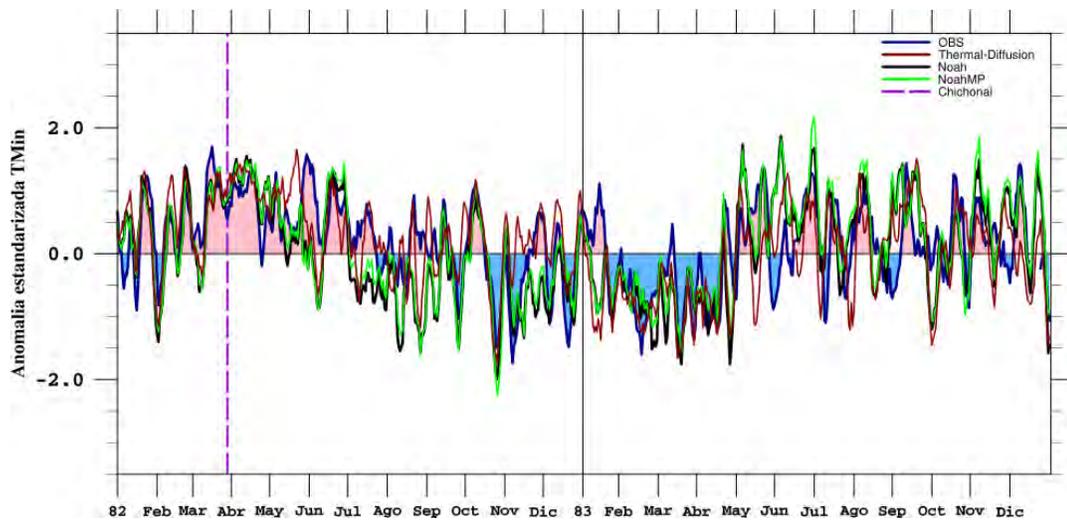
Generalmente, las series de anomalías estandarizadas de  $TM_{max}$  durante el invierno de 1982-1983 muestran valores negativos desde el último tercio de 1982 hasta marzo-abril de 1983 en amplias regiones del país, principalmente en estados del centro, norte y occidente. Esta característica estaría indicando el favorecimiento de un ambiente más frío de lo normal en la RM, asociado posiblemente con el fenómeno de *El Niño* durante su etapa de mayor intensidad. En general, la  $TM_{min}$  también mostró anomalías negativas durante este período, principalmente hacia finales de 1982 y durante los primeros meses de 1983. Varias de las estaciones analizadas, principalmente del centro del país, muestran un período con anomalías

positivas de  $TMin$  entre diciembre de 1982 y enero de 1983, el cual habría que analizar con más cuidado para conocer sus posibles causas.

### Presa Potrerillos.



(a)  $TMax$



(b)  $TMin$

*Fig. 4-36: Comparación de las anomalías estandarizadas para (a)  $TMax$  y (b)  $TMin$  en la estación de Presa Potrerillos, Ags., durante 1982-83.*

Colonia Moctezuma.

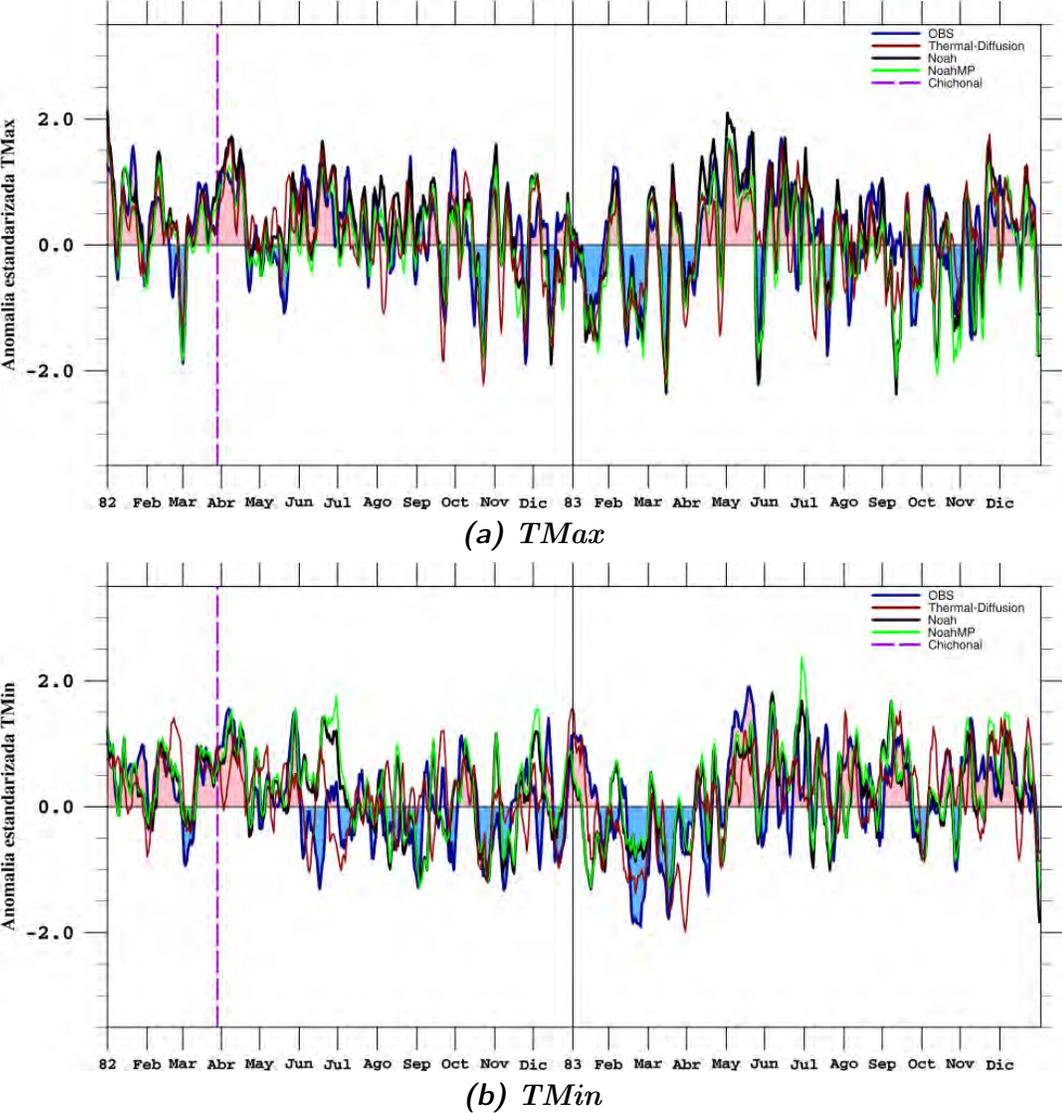


Fig. 4-37: Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación Colonia Moctezuma, CDMX, durante 1982-83.

Cinco Señores, Gto.

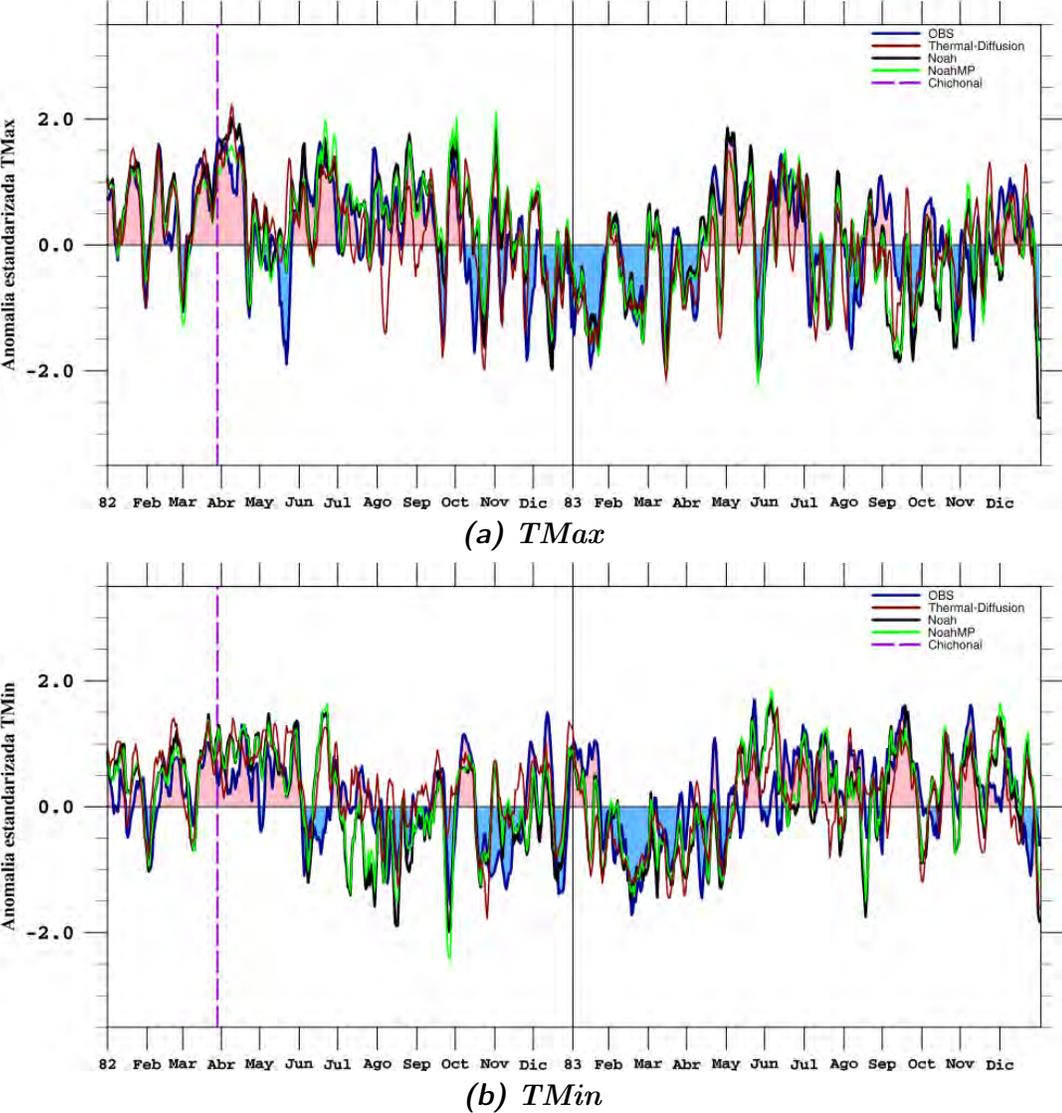


Fig. 4-38: Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) *TMax* y (b) *TMin* en la estación Cinco Señores, Gto., durante 1982-83.

Guadalajara, Jal.

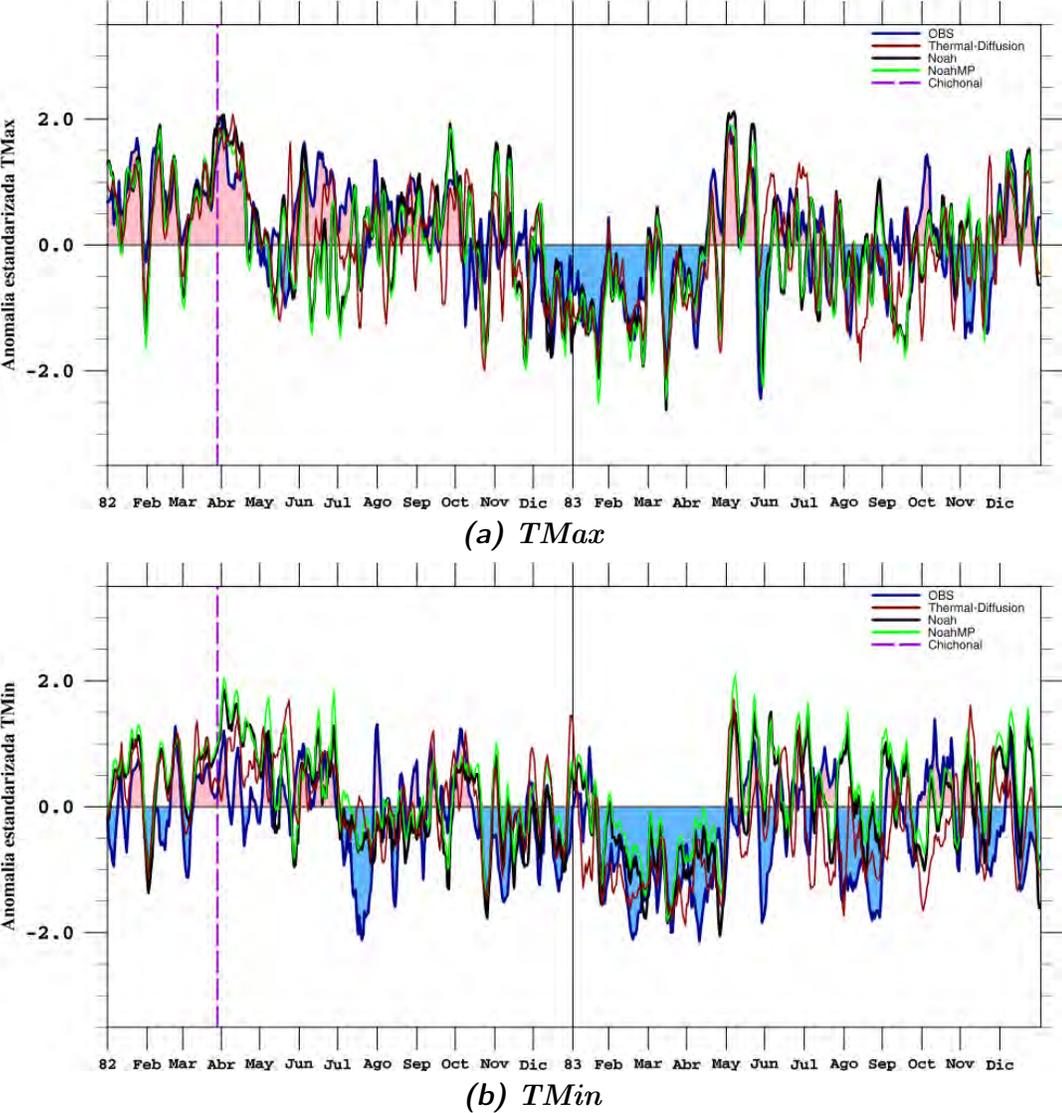
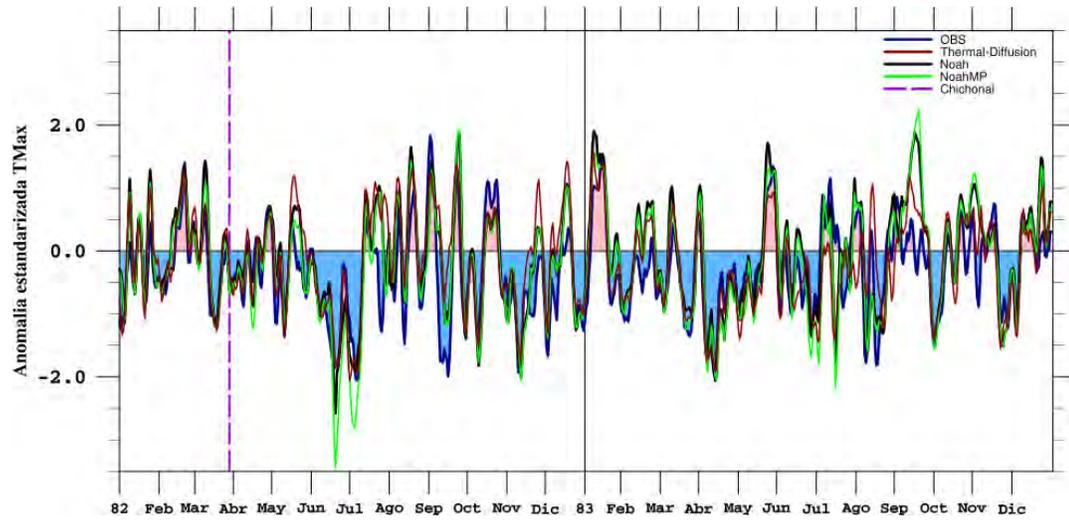
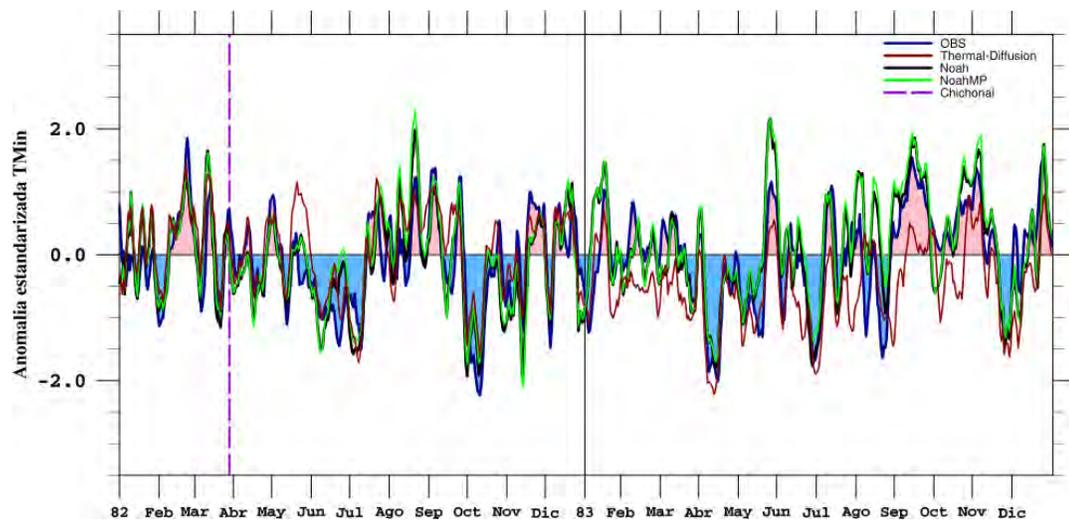


Fig. 4-39: Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) TMax y (b) TMin en la estación Guadalajara, Jal., durante 1982-83.

Sonoyta.



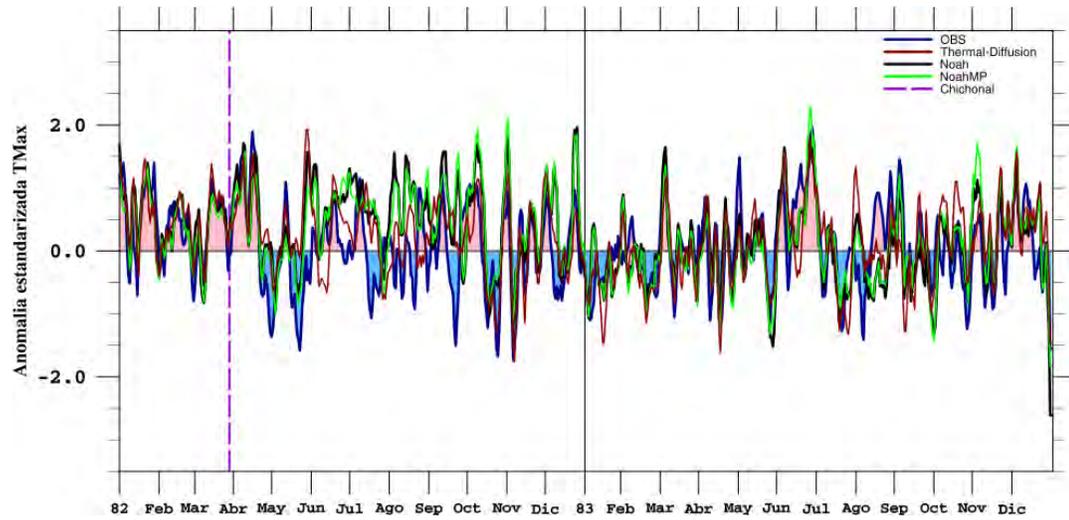
(a) *TMax*



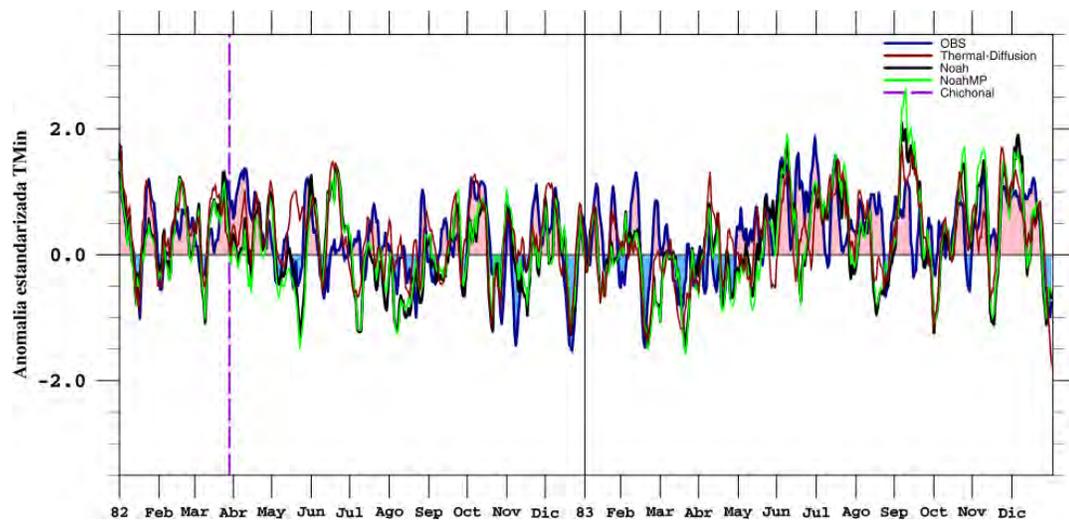
(b) *TMin*

Fig. 4-40: Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) *TMax* y (b) *TMin* en la estación Sonoyta, Son., durante 1982-83.

El Tejar.



(a) *TMax*



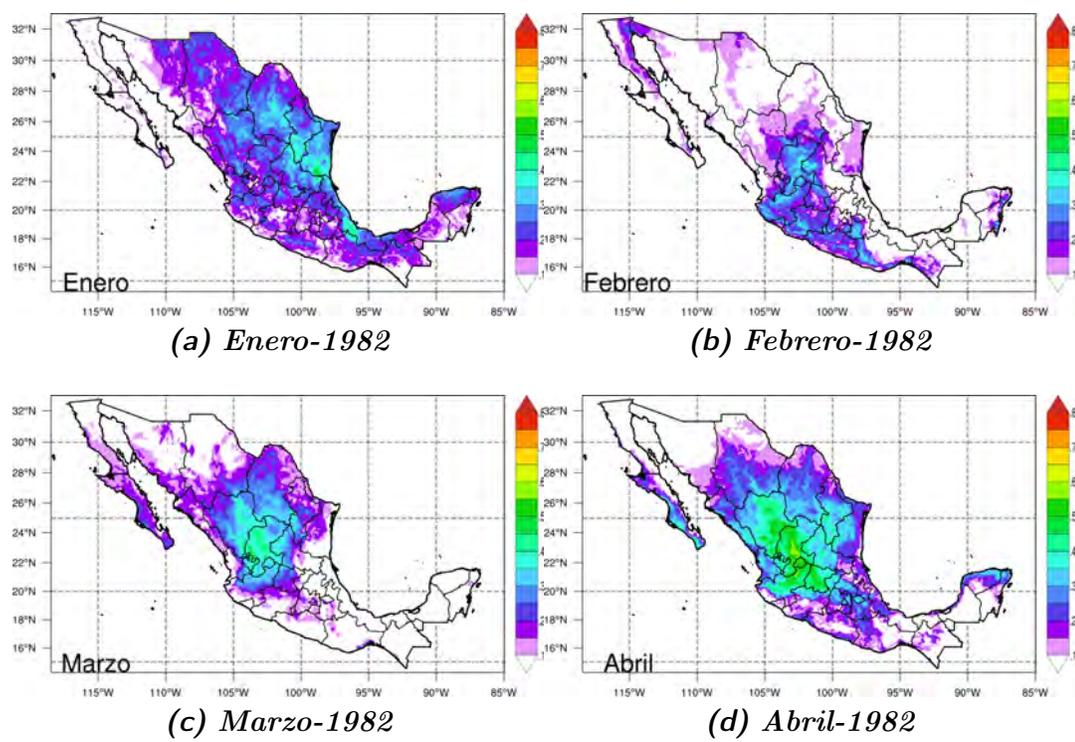
(b) *TMin*

Fig. 4-41: Comparación de las anomalías estandarizadas para (a) *TMax* y (b) *TMin* en la estación *El Tejar*, Ver., durante 1982-83.

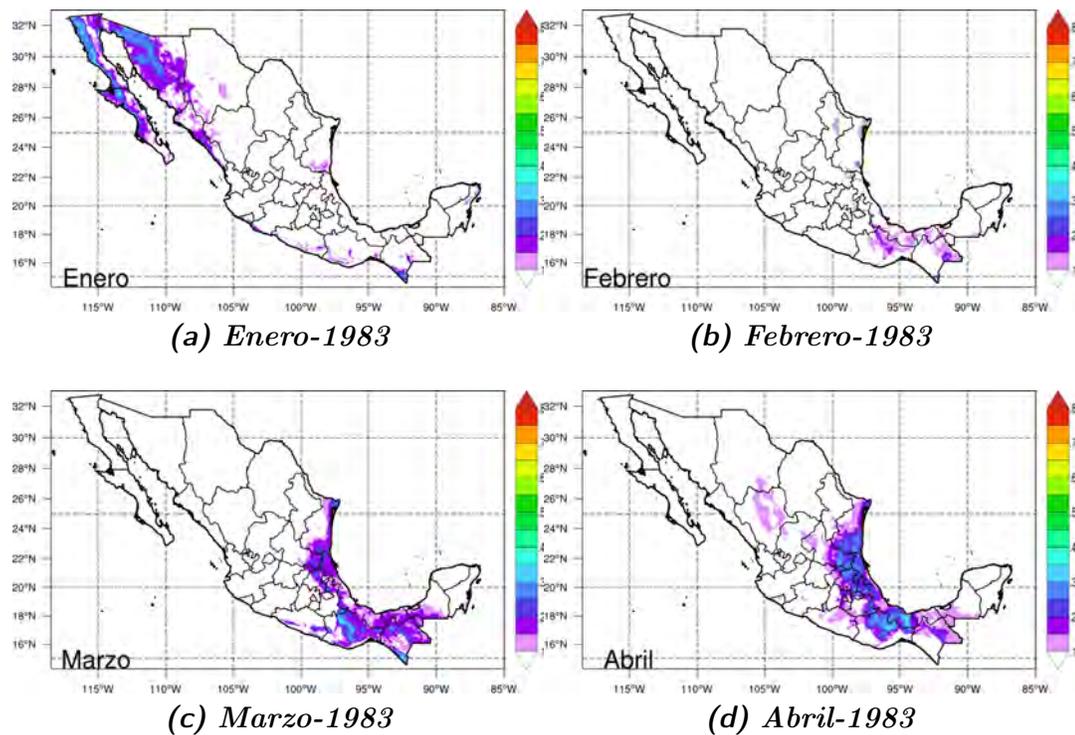
#### 4.4.2. Índices climáticos

Para analizar los posibles efectos del evento intenso de *El Niño* de 1982-83 sobre la temperatura superficial en la RM, se calcularon los percentiles 90 y 10 para *TMax* y *TMin*, respectivamente, a partir de las simulaciones con el modelo WRF para la década de los 80s. Con esa información se obtuvieron los índices climáticos TN10p y TX90p, por mes, para determinar el porcentaje de días en un mes específico cuya *TMin* estuvo por debajo del percentil 10 y el porcentaje de días cuya *TMax* estuvo por arriba del percentil 90, respectivamente. Dichos índices se calcularon para el período 1980-1983. En esta sección se presentan algunos resultados y el resto de los mapas se puede consultar en la sección de Anexos, incluyendo los mapas mensuales de los percentiles mencionados.

Se puede observar en los mapas del índice TX90p para los meses de Enero a Abril de 1982 (Fig. 4-42) que el porcentaje de días que rebasaron el percentil 90 para *TMax* fue mayor en comparación con los valores obtenidos para los mismos meses de 1983 (Fig. 4-43). En 1982 se observan valores altos del índice TX90p, de hasta 50 a 60 %, especialmente en los estados de Durango, Zacatecas, Jalisco, Aguascalientes y Guanajuato durante Marzo y Abril. En 1983 los mapas muestran porcentajes menores al 10 % en gran parte del país y sólo algunas regiones del noroeste, oriente y sur con valores máximos de entre 30 y 40 %, es decir, se observa una notable disminución en la ocurrencia de días cálidos en los primeros meses de 1983 en comparación con los de 1982. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la sección anterior al analizar las anomalías estandarizadas.

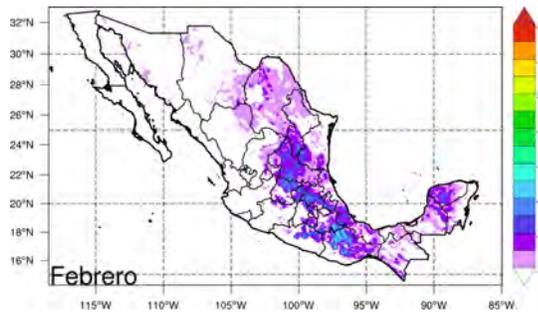


*Fig. 4-42: Mapas del índice TX90p para los meses de Enero a Abril de 1982.*

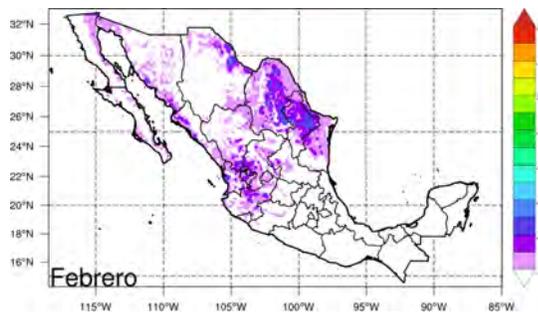


**Fig. 4-43: Mapas del índice TX90p para los meses de Enero a Abril de 1983.**

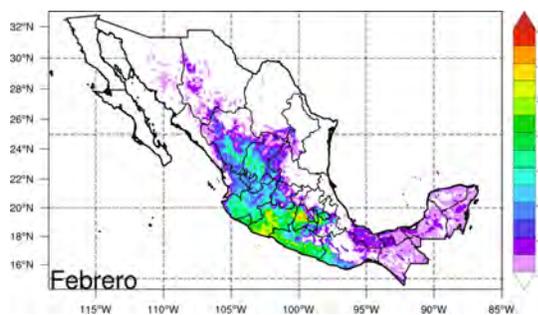
Comparando los valores del índice TN10p durante los inviernos de 1980-81 y 1982-83, se observa particularmente una gran diferencia entre los meses de febrero de 1981 y 1982 con respecto a febrero de 1983 (Fig. 4-44), ya que durante el primero se aprecian sólo algunas regiones en los estados del centro, sur y oriente del país con valores entre el 30% y 40%, igualmente en el segundo valores con rango similar pero en el norte, noreste y occidente del país, mientras que para febrero de 1983 hay estados del centro y occidente del país que rebasaron el 70% de días con  $TMin$  por debajo del percentil 10. Esto podría sugerir un invierno más severo para estas regiones durante el evento de *El Niño* de 1982-83. Estos resultados, junto con los de la sección anterior, sugieren que hubo un efecto directo en las  $TMax$  y  $TMin$  en la RM asociado a la ocurrencia de este fenómeno.



(a) *Febrero de 1981*



(b) *Febrero de 1982*



(c) *Febrero de 1983*

*Fig. 4-44: Mapas del índice TN10p para los meses de (a) febrero de 1981, (b) febrero de 1982 y (c) febrero de 1983.*

---

### Conclusiones

---

En general, se pudo observar un mejor desempeño del modelo WRF para representar las variaciones de la  $TMin$  que las de  $TMax$  en México, aunque en ambos casos se aprecian diferencias espaciales y de un mes a otro al analizar los valores de los estadísticos calculados. En términos climatológicos, el modelo subestima la  $TMin$  hacia el noroeste y parte del norte del país, especialmente en Baja California durante los meses de junio a octubre, así como en Sonora, Durango, Chihuahua y parte de Sinaloa durante los meses de noviembre a febrero. Por otra parte, el modelo subestima las  $TMax$  en gran parte del país durante los meses de noviembre a mayo, mientras que de junio a octubre las sobrestima, principalmente hacia la mitad occidental del país. Sin embargo, los valores obtenidos para los distintos estadísticos calculados para evaluar el desempeño del modelo se encuentran dentro de rangos razonables, con excepción de un bajo porcentaje de puntos en ciertas regiones del país. En este sentido, habría que señalar que el análisis del desempeño del modelo se ve bastante afectado por la baja densidad de datos observados en algunas zonas de la RM, ya que en dichas zonas el producto que se utiliza para realizar las comparaciones con las salidas del modelo es poco confiable.

En cuanto al desempeño de los distintos esquemas de LSM utilizados en las corridas del WRF, se observa que los tres esquemas presentaron resultados bastante aceptables al comparar las simulaciones de la  $TMin$  con los datos observados en sitios específicos. coeficiente de correlación  $r > 0.866$ ,  $RMSE \sim 2.3$  °C,  $ME \sim -0.32$  °C y  $MAE \sim 1.86$  °C.

Con respecto a las simulaciones de la  $TMax$ , las diferencias son más marcadas que para la  $TMin$  al compararlas con las observaciones puntuales de las estaciones seleccionadas. En general, usando los esquemas Noah y Noah-MP se obtuvieron mejores comparaciones con las observaciones que con el esquema TD, y mejores con el Noah-MP que con el Noah. Para la  $TMax$ , en promedio para todos los sitios elegidos, los estadísticos obtenidos al usar el esquema Noah-MP se redujeron con respecto a los obtenidos con el esquema Noah de la siguiente manera: el RMSE se redujo de 2.99 a 2.78 °C, el ME de 1.93 a 1.54 °C y el MAE de 2.55 a 2.32 °C, con un coeficiente de correlación promedio de 0.86 y 0.85 respectivamente.

La comparación entre las series de tiempo de las anomalías estandarizadas para  $TMax$  y  $TMin$  obtenidas a partir de los datos observados y de los datos simulados para el período de 1982-1983 mostró, de manera notable, que el modelo WRF con los esquemas *Noah* y *Noah-MP* simula bastante bien las variaciones de la temperatura superficial, dada la

ocurrencia de dos eventos que tuvieron un impacto muy importante sobre el clima y el estado del tiempo durante ese período: la erupción del volcán *El Chichonal* a finales de marzo y principios de abril de 1982 y la ocurrencia de un evento intenso de *El Niño* durante el invierno de 1982-83.

En un buen número de las estaciones analizadas se presentaron anomalías negativas de *TMax* de mediados de abril a mediados o finales de mayo de 1982, principalmente en estados del centro y oriente del país aunque también en estaciones ubicadas al occidente, norte y noreste del territorio. Asimismo, en buena parte de esas estaciones se presentaron anomalías positivas de *TMin* desde enero o marzo hasta mayo o más, lo cual indicaría, en conjunto con las anomalías negativas de la *TMax*, una reducción en el ciclo diurno de la temperatura en gran parte del país posiblemente asociada a la erupción del *Chichonal*.

Por otra parte, tanto el análisis de las anomalías estandarizadas de *TMax* y *TMin* como el de los índices climáticos TN10p y TX90p, indican el favorecimiento de condiciones más frías de lo normal en el centro, norte y occidente del país hacia finales de 1982 y los primeros meses de 1983, posiblemente relacionadas con la fase más intensa del evento de *El Niño* de 1982-83.

## *Capítulo 6*

---

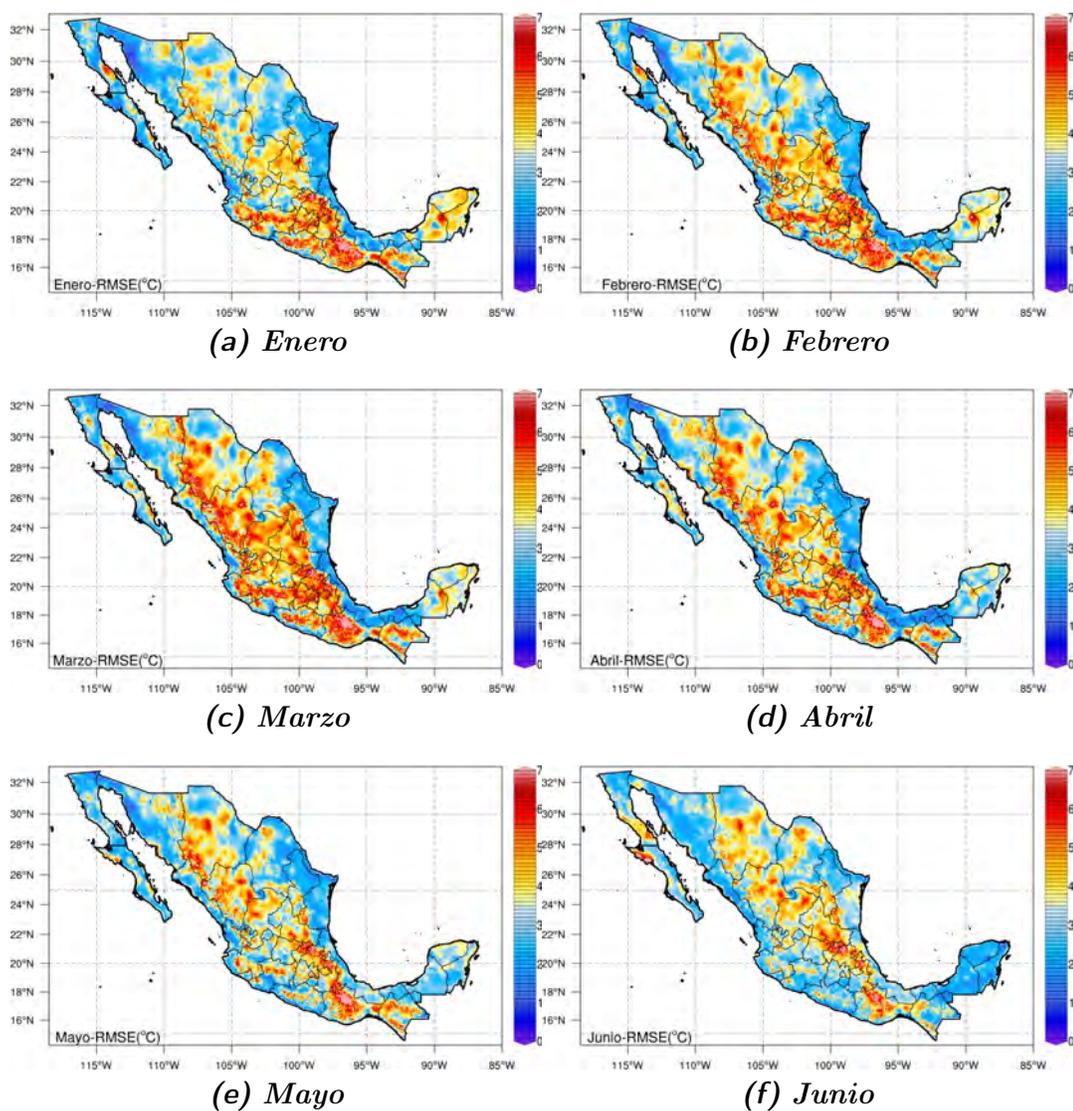
### *Anexos*

---

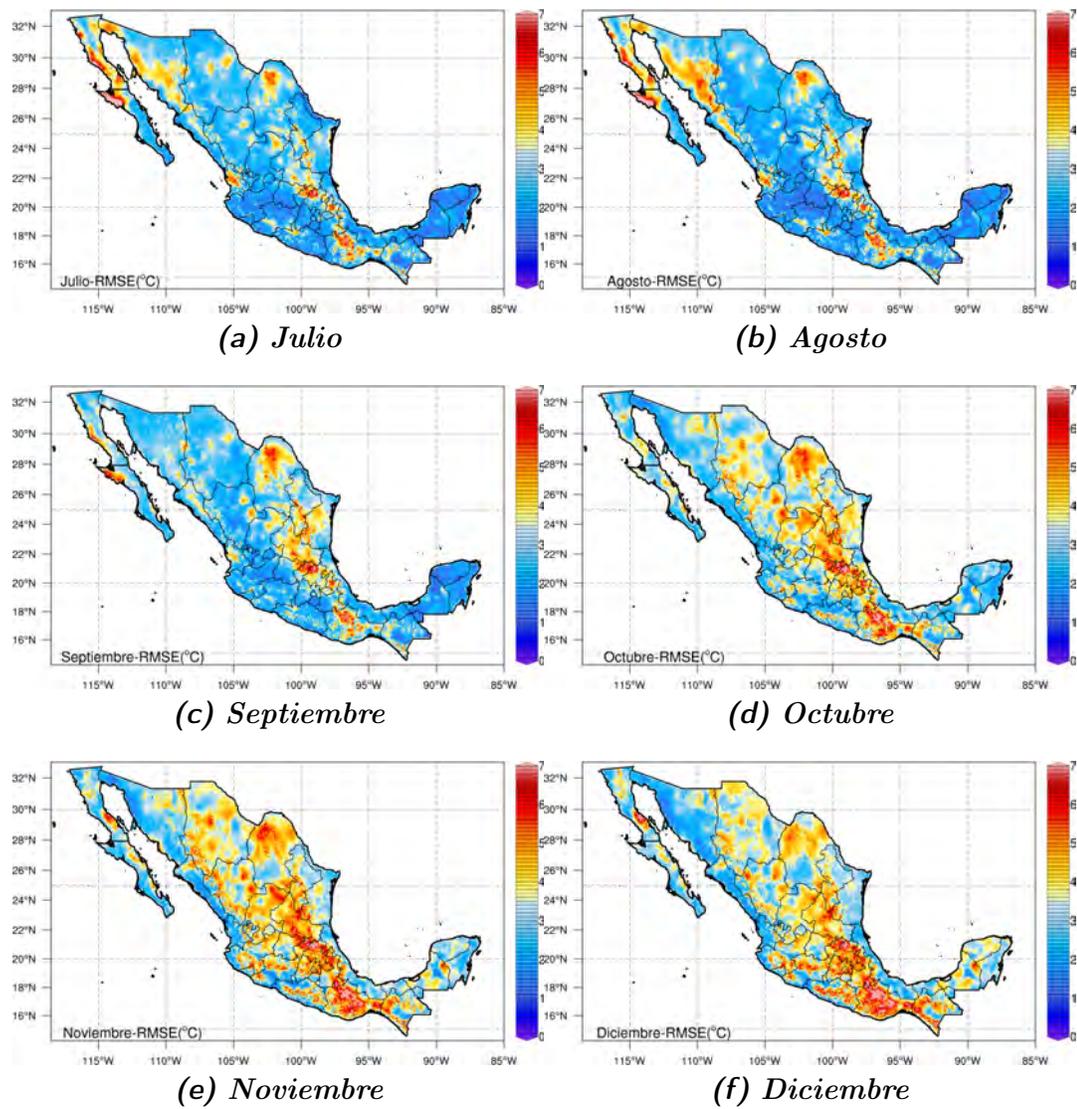
En esta sección se presentan los resultados completos de la evaluación espacial y puntual, la climatología de los percentiles 10 y 90, los índices asociados y las anomalías estandarizadas.

6.1. *Análisis espacial.*

6.1.1. Climatología mensual de *RMSE* para *TMax* (1980-89).

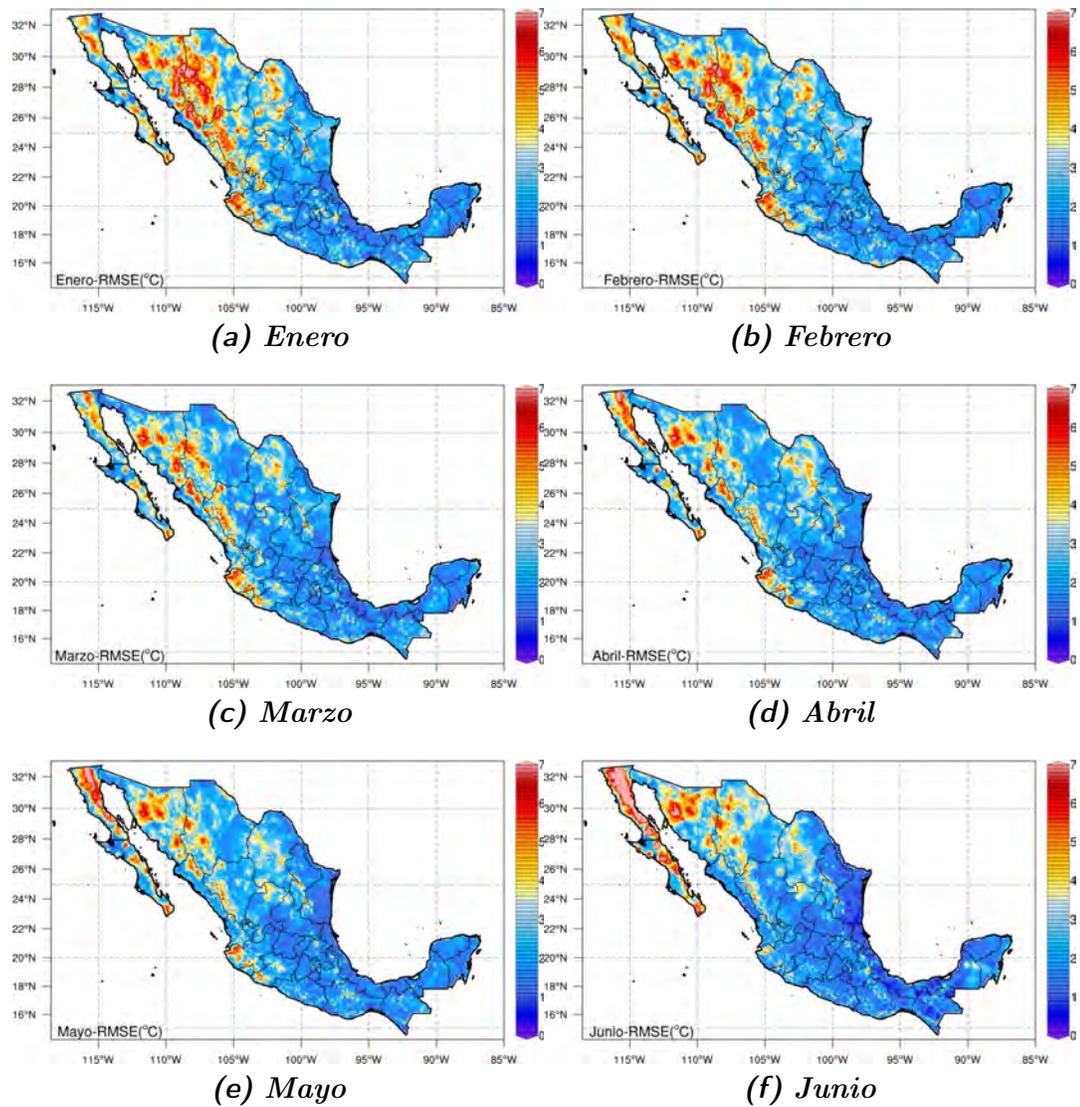


*Fig. 6-1: Climatología mensual de RMSE para TMax durante los meses de enero a junio.*

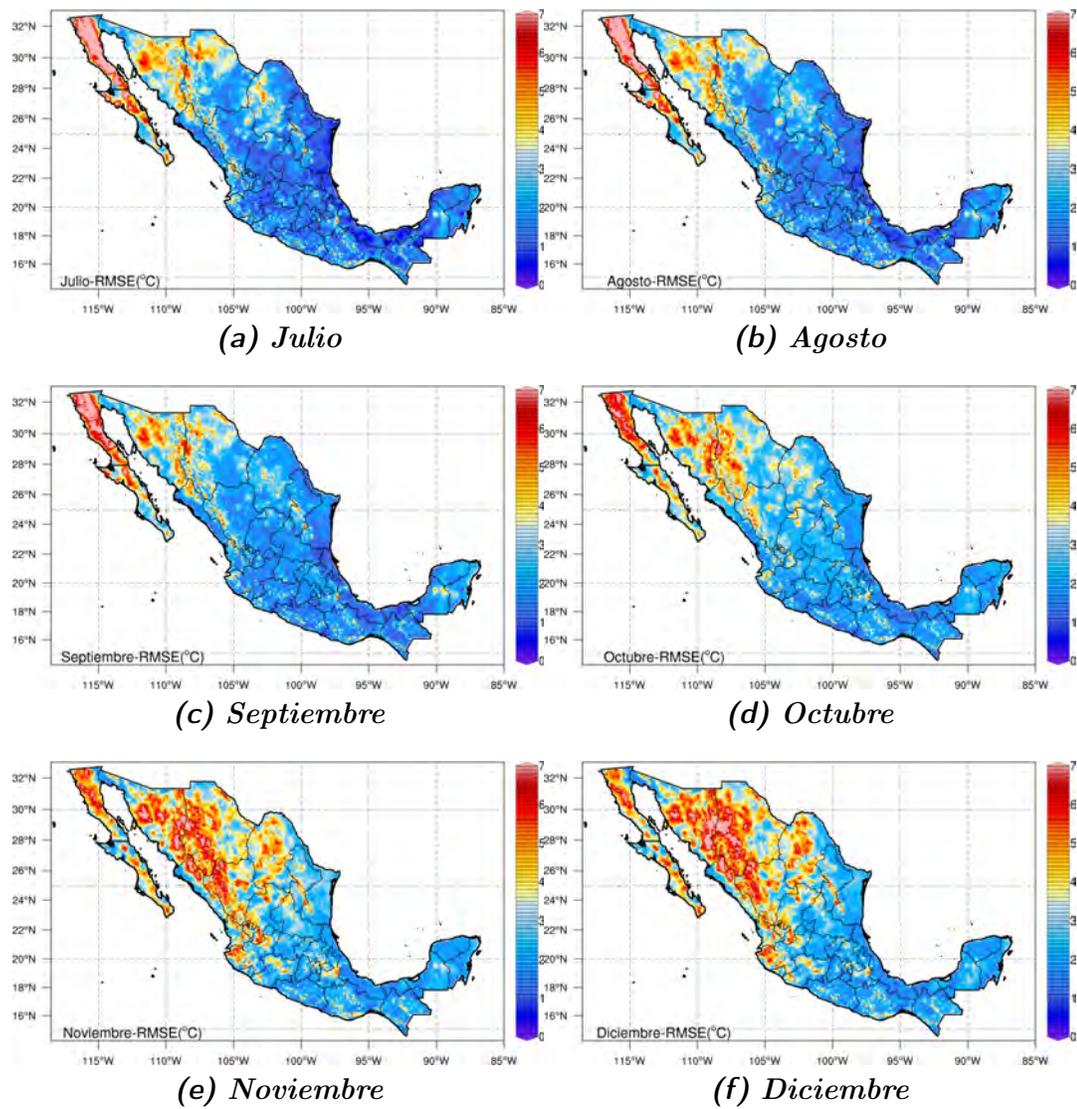


*Fig. 6-2: Climatología mensual de RMSE para TMax durante los meses de julio a diciembre.*

6.1.2. Climatología mensual de *RMSE* para TMin (1980-89).



*Fig. 6-3: Climatología mensual de RMSE para TMin durante los meses de enero a junio.*



*Fig. 6-4: Climatología mensual de RMSE para TMin durante los meses de julio a diciembre.*

### 6.1.3. Climatología mensual de MAE para TMax (1980-89).

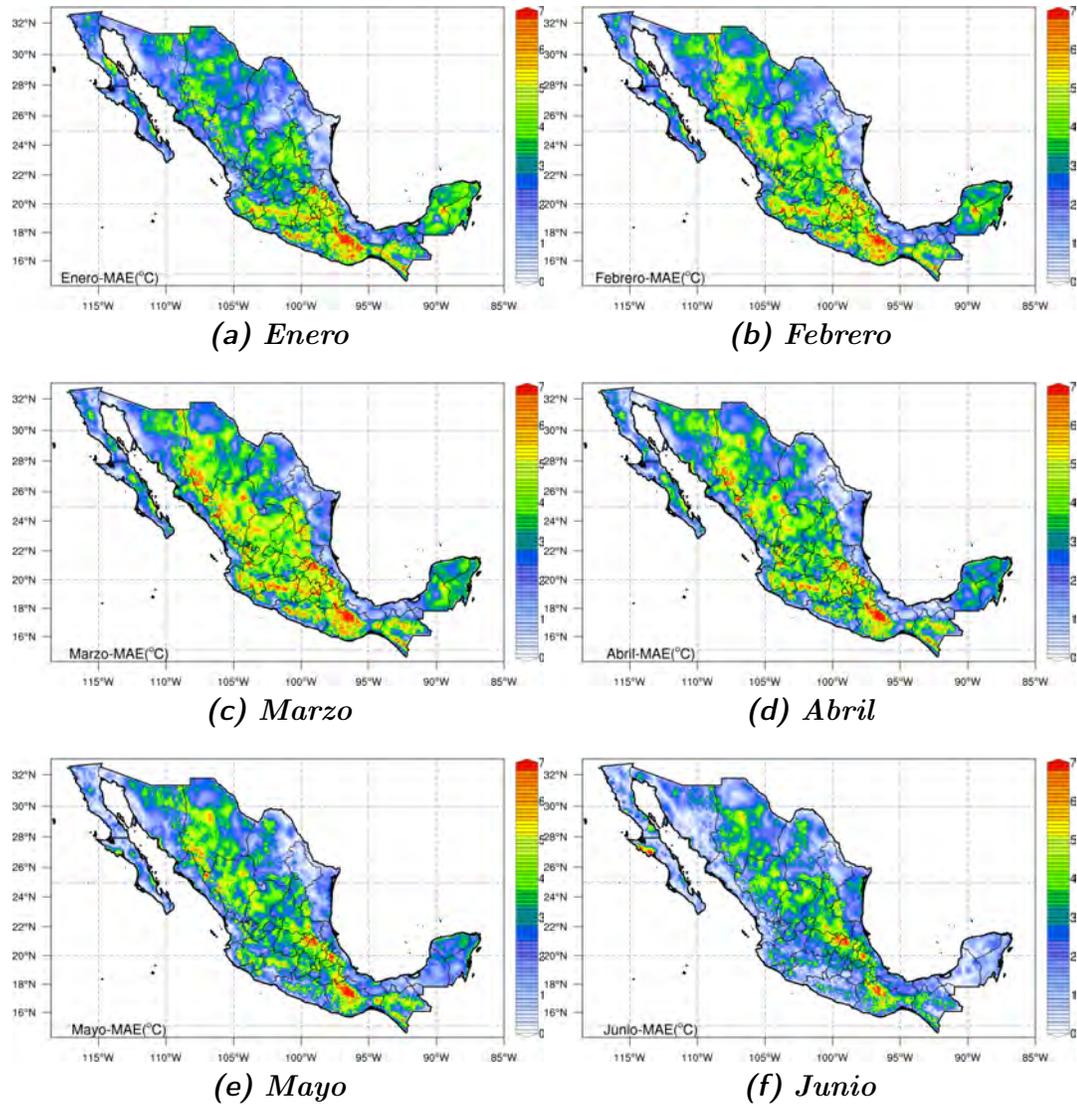
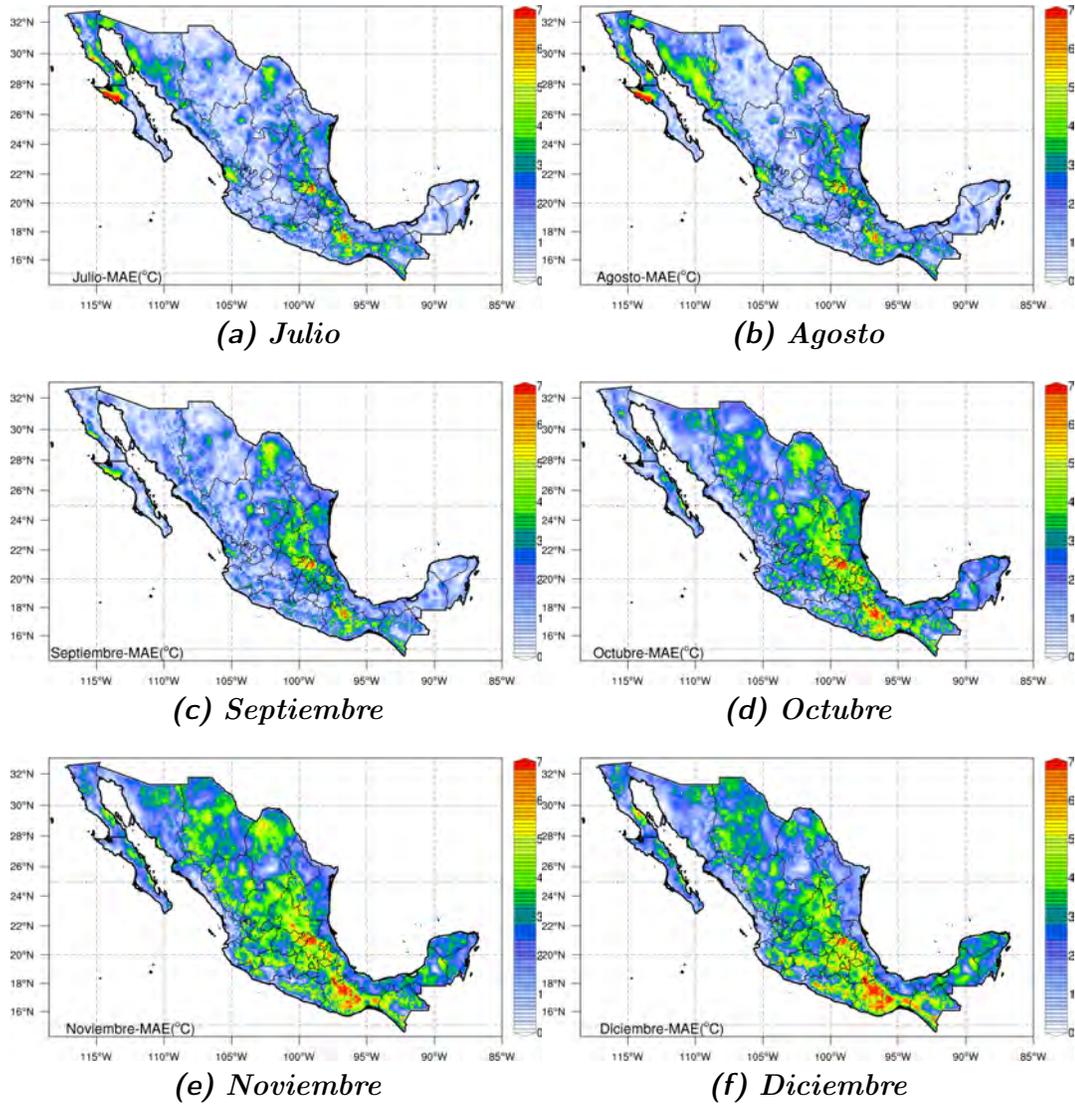
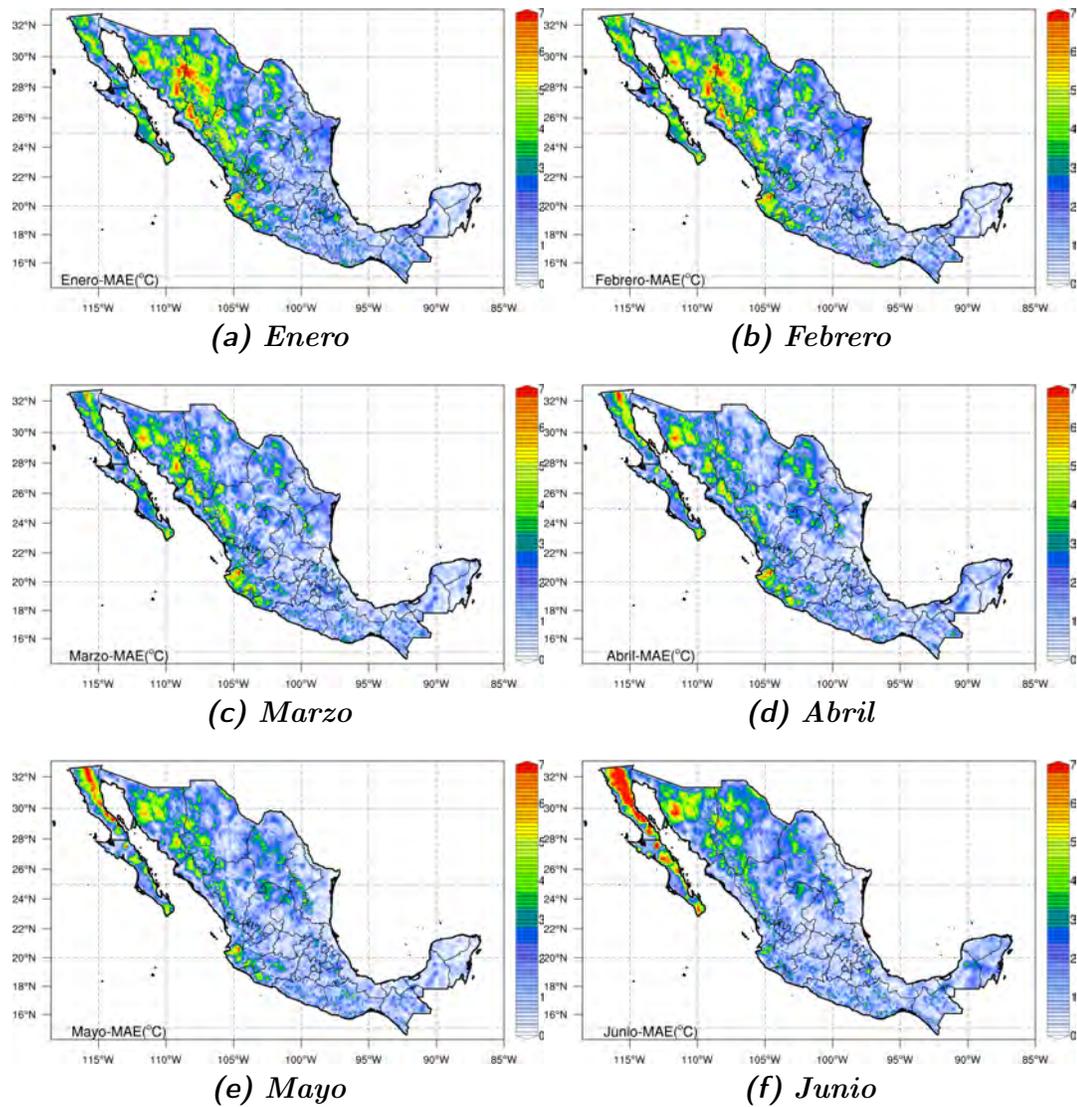


Fig. 6-5: Climatología mensual de MAE para TMax.

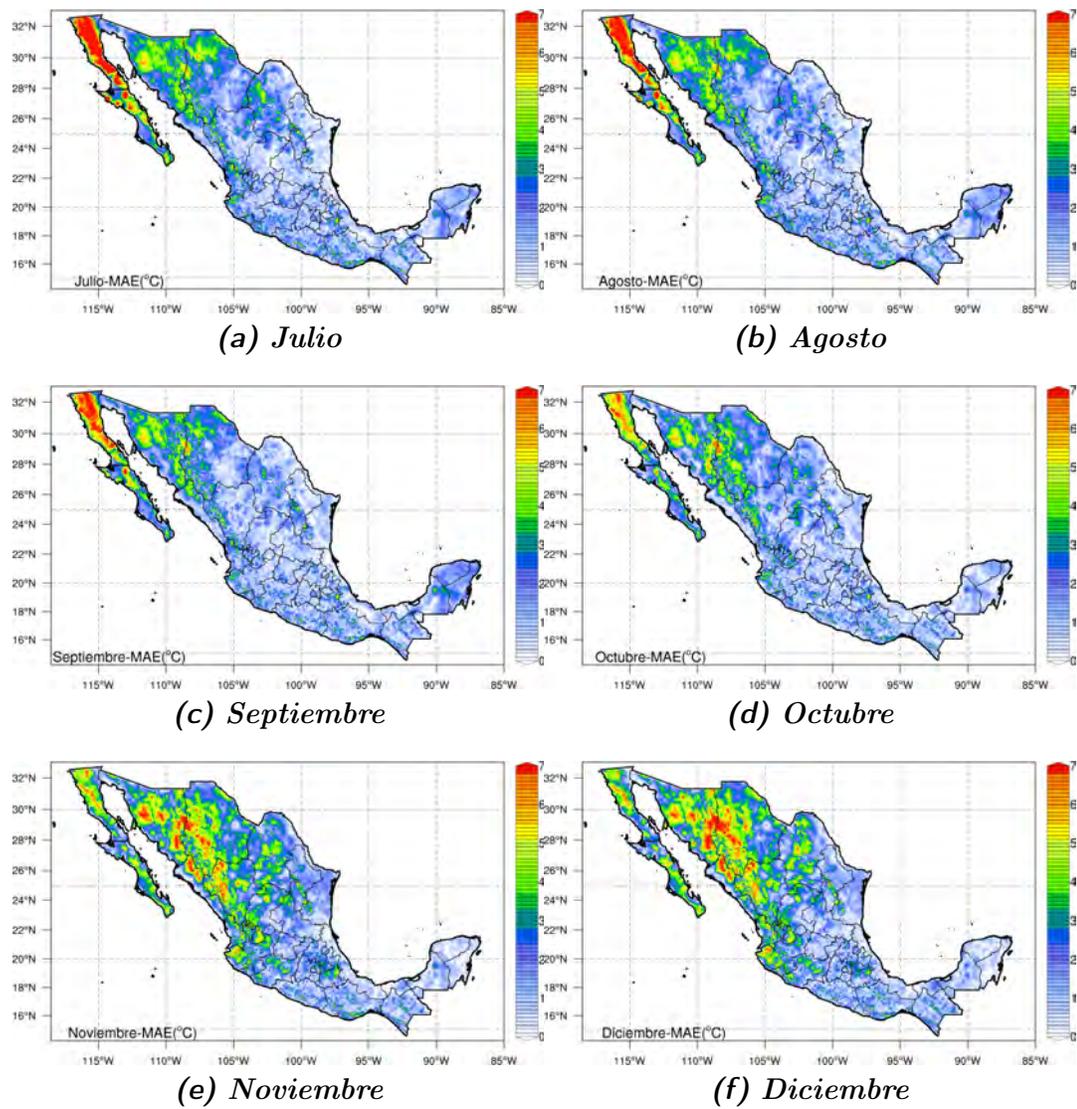


*Fig. 6-6: Climatología mensual de MAE para TMax.*

6.1.4. Climatología mensual de *MAE* para *TMin* (1980-89).



*Fig. 6-7: Climatología mensual de MAE para TMin durante los meses de enero a junio.*



*Fig. 6-8: Climatología mensual de MAE para TMin durante los meses de julio a diciembre.*

6.1.5. Climatología mensual de *ME* para TMax (1980-89).

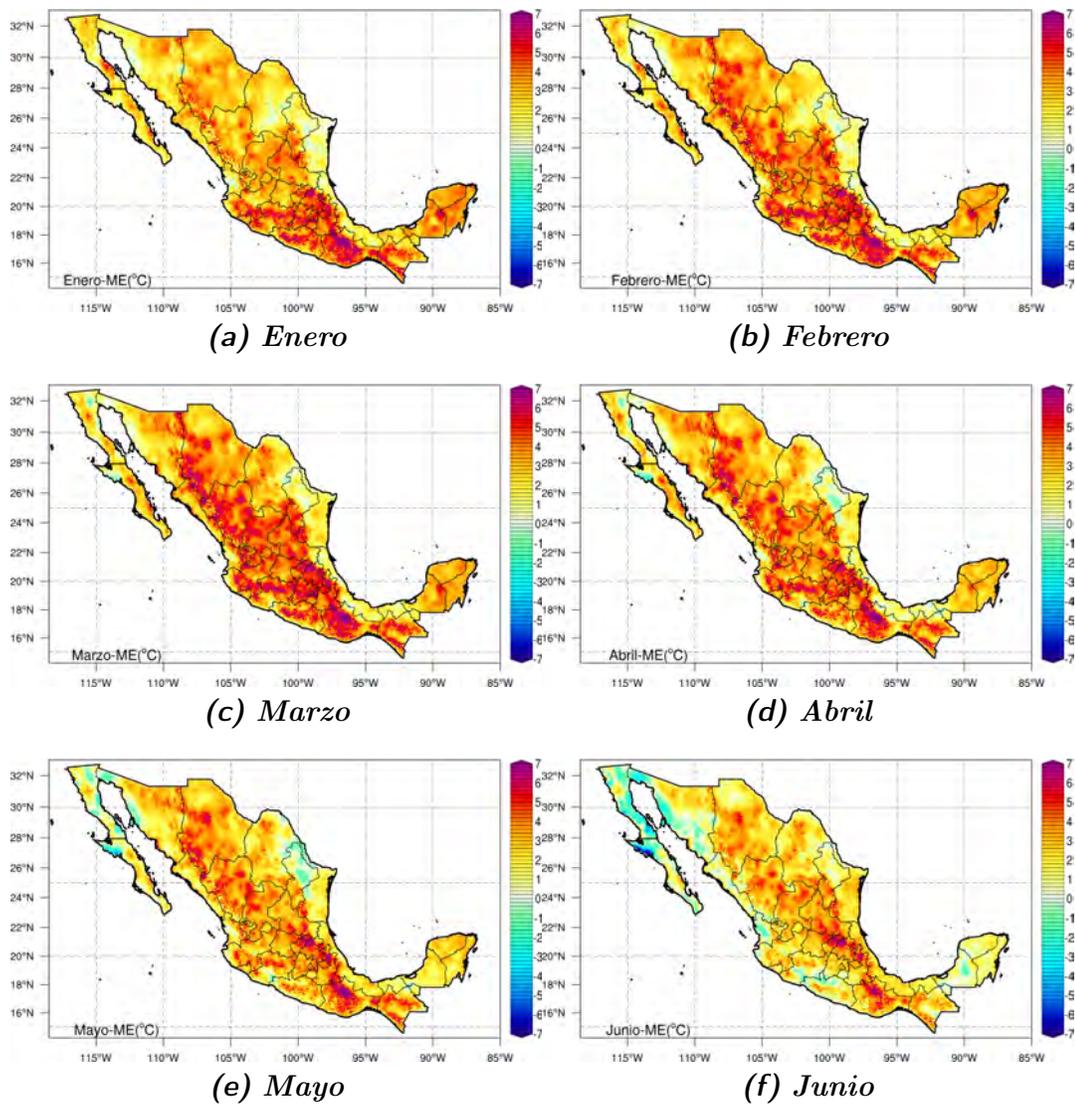


Fig. 6-9: Climatología mensual de *ME* para TMax.

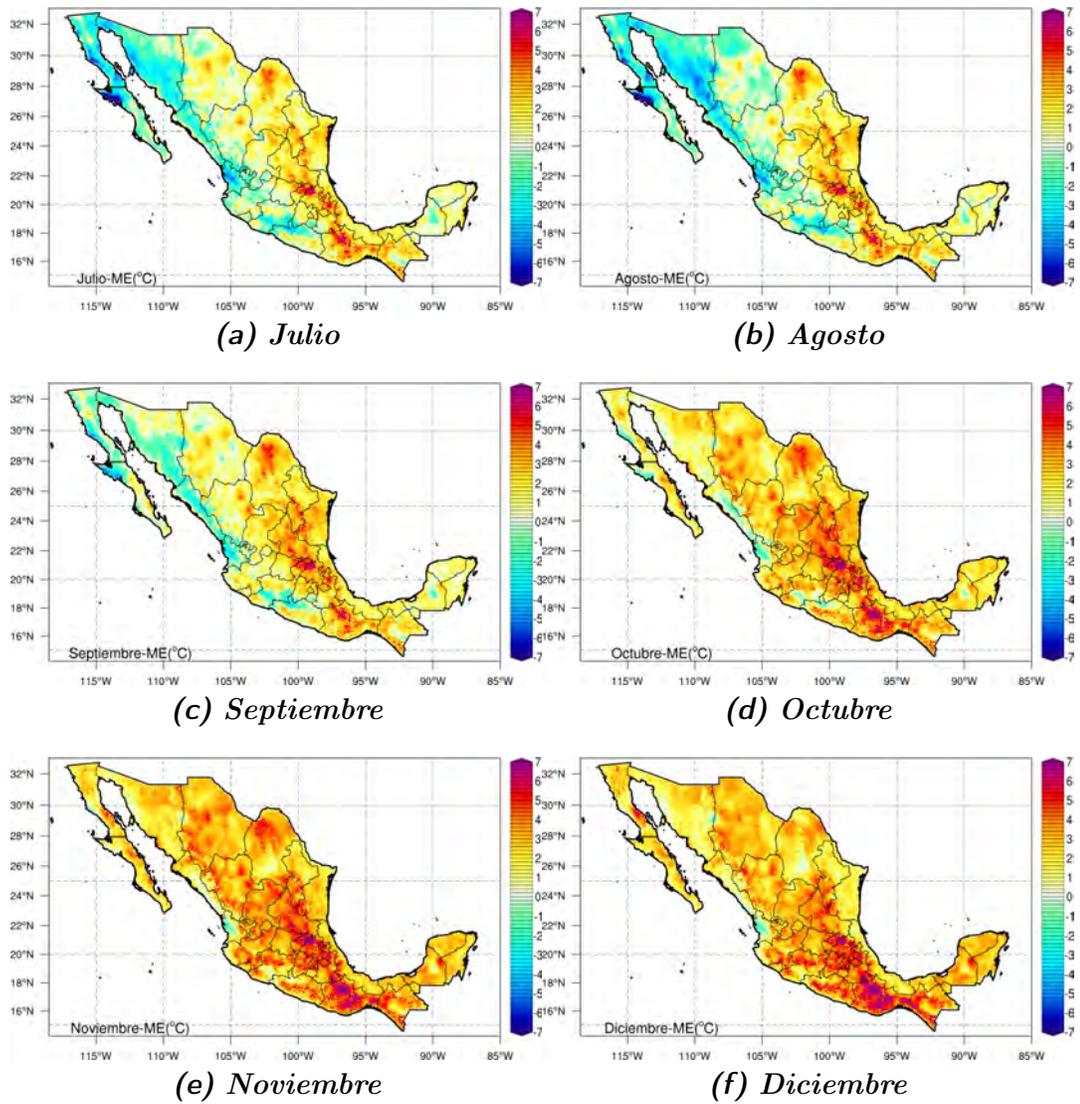


Fig. 6-10: Climatología mensual de ME para TMax.

6.1.6. Climatología mensual de *ME* para TMin (1980-89).

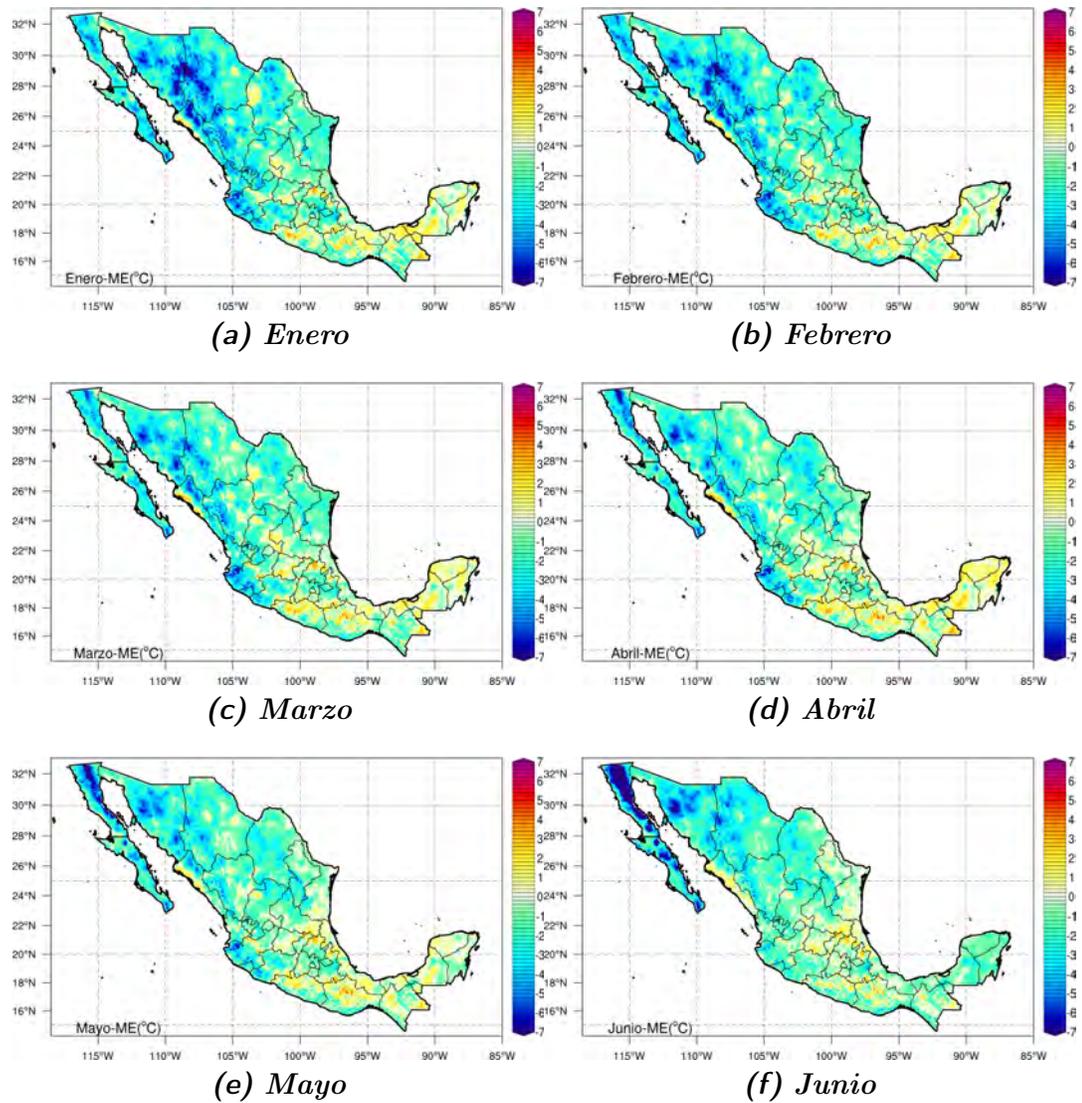
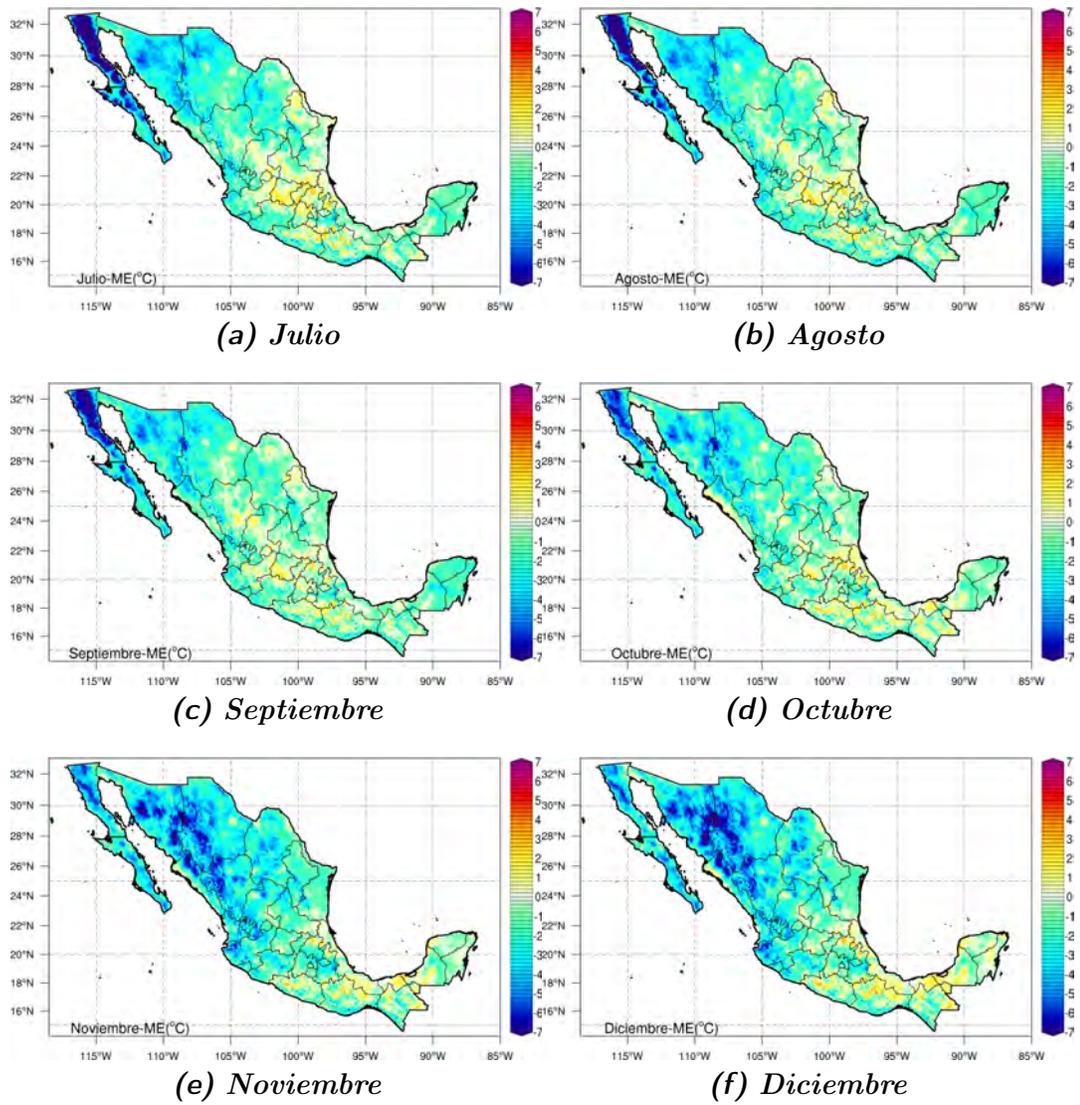


Fig. 6-11: Climatología mensual de *ME* para TMin durante los meses de enero a junio.



*Fig. 6-12: Climatología mensual de ME para TMin durante los meses de julio a diciembre.*

6.1.7. Histogramas de la climatología mensual de *RMSE* para *TMax* (1980-89).

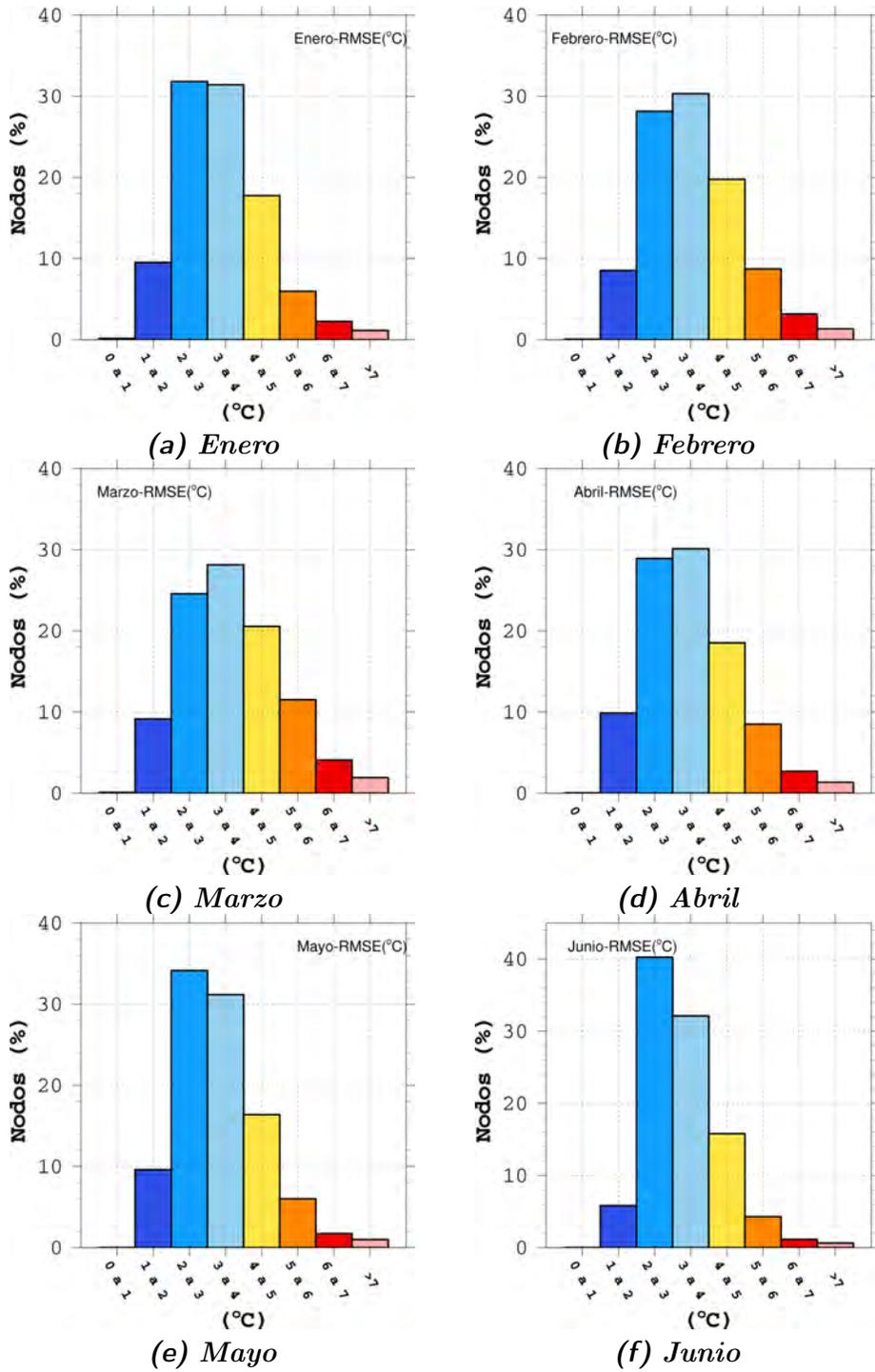
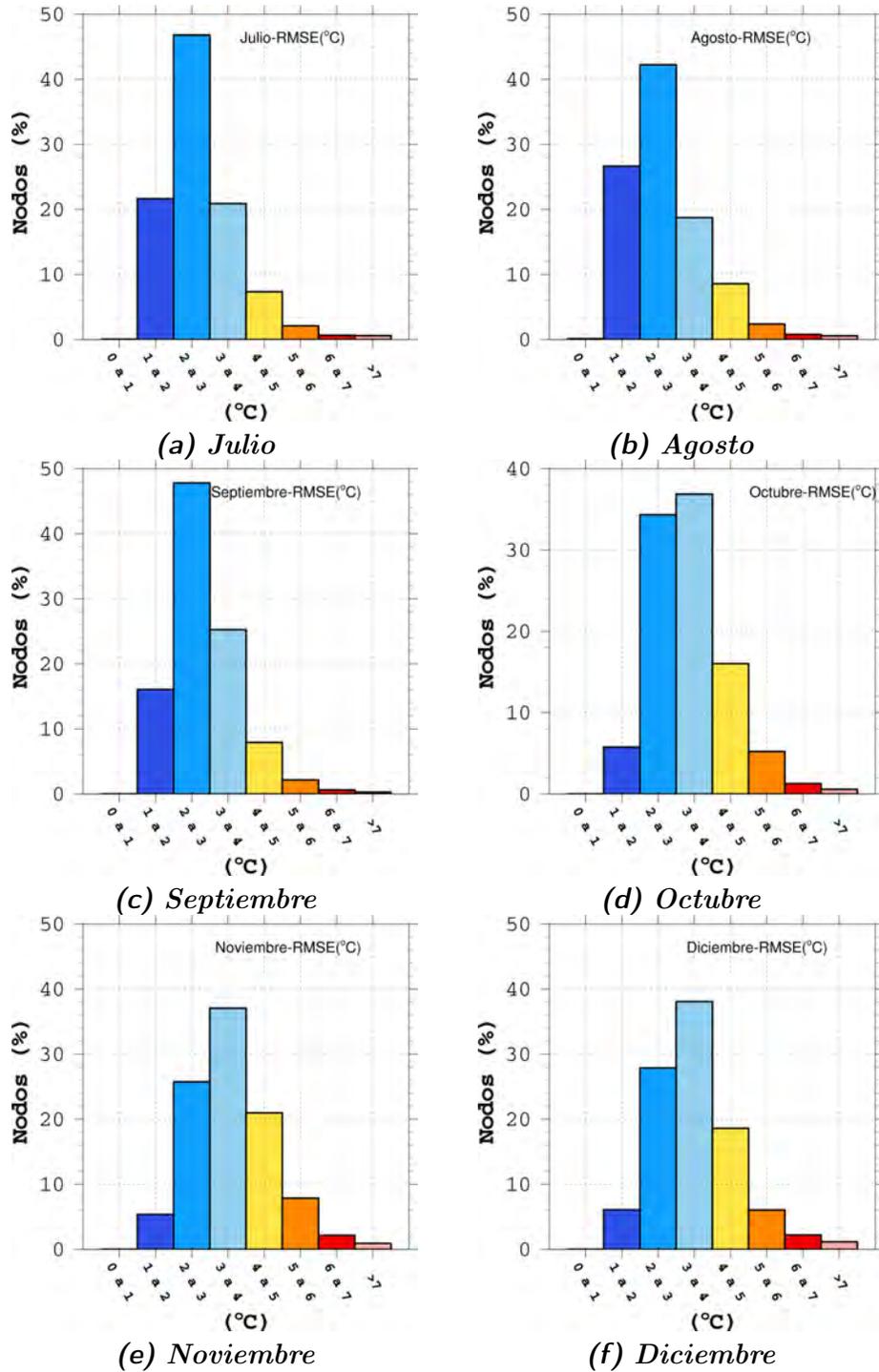


Fig. 6-13: Histogramas de la climatología mensual de *RMSE* para *TMax* durante los meses de enero a junio. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.



*Fig. 6-14: Histogramas de la climatología mensual de RMSE para TMax durante los meses de julio a diciembre. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.*

6.1.8. Histogramas de la climatología mensual de *RMSE* para *TMin* (1980-89).

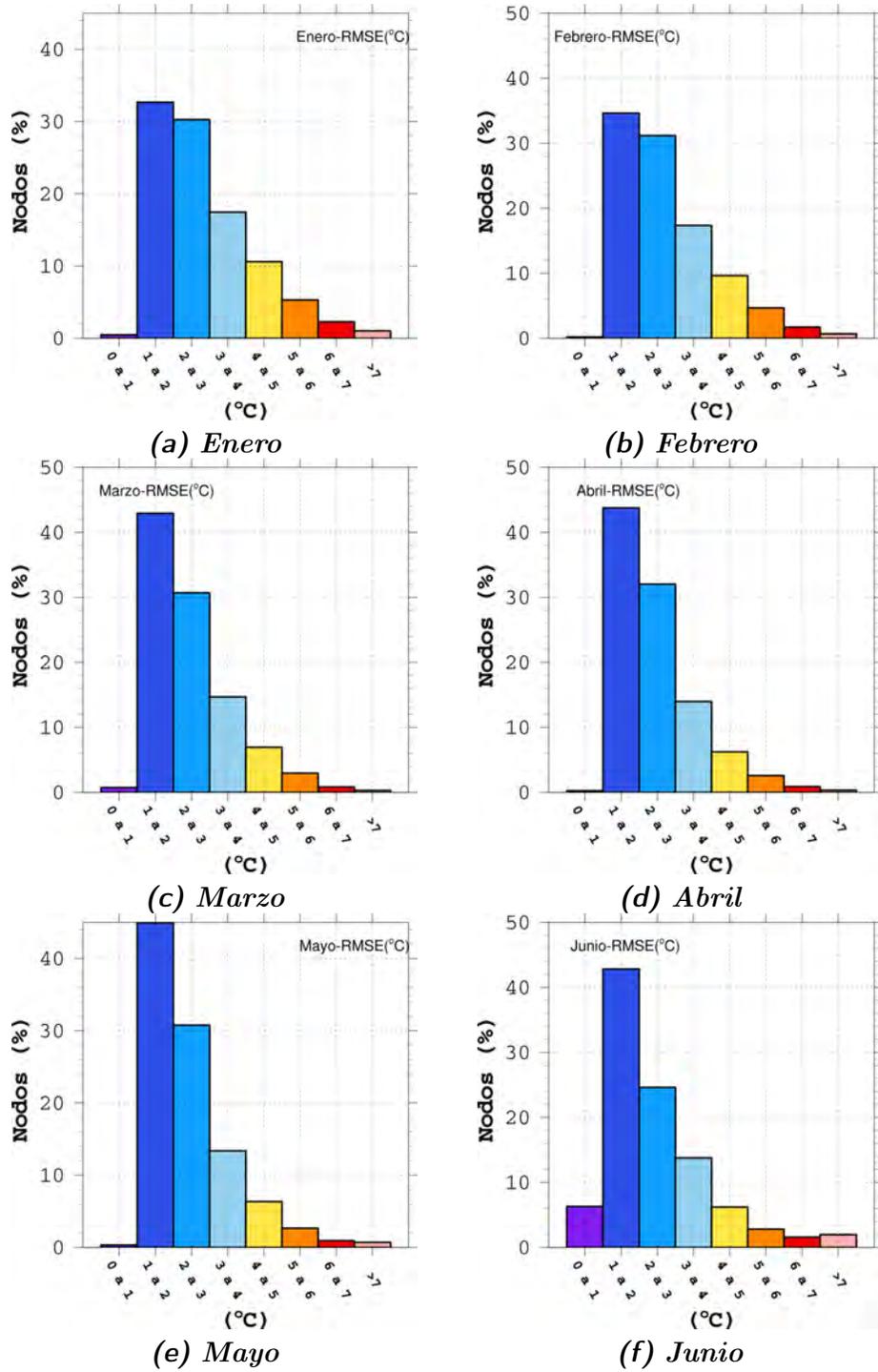
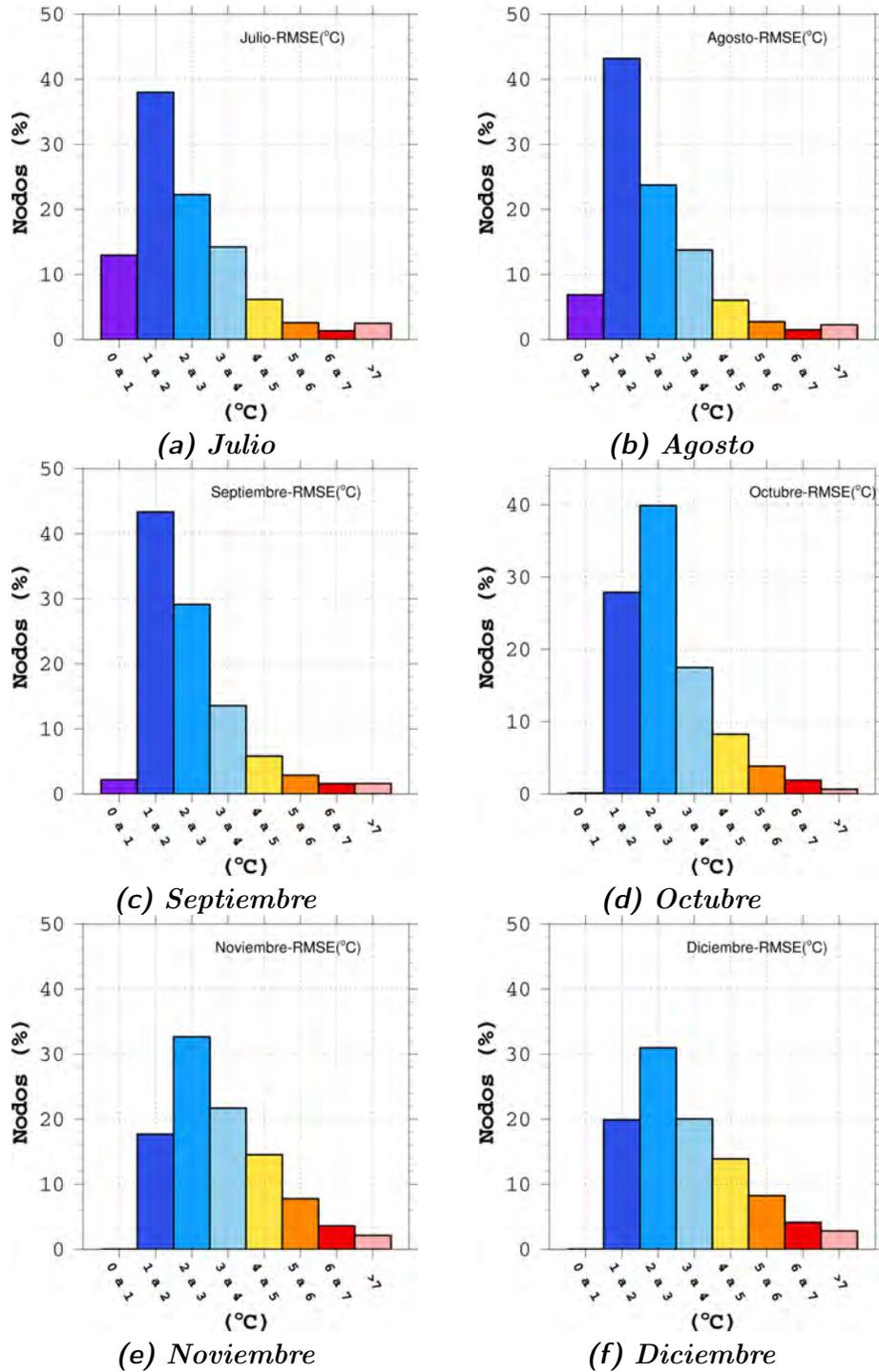


Fig. 6-15: Histogramas de la climatología mensual de *RMSE* para *TMin* durante los meses de enero a junio. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.



*Fig. 6-16: Histogramas de la climatología mensual de RMSE para TMin durante los meses de julio a diciembre. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.*

6.1.9. Histogramas de la climatología mensual de MAE para TMax (1980-89).

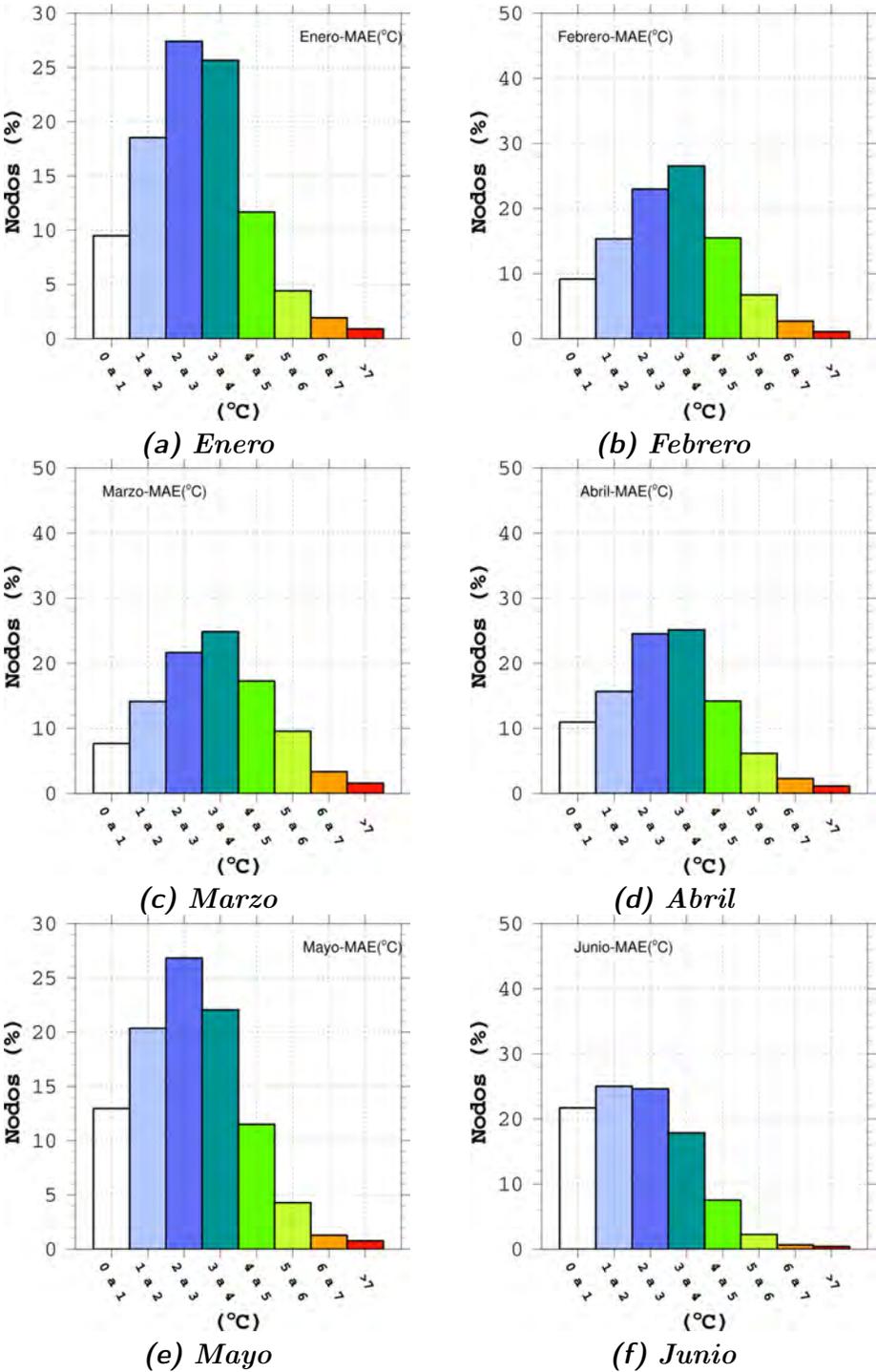
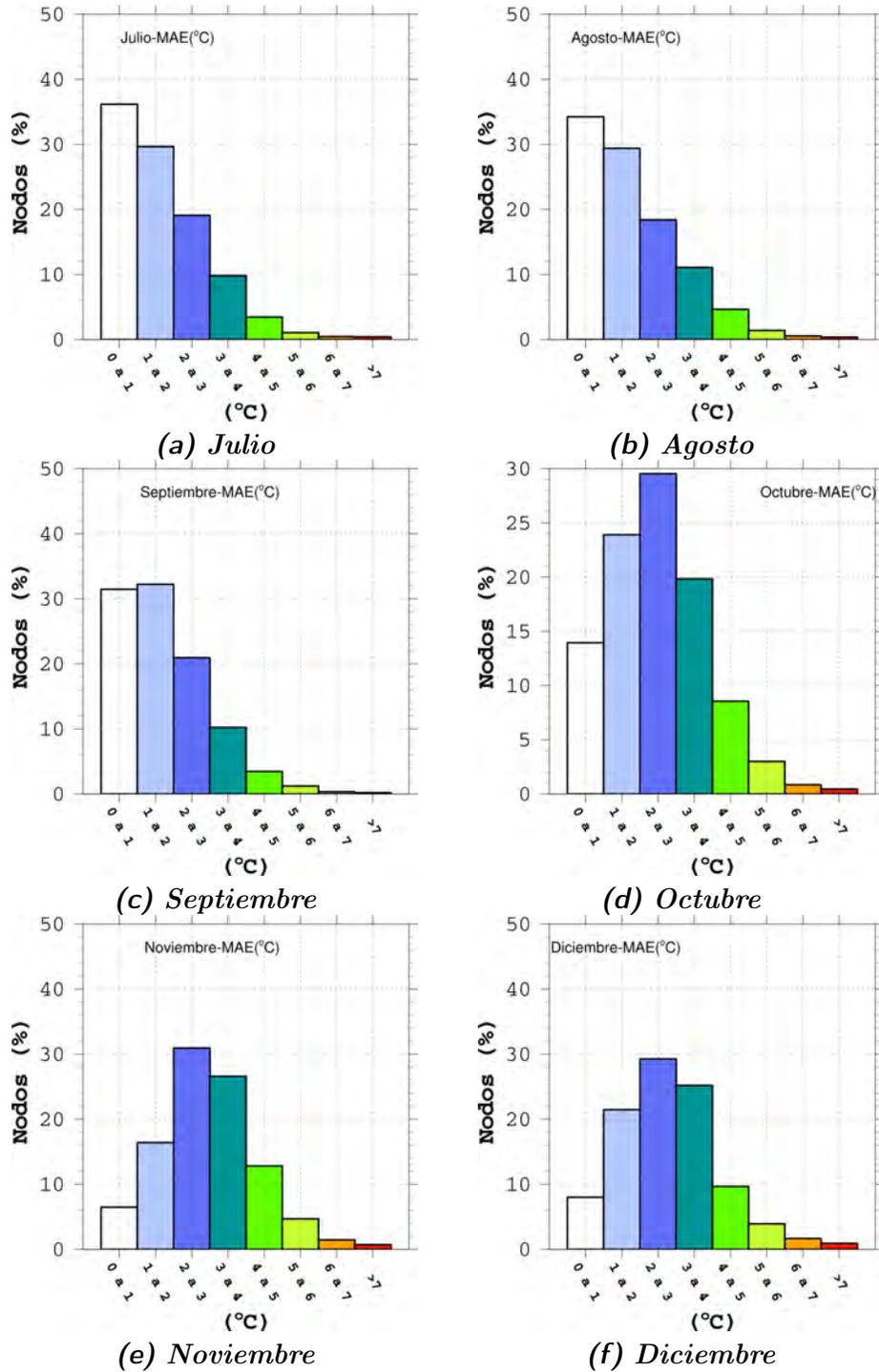


Fig. 6-17: Histogramas de la climatología mensual de MAE para TMax durante los meses de enero a junio. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.



*Fig. 6-18: Histogramas de la climatología mensual de MAE para TMax durante los meses de julio a diciembre. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.*

6.1.10. smallHistogramas de la climatología mensual de MAE para TMin (1980-89).

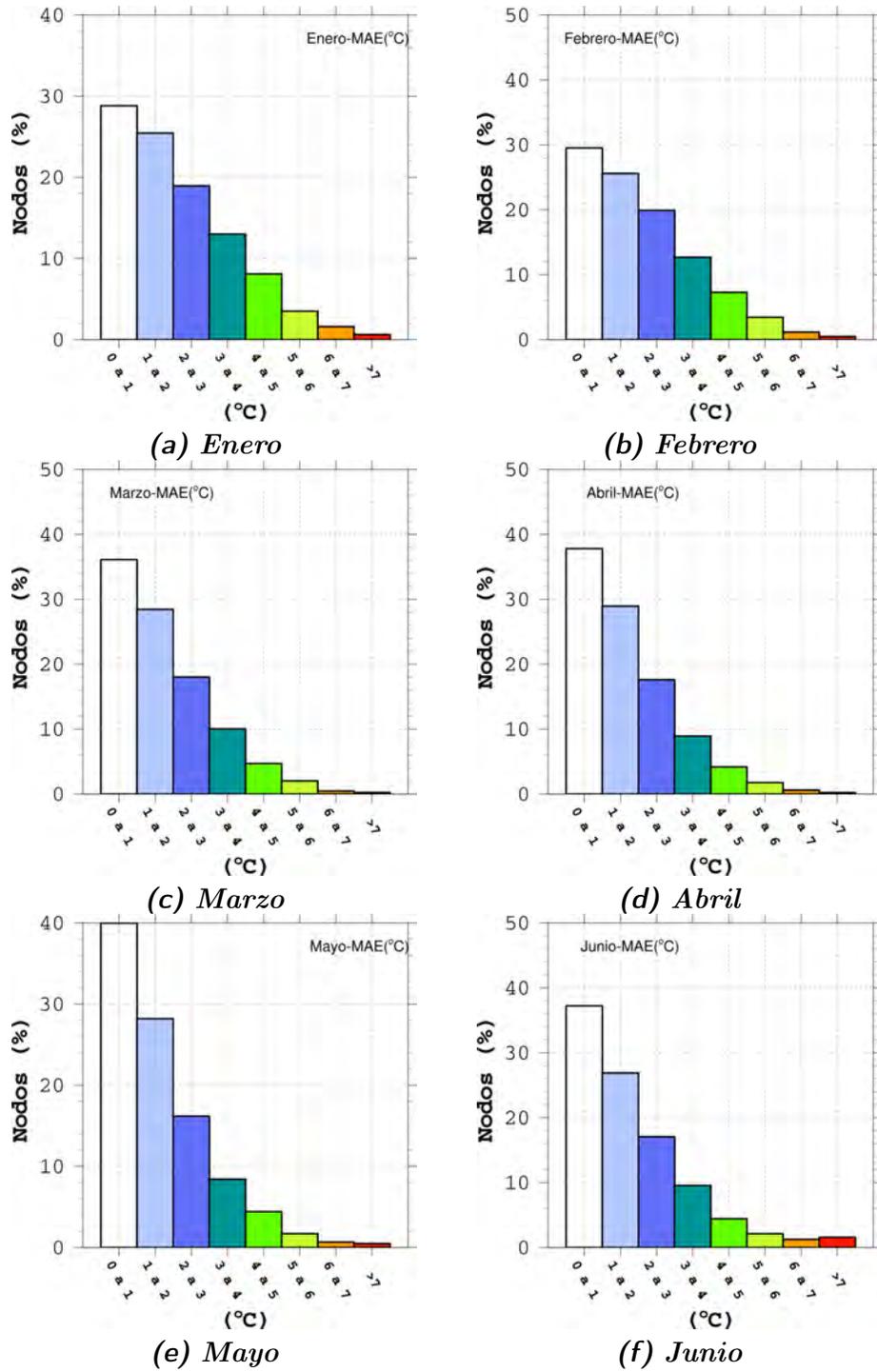
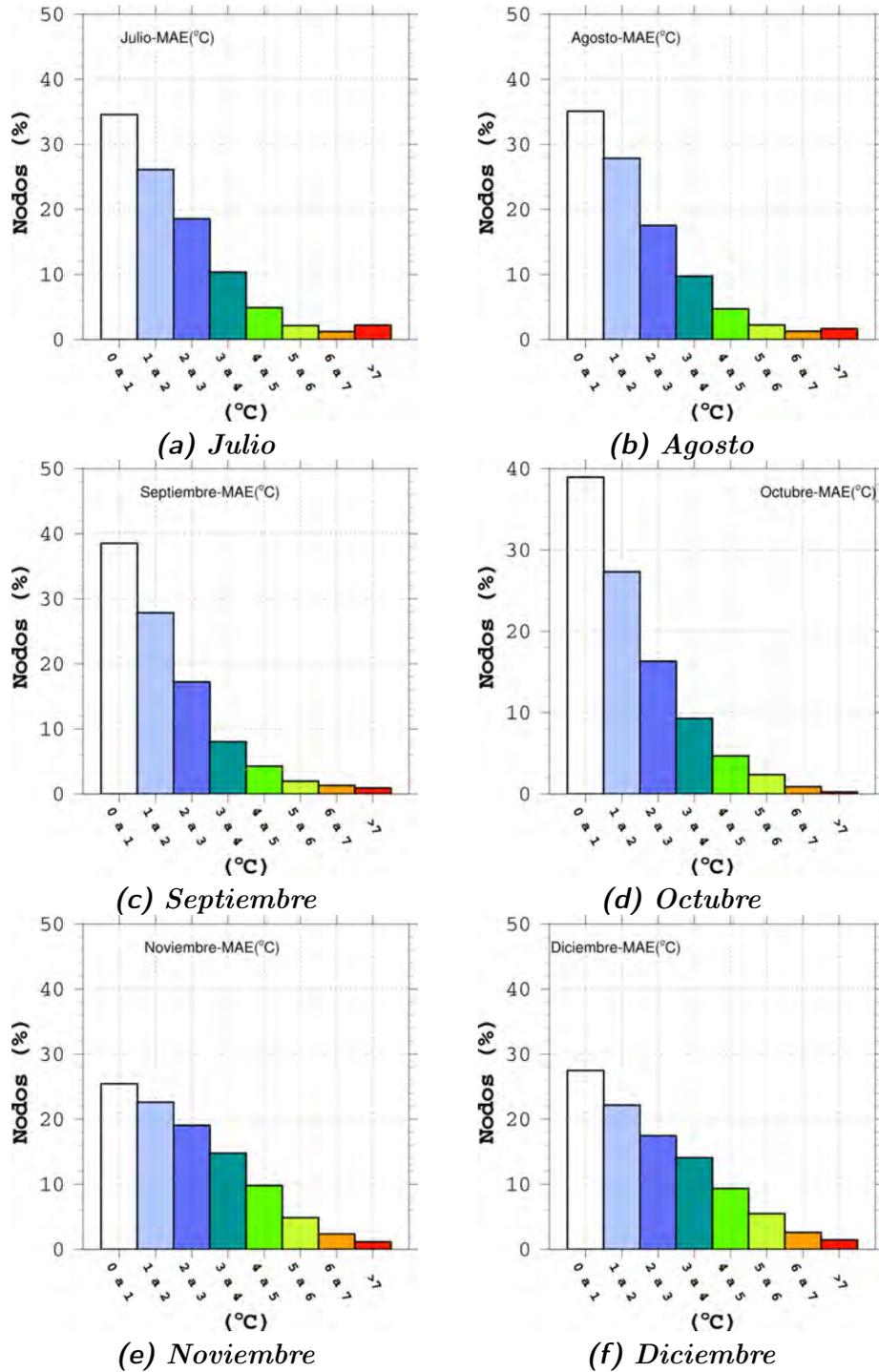


Fig. 6-19: Histogramas de la climatología mensual de MAE para TMin durante los meses de enero a junio. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.



*Fig. 6-20: Histogramas de la climatología mensual de MAE para TMin durante los meses de julio a diciembre. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.*

6.1.11. Histogramas de la climatología mensual de ME para TMax (1980-89).

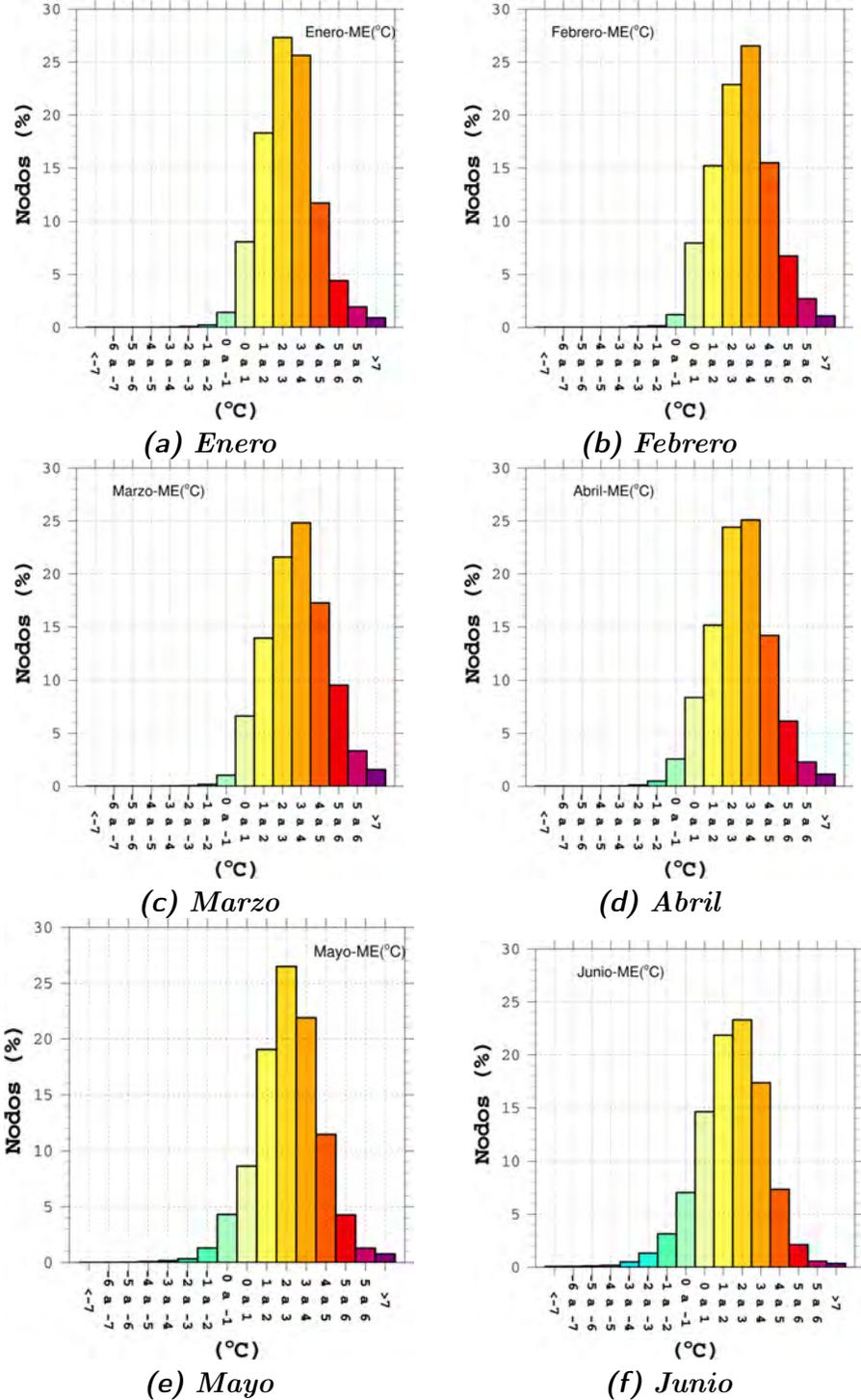


Fig. 6-21: Histogramas de la climatología mensual de ME para TMax durante los meses de enero a junio. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.

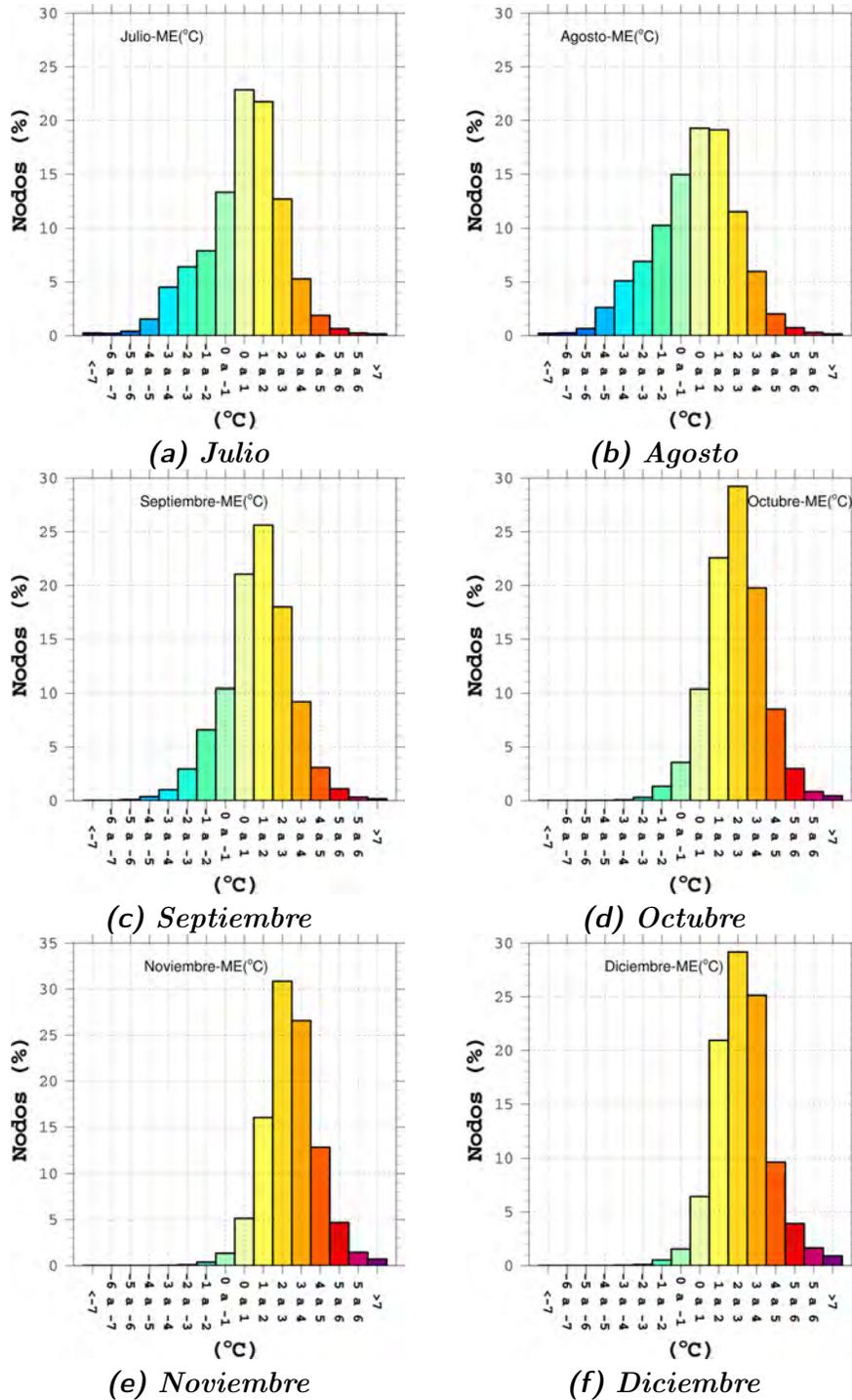


Fig. 6-22: Histogramas de la climatología mensual de ME para TMax durante los meses de julio a diciembre. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.

6.1.12. Histogramas de la climatología mensual de *ME* para TMin (1980-89).

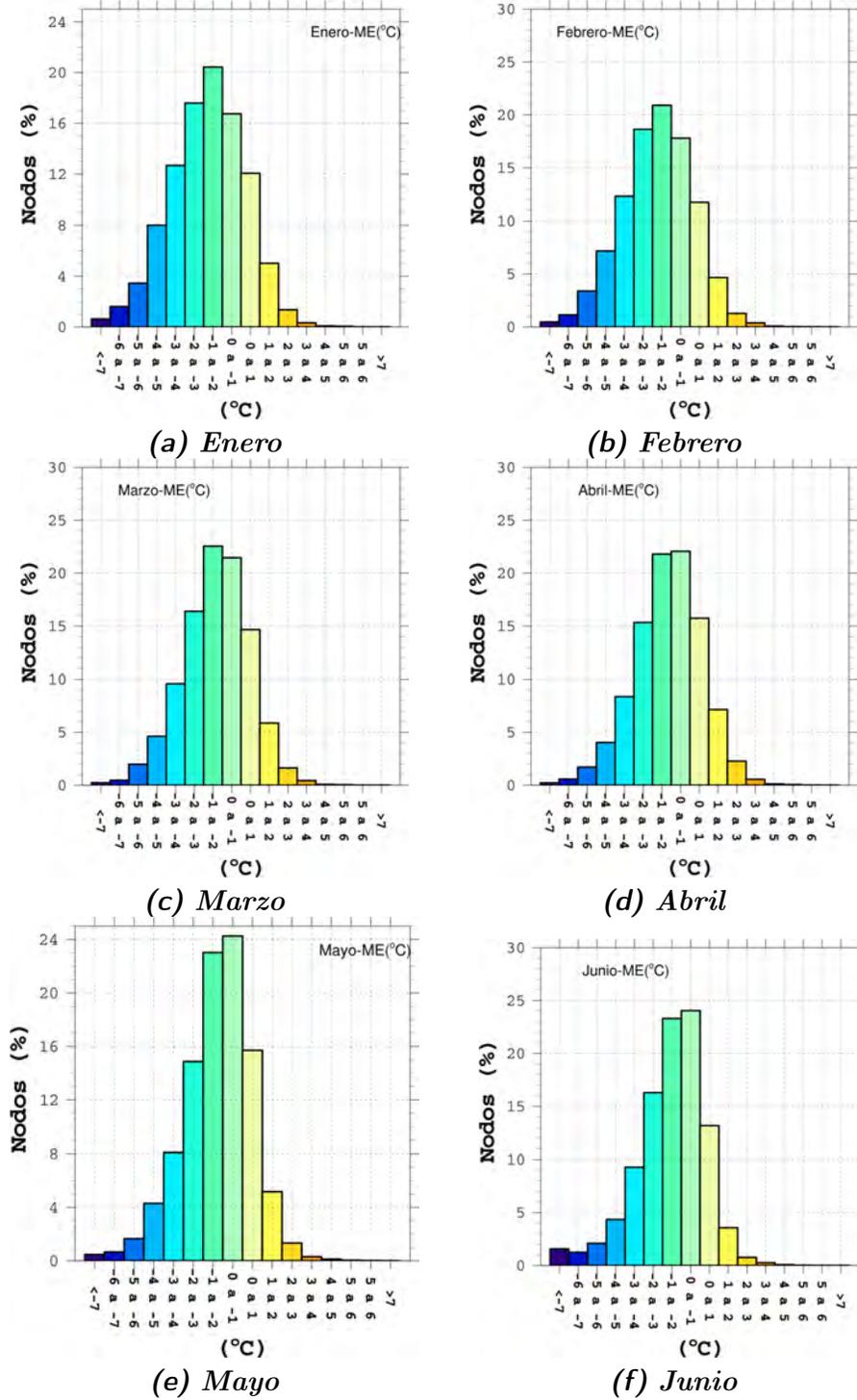
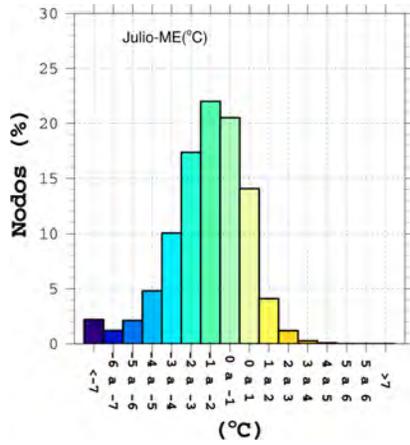
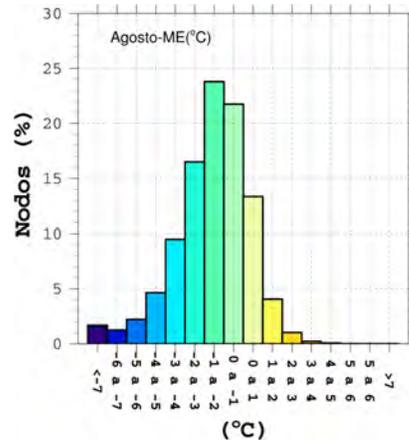


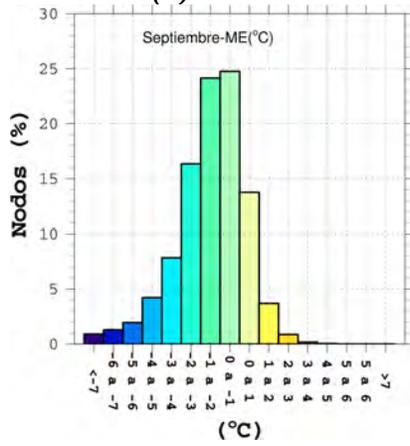
Fig. 6-23: Histogramas de la climatología mensual de *ME* para TMin durante los meses de enero a junio. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.



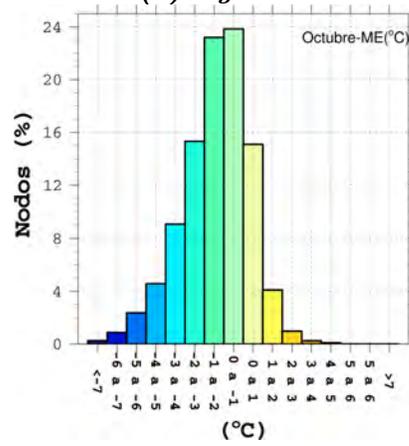
(a) Julio



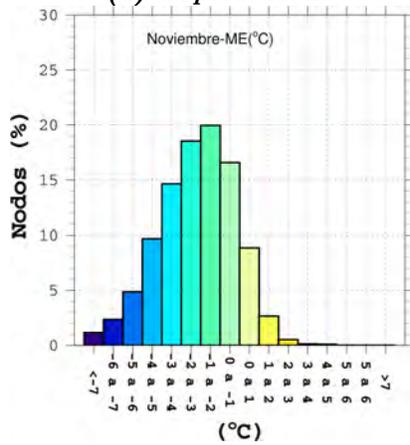
(b) Agosto



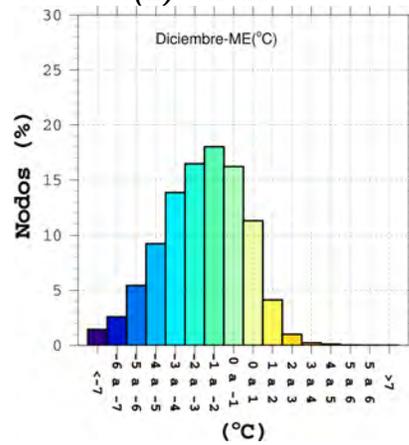
(c) Septiembre



(d) Octubre



(e) Noviembre



(f) Diciembre

Fig. 6-24: Histogramas de la climatología mensual de ME para TMin durante los meses de julio a diciembre. Se muestra el % de nodos por rangos en °C.

## 6.2. Análisis puntual.

### 6.2.1. Análisis de las estaciones climatológicas seleccionadas.

Los Robles.

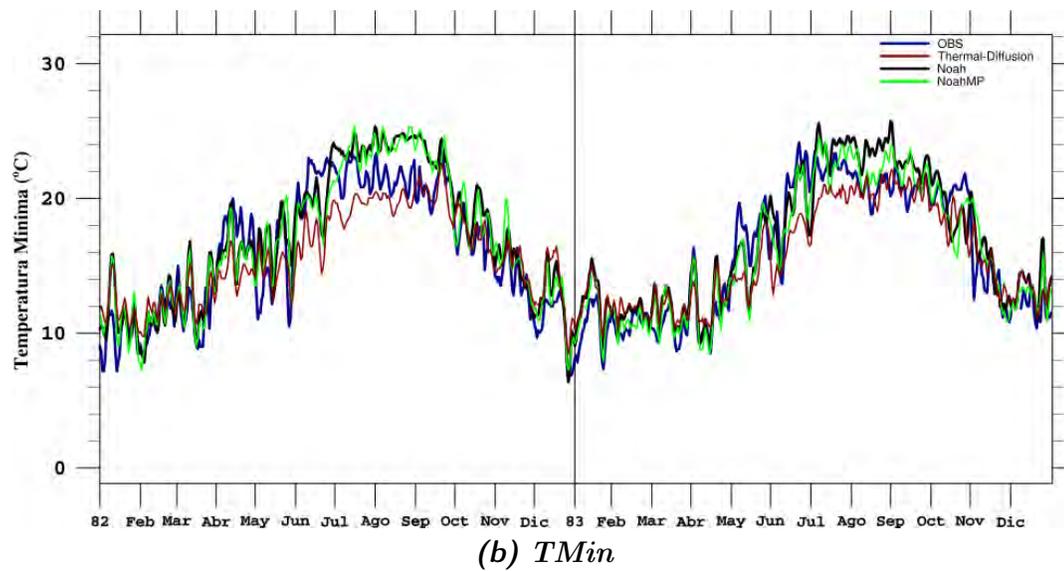
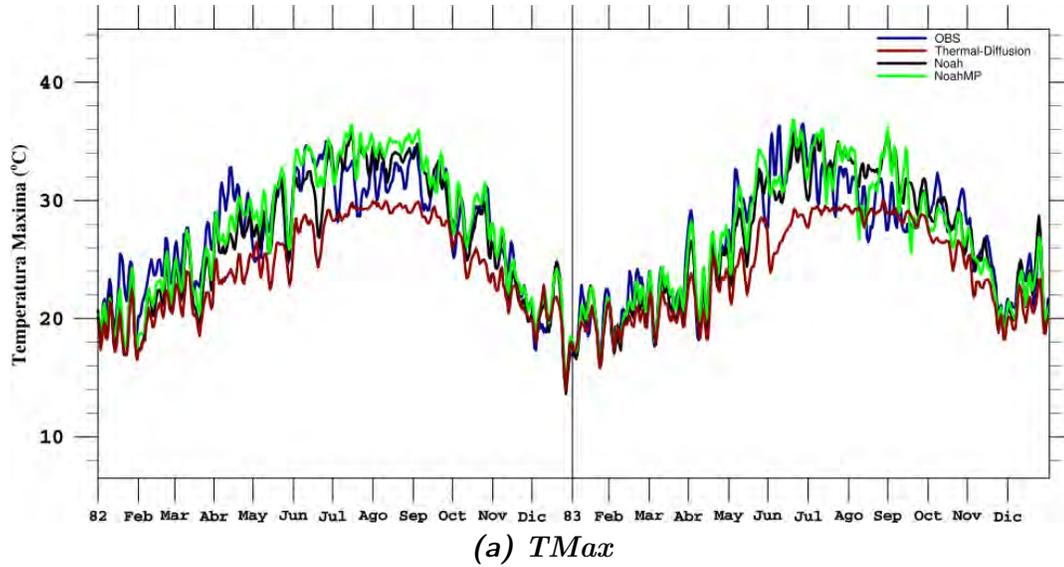


Fig. 6-25: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Los Robles, BCS., durante 1982-1983.

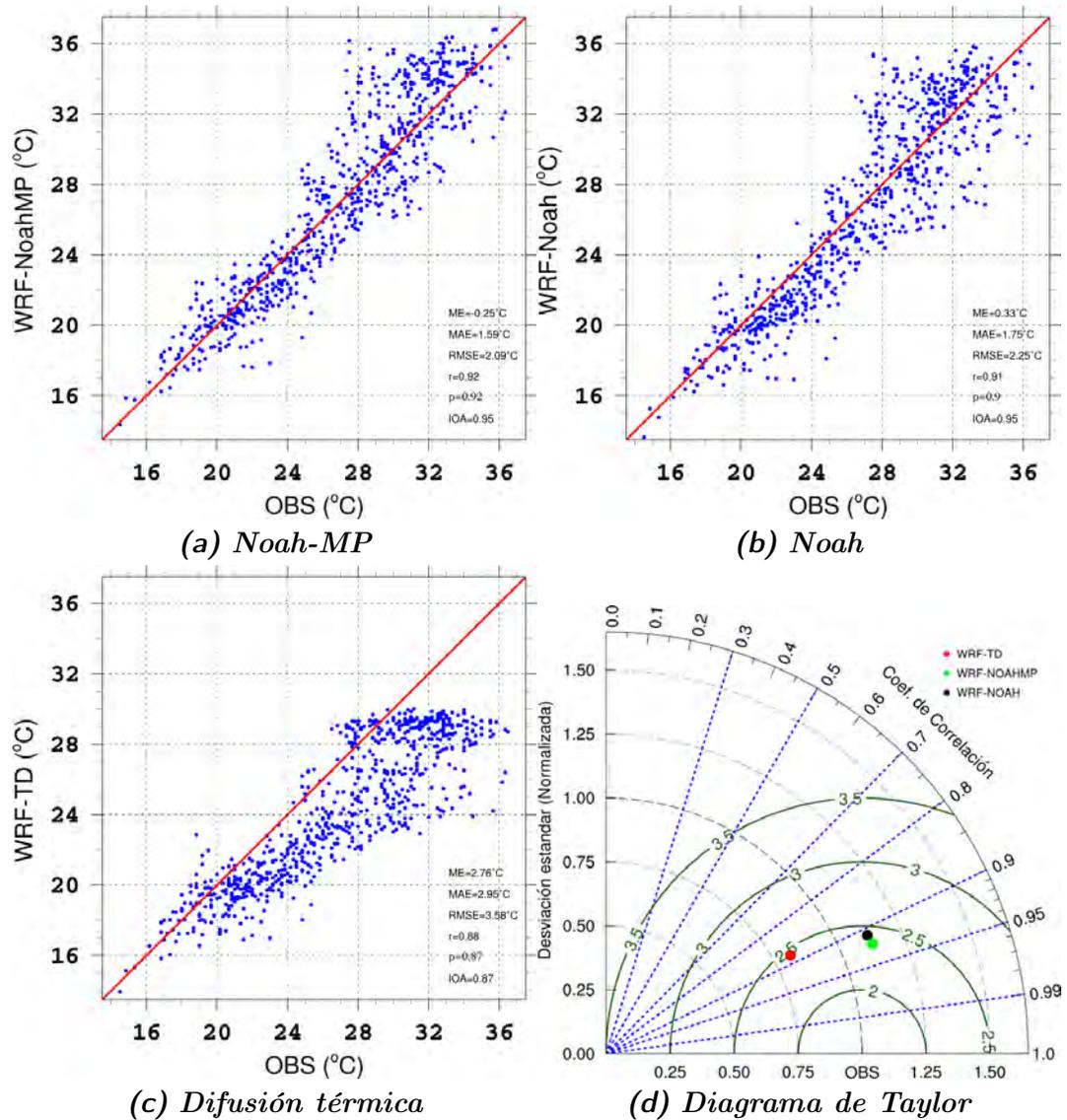
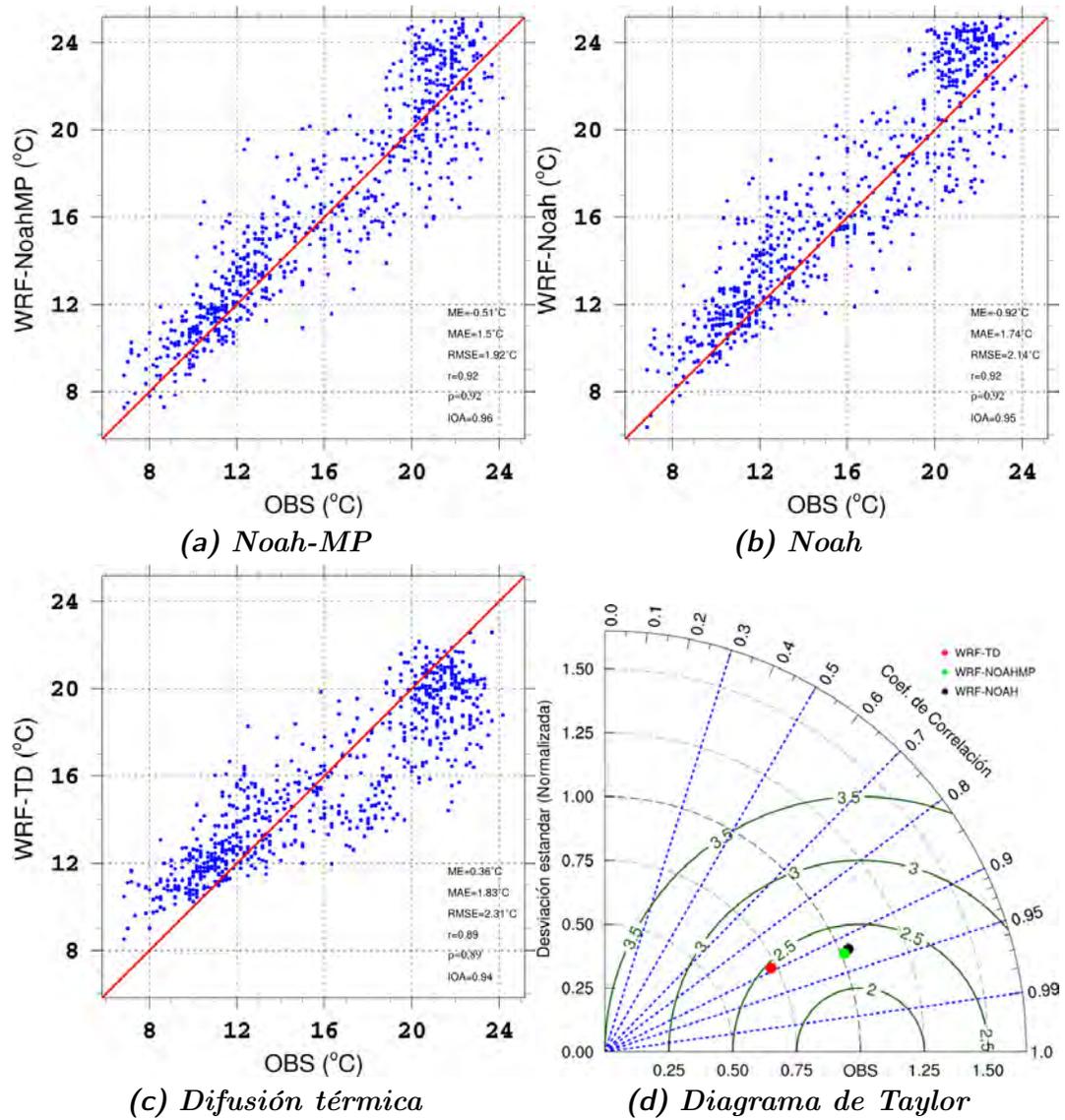
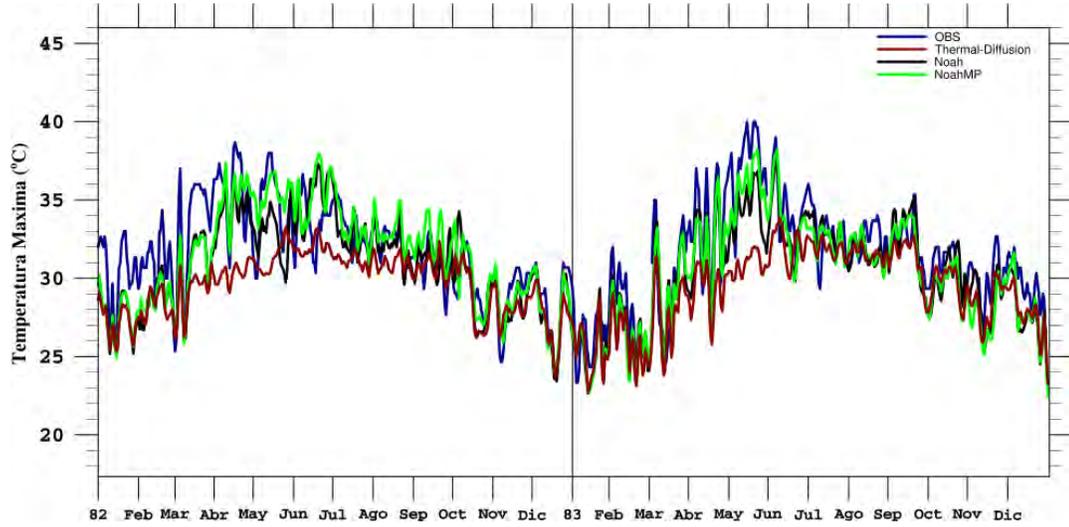


Fig. 6-26: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Los Róbles, BCS.

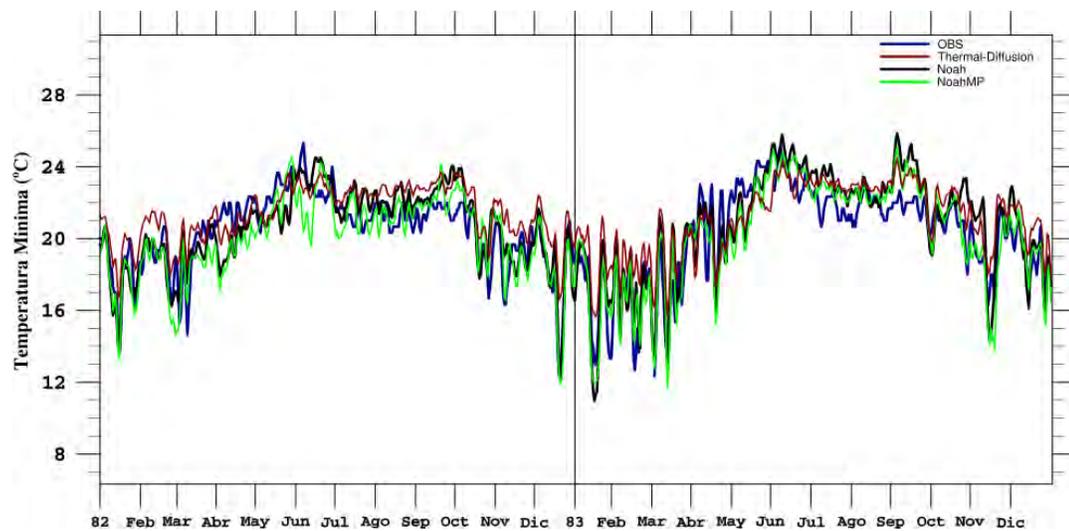


*Fig. 6-27: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Los Roubles, BCS.*

Champotón.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-28: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Champotón., Camp., durante 1982-1983.

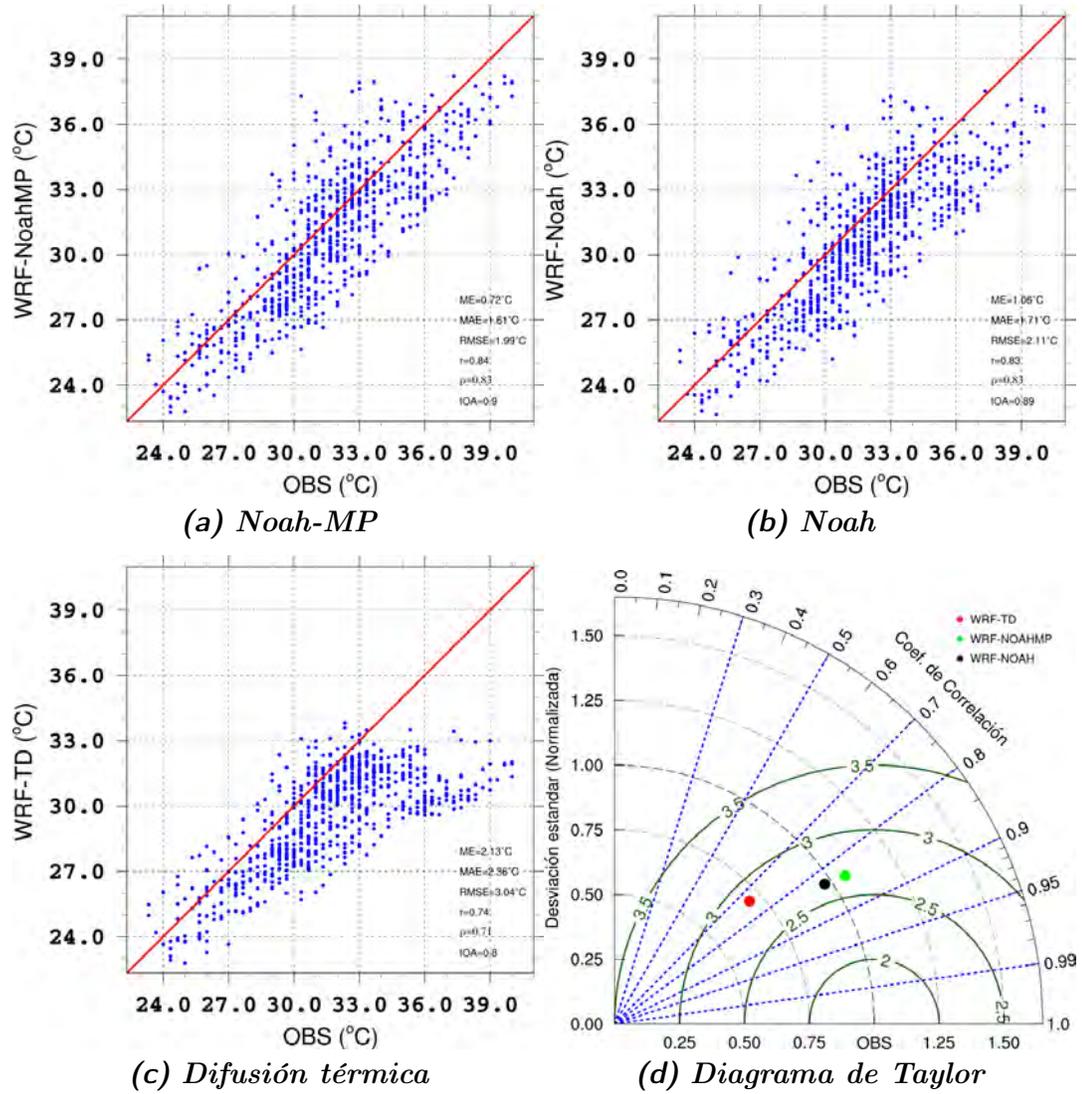
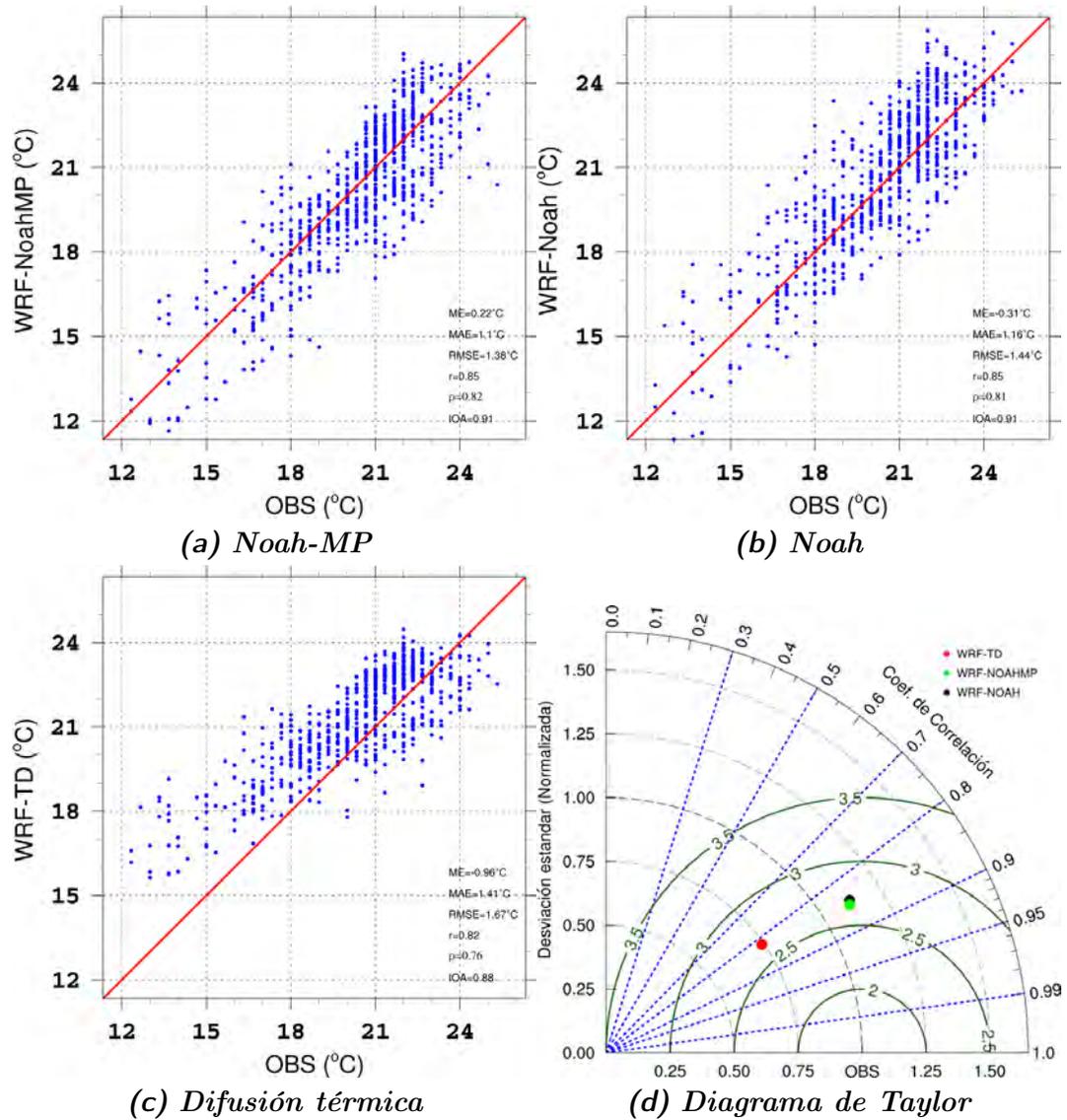
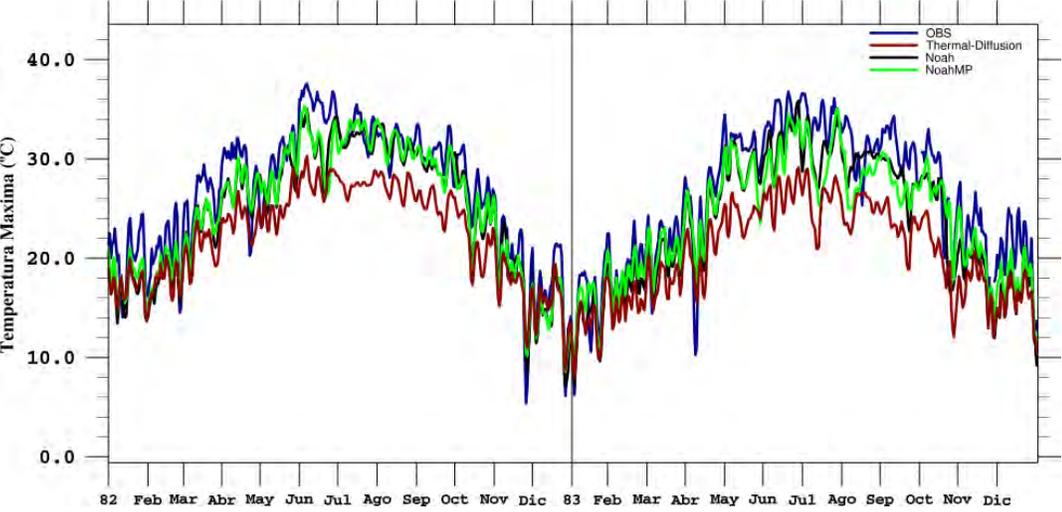


Fig. 6-29: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Champotón., Camp.

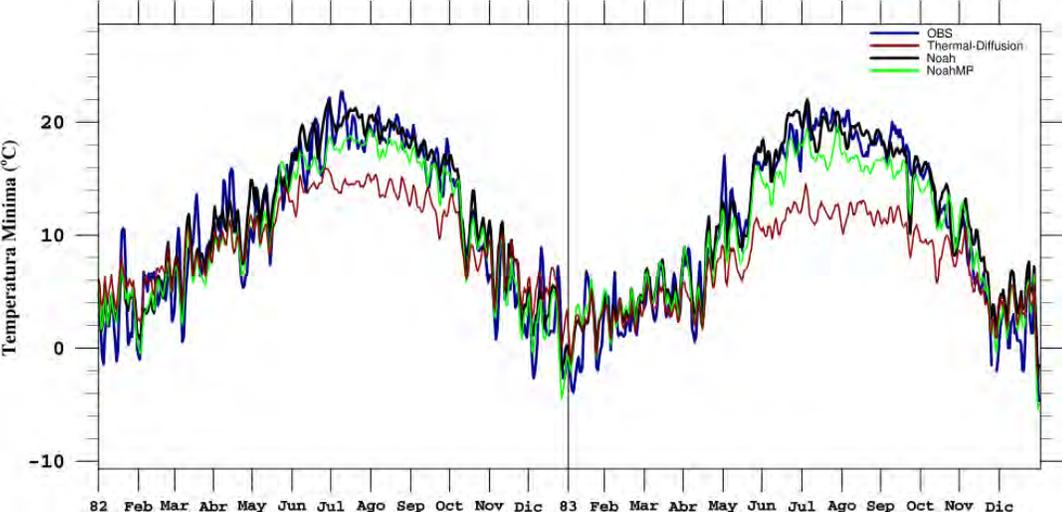


*Fig. 6-30: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Chamotón, Camp.*

C.E.M. Ciudad Deportiva.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-31: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación C.E.M. Ciudad Deportiva, Chih., durante 1982-1983.

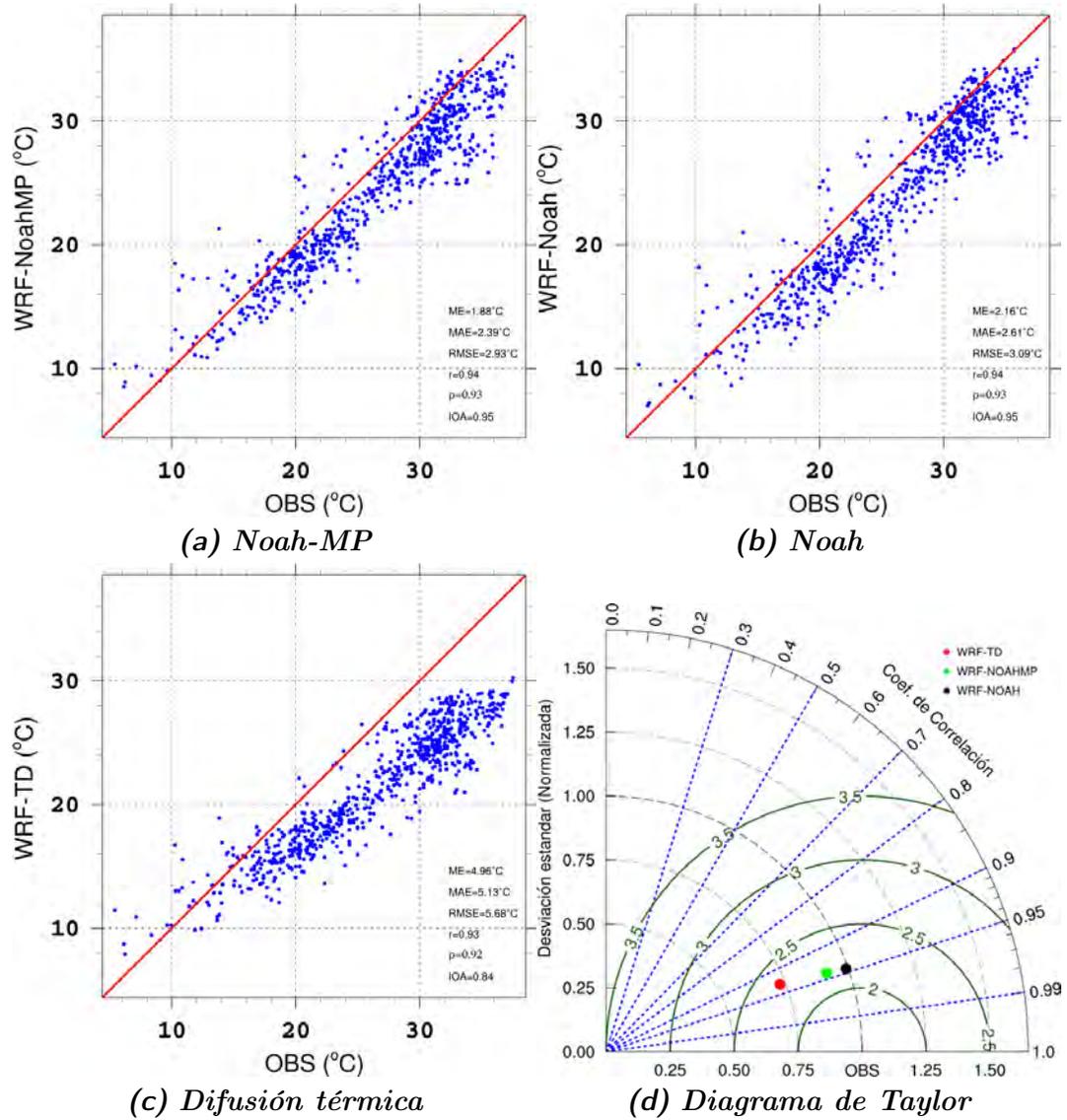
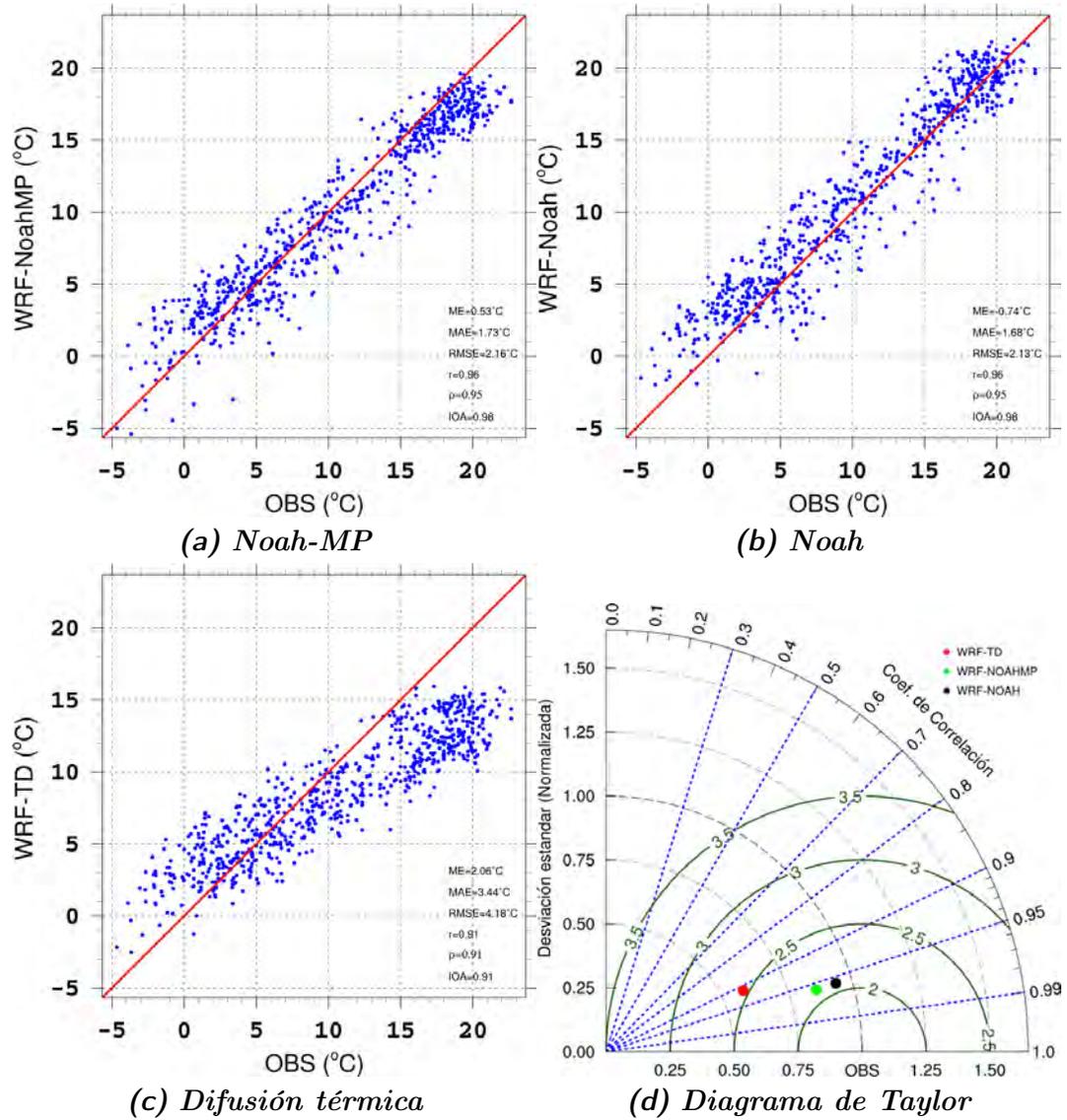
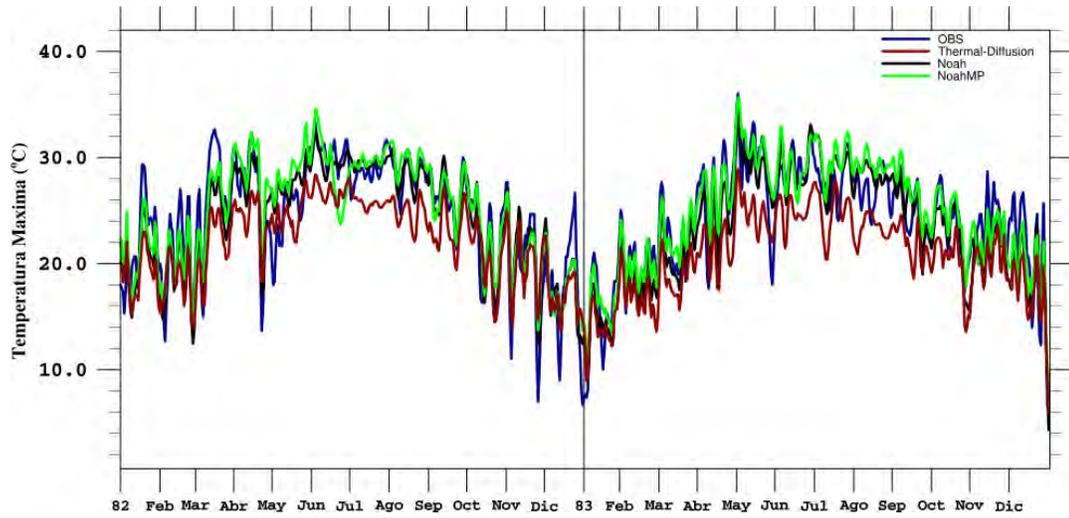


Fig. 6-32: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación C.E.M. Ciudad Deportiva, Chih.

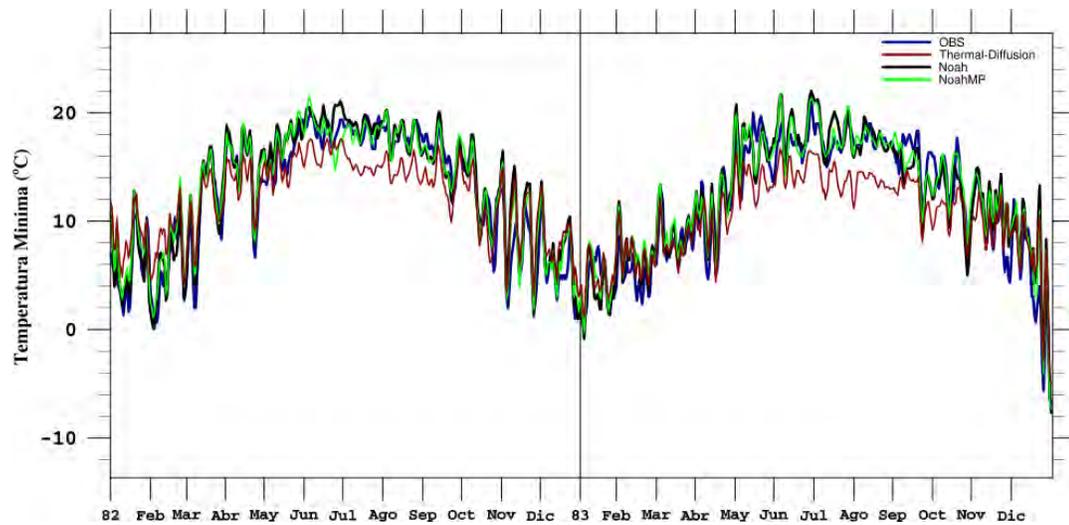


*Fig. 6-33: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación C.E.M. Ciudad Deportiva, Chih.*

Ramos Arizpe.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-34: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Ramos Arizpe., Coah., durante 1982-1983.

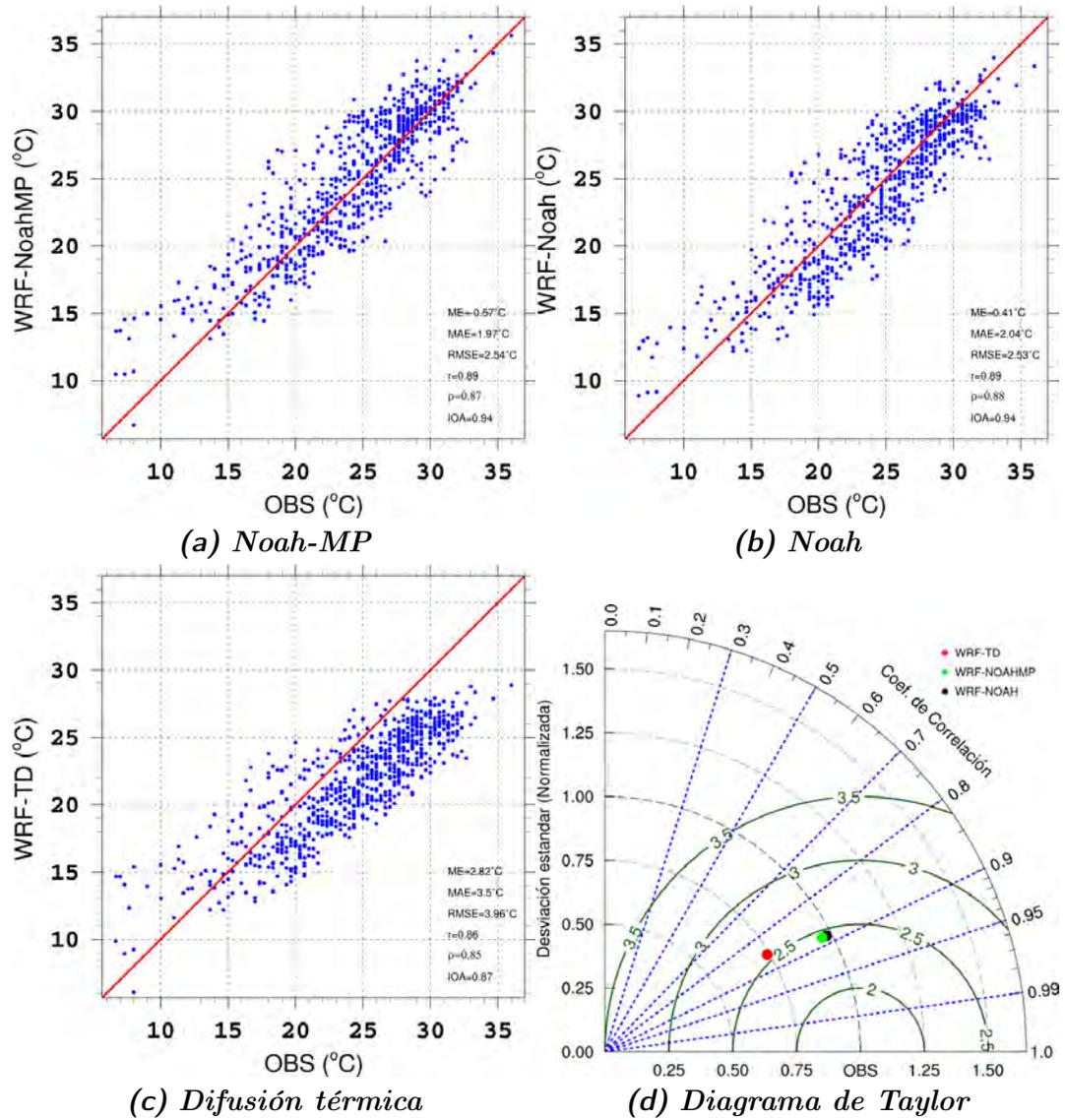
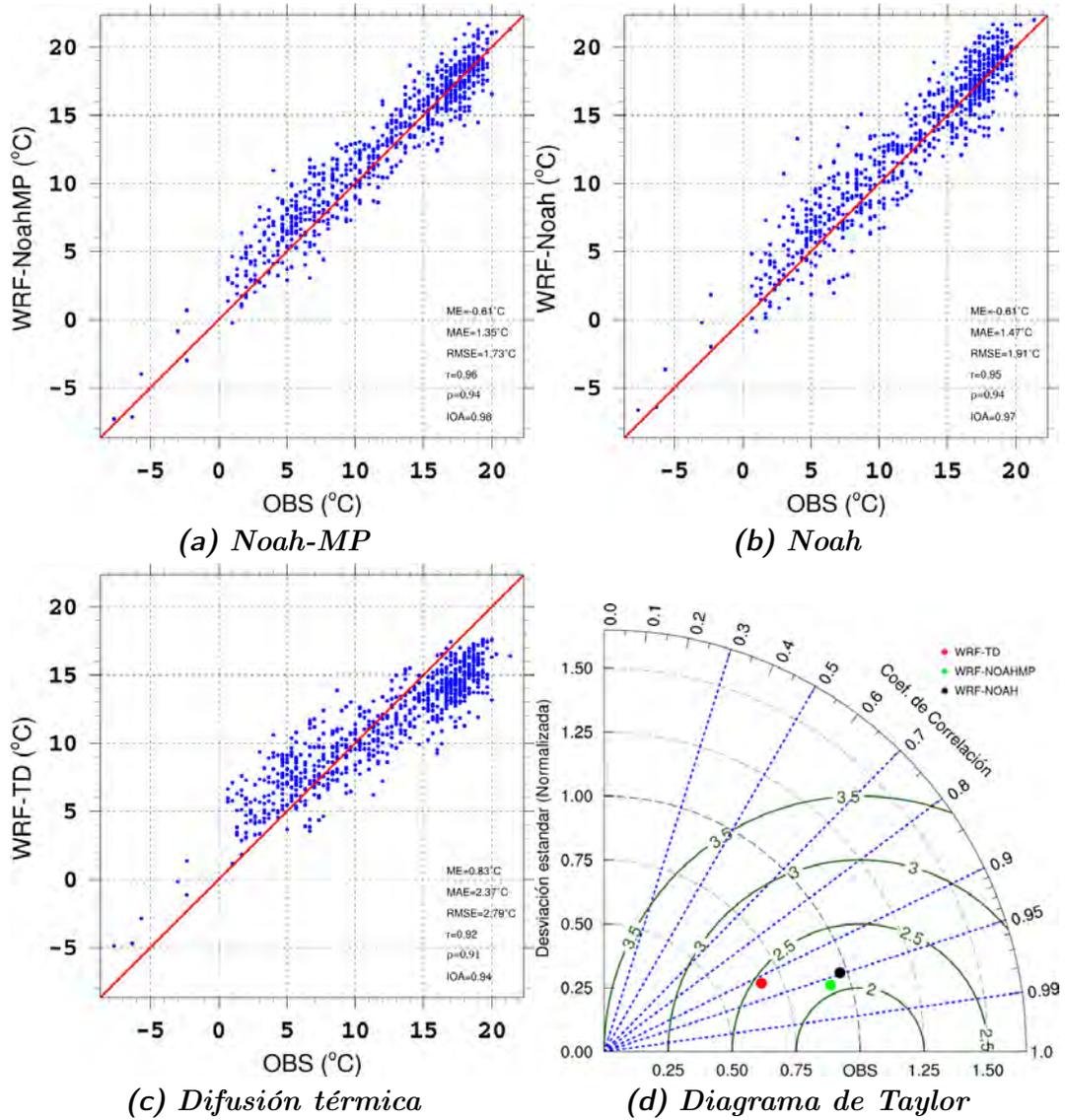
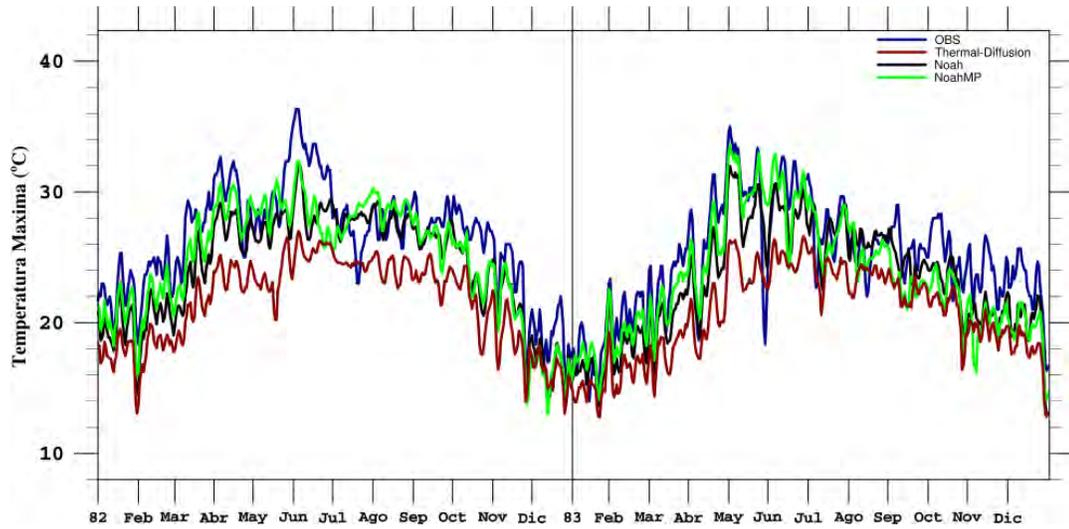


Fig. 6-35: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Ramos Arizpe., Coah.

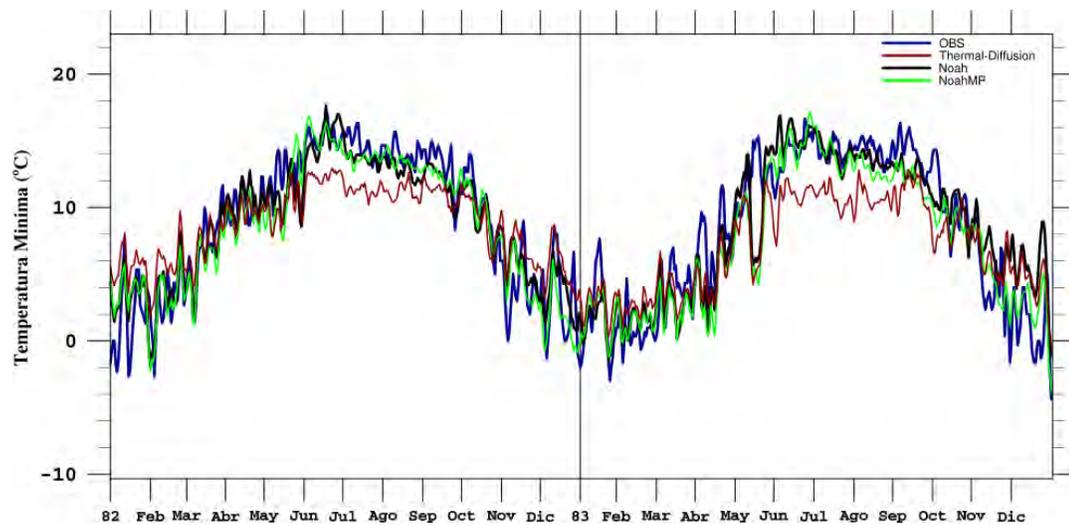


*Fig. 6-36: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Ramos Arizpe., Coah.*

Peña del Águila.

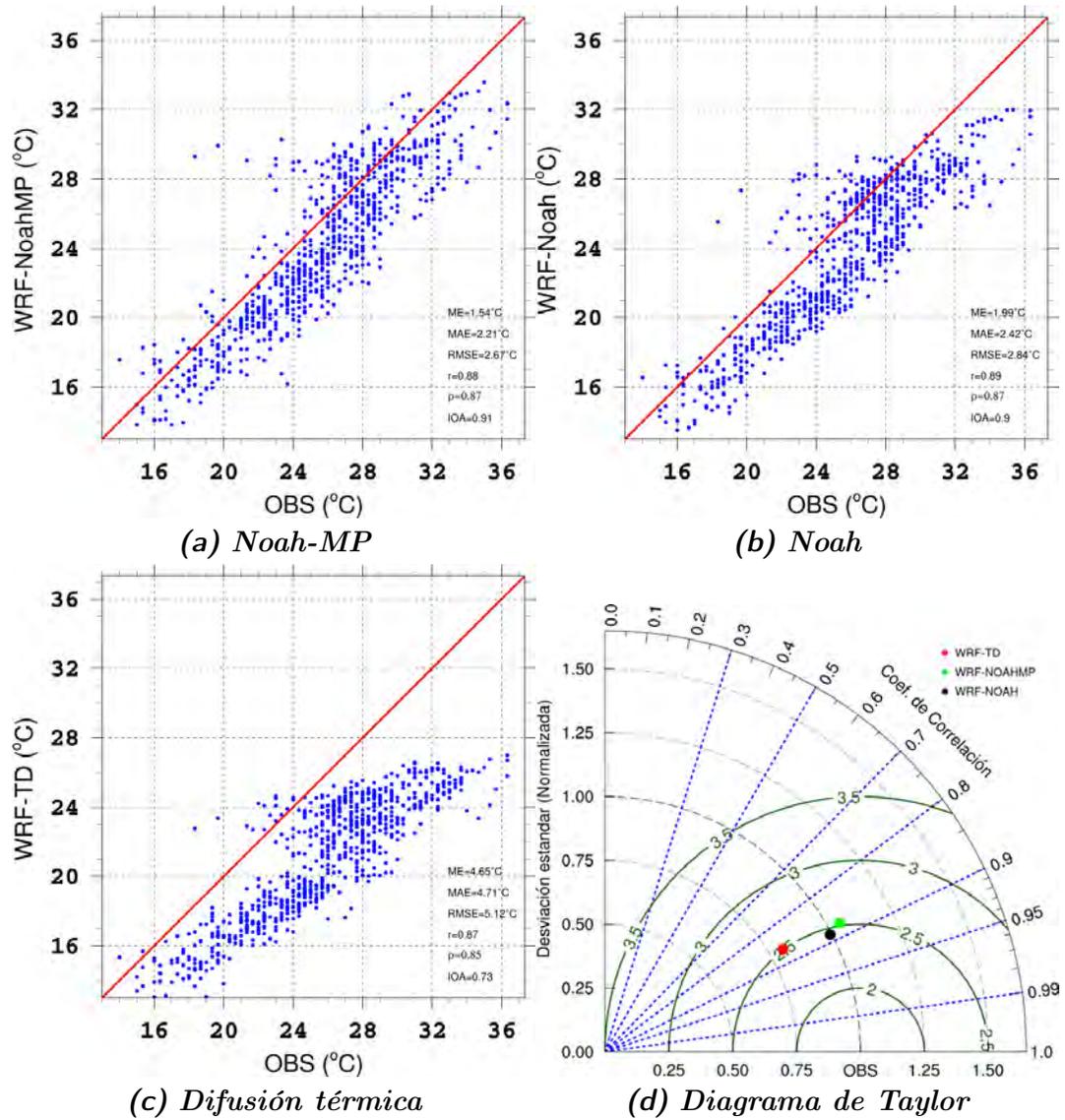


(a) *TMax*



(b) *TMin*

*Fig. 6-37: Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Peña del Águila, Dgo., durante 1982-1983.*



*Fig. 6-38: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Peña del Águila, Dgo.*

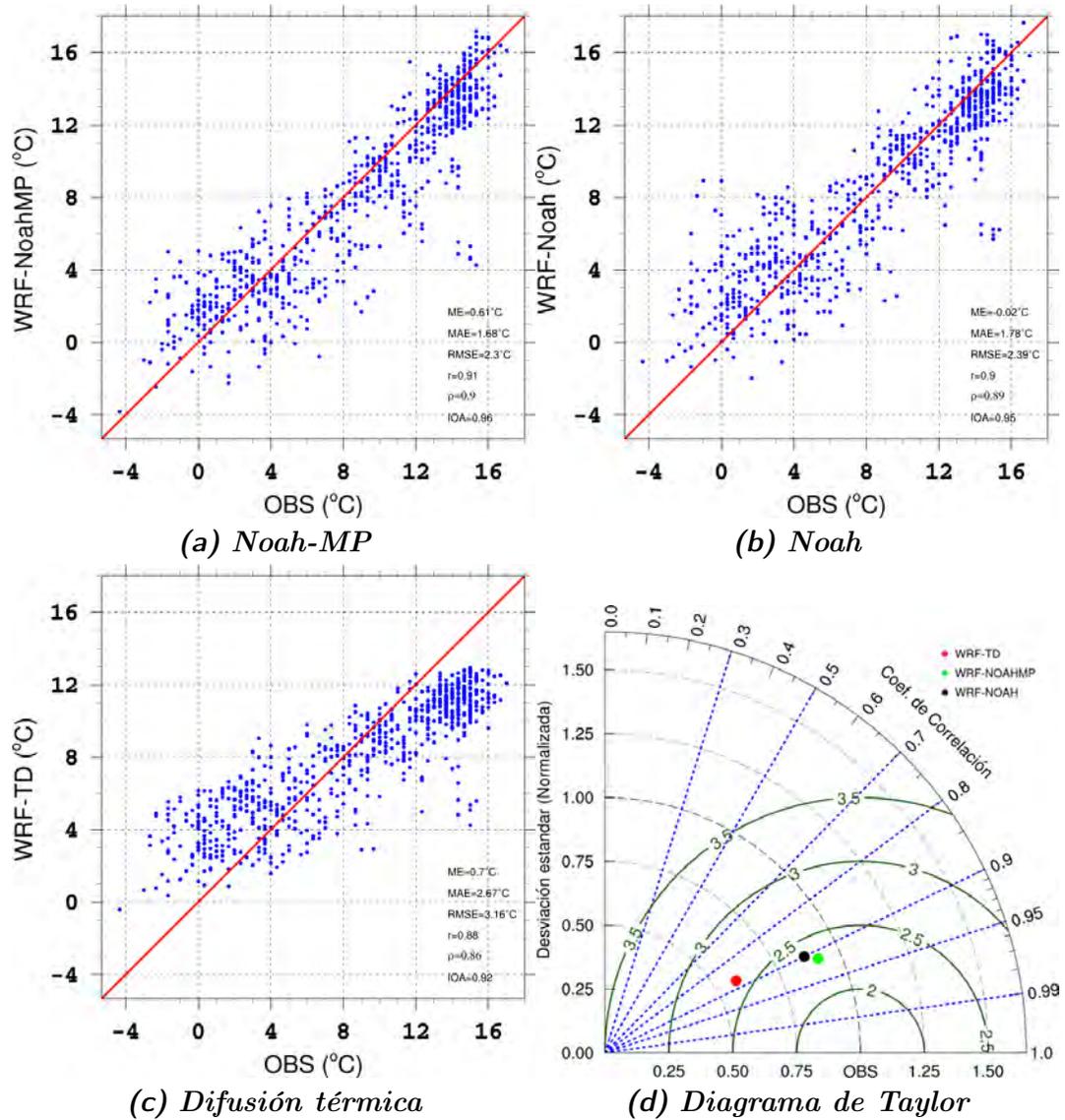
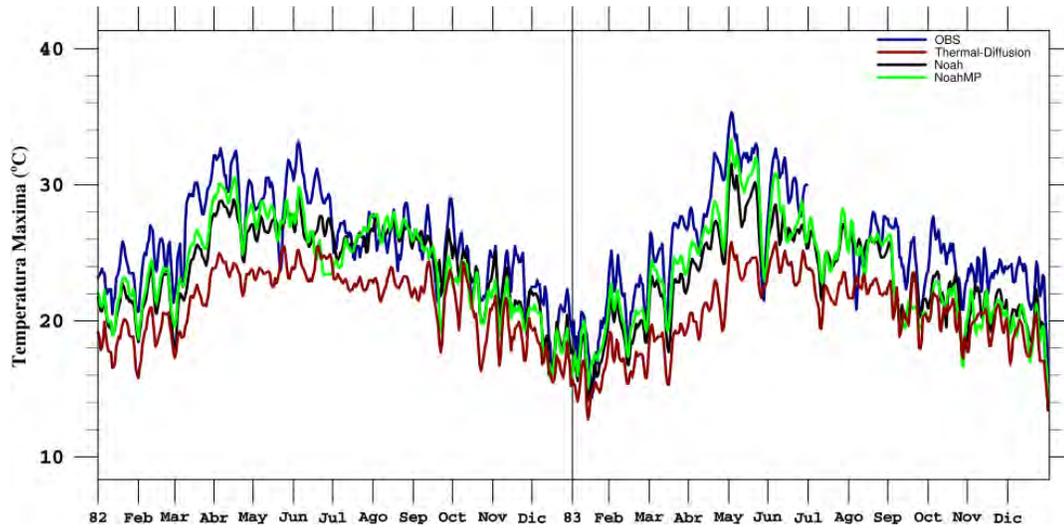
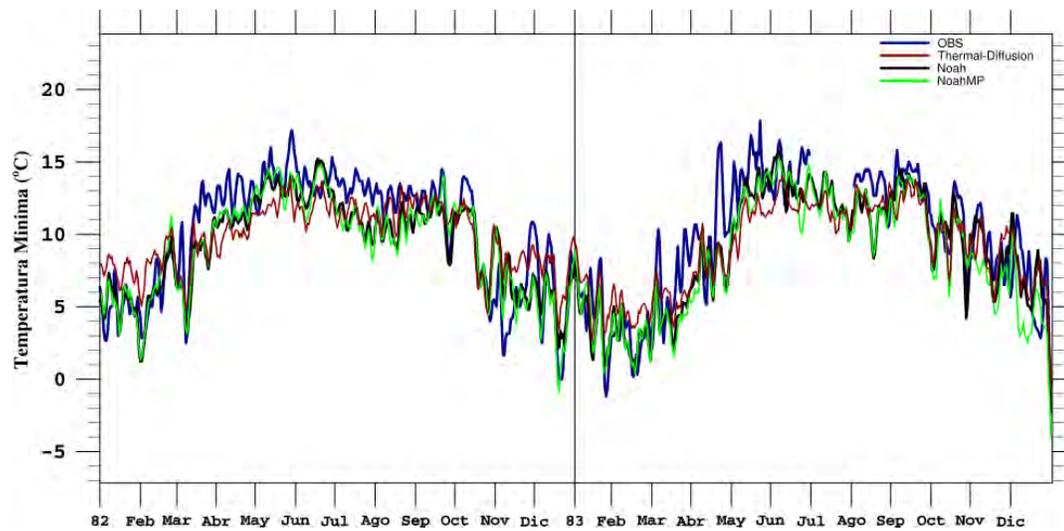


Fig. 6-39: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Peña del Águila, Dgo.

La Begoña.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-40: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación La Begoña, Gto., durante 1982-1983.

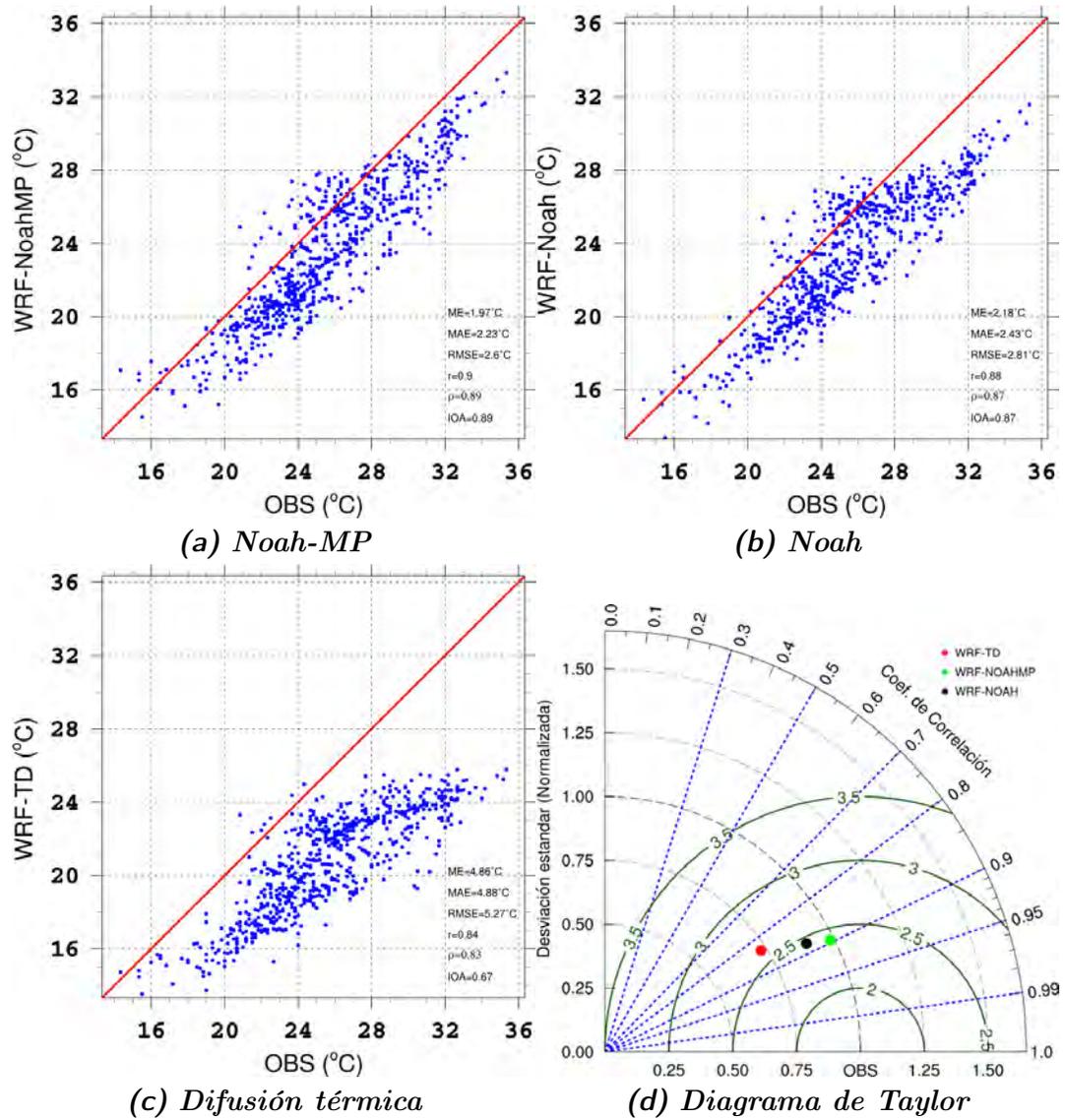


Fig. 6-41: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación La Beñoña, Gto.

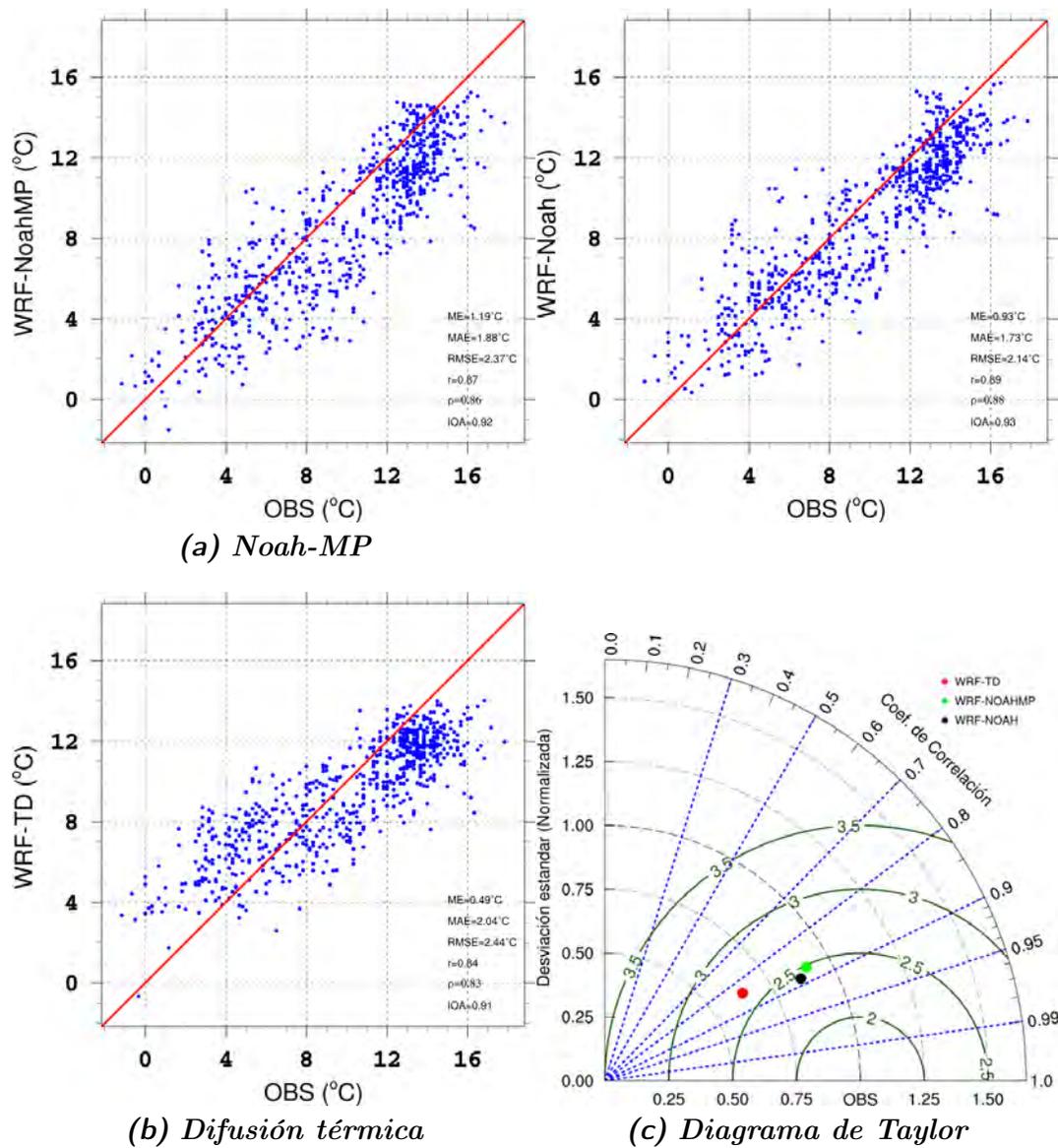
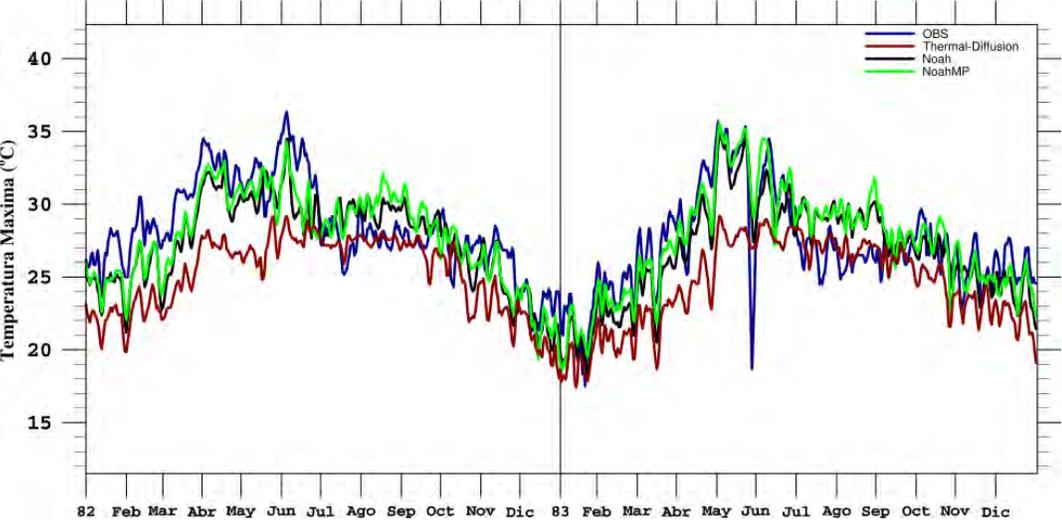
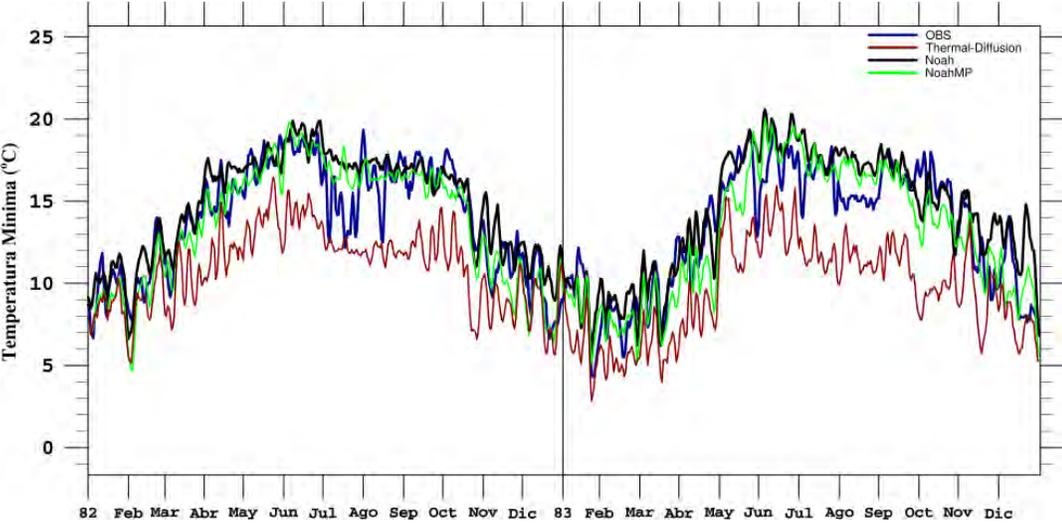


Fig. 6-42: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación La Beñoña, Gto.

Chapala.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-43: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Chapala, Jal., durante 1982-1983.

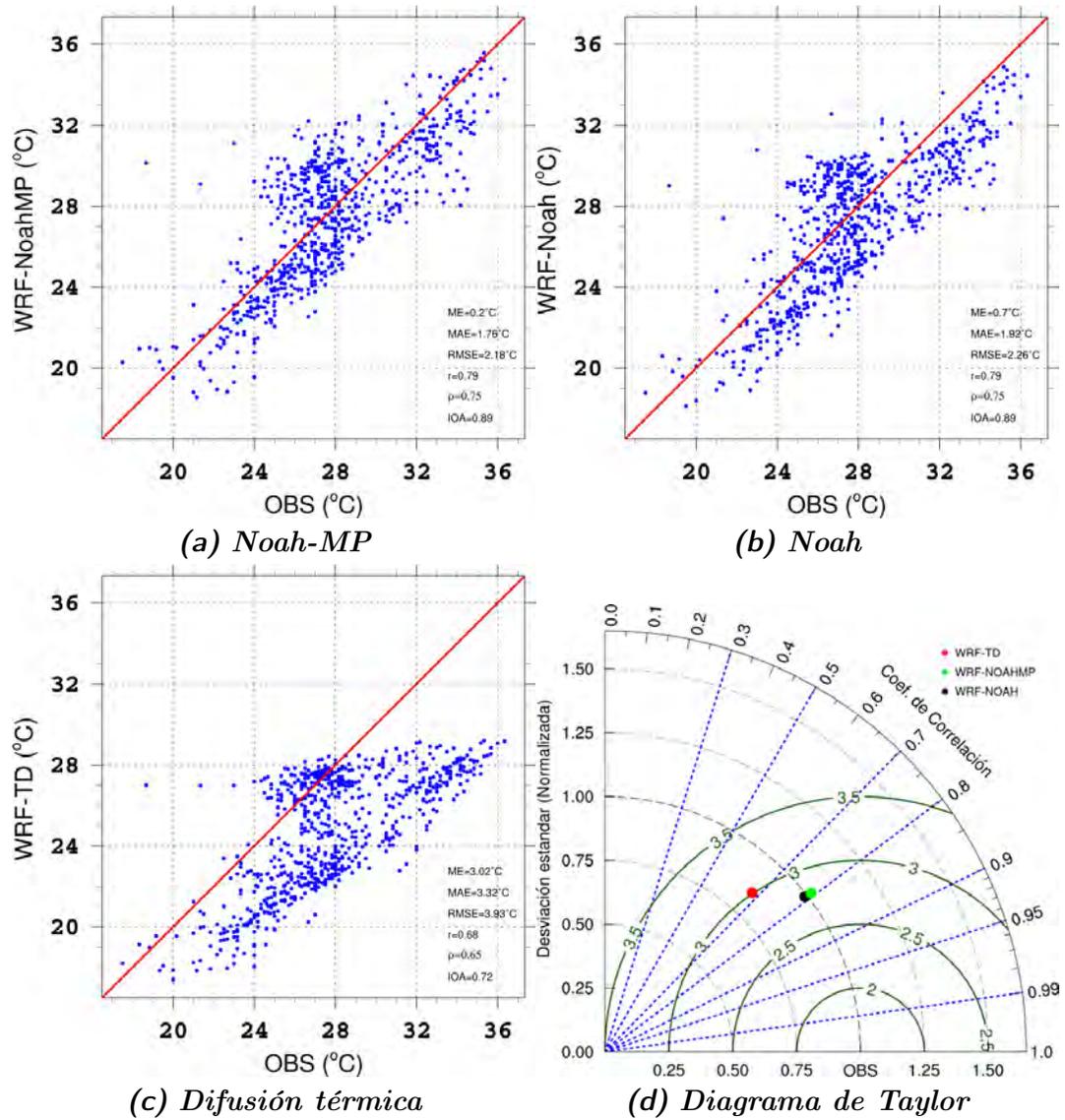


Fig. 6-44: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Chapala, Jal.

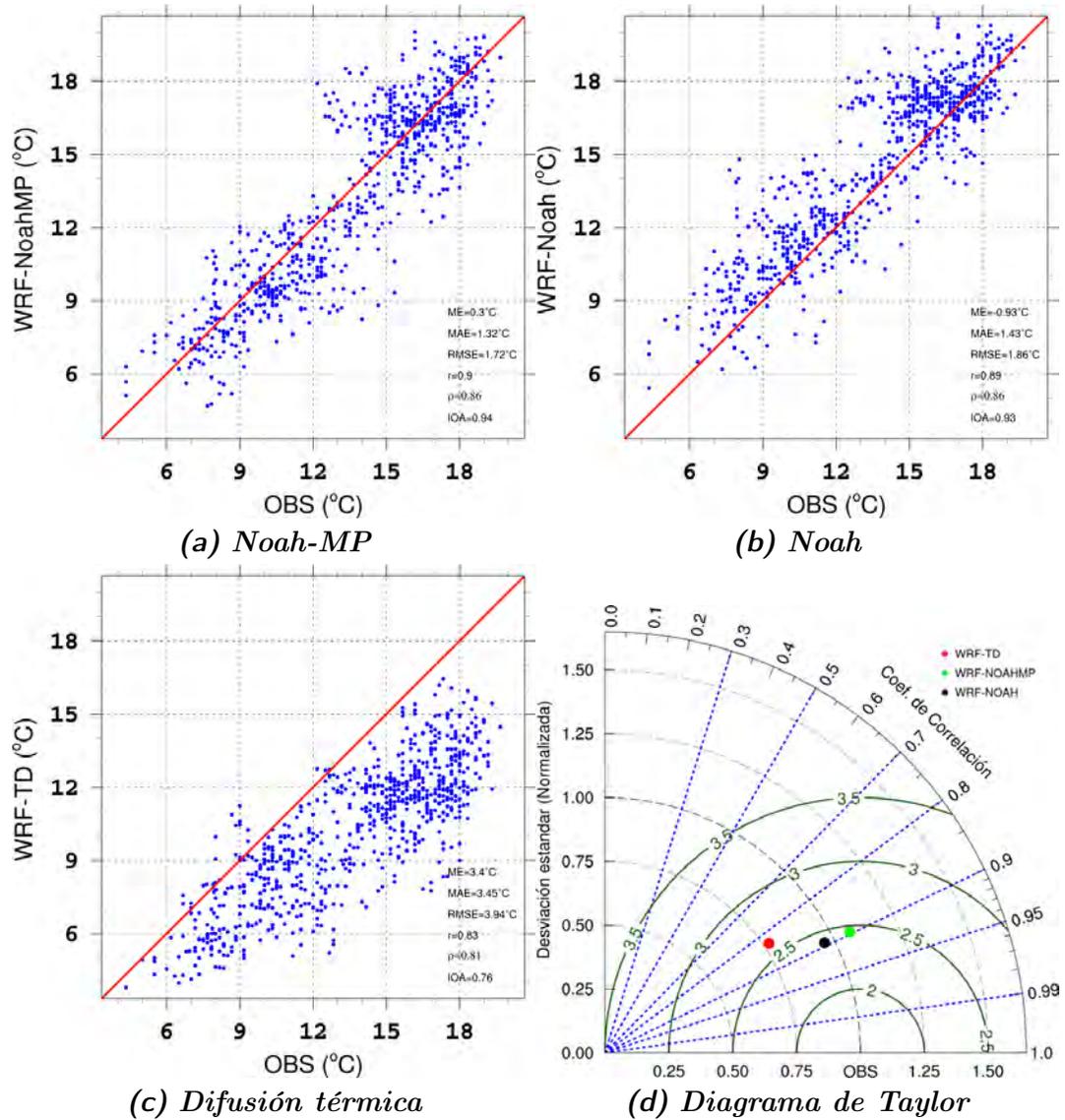
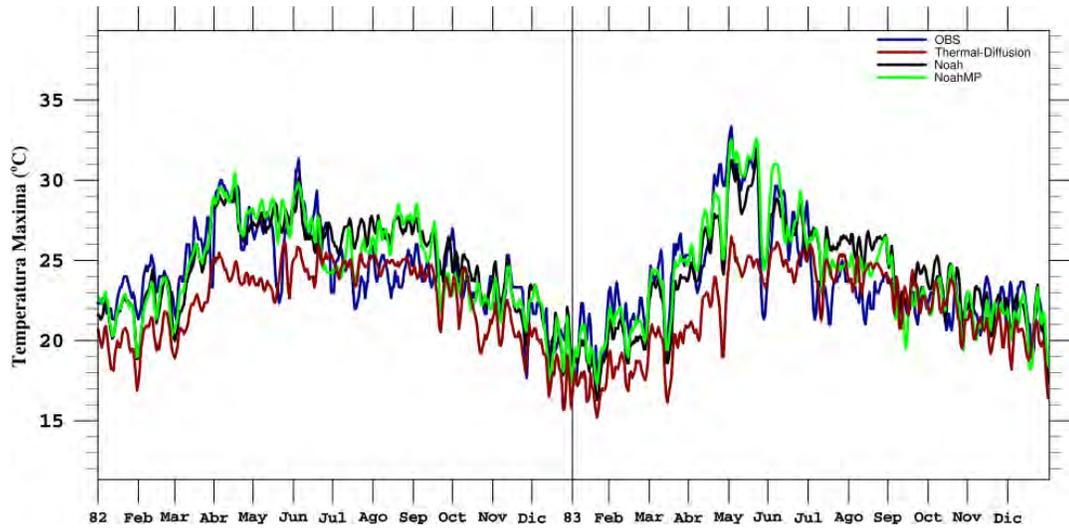
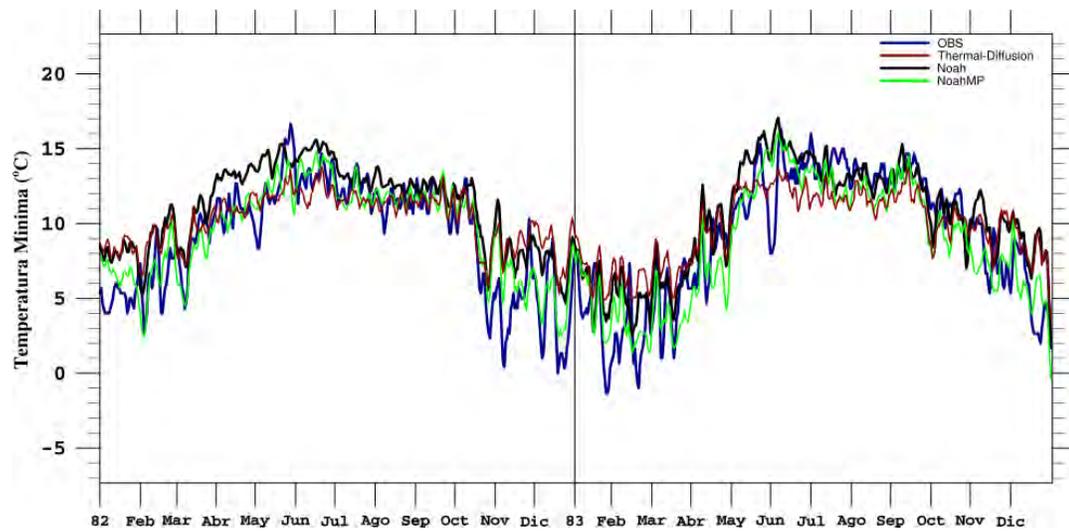


Fig. 6-45: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Chapala, Jal.

Antunez.

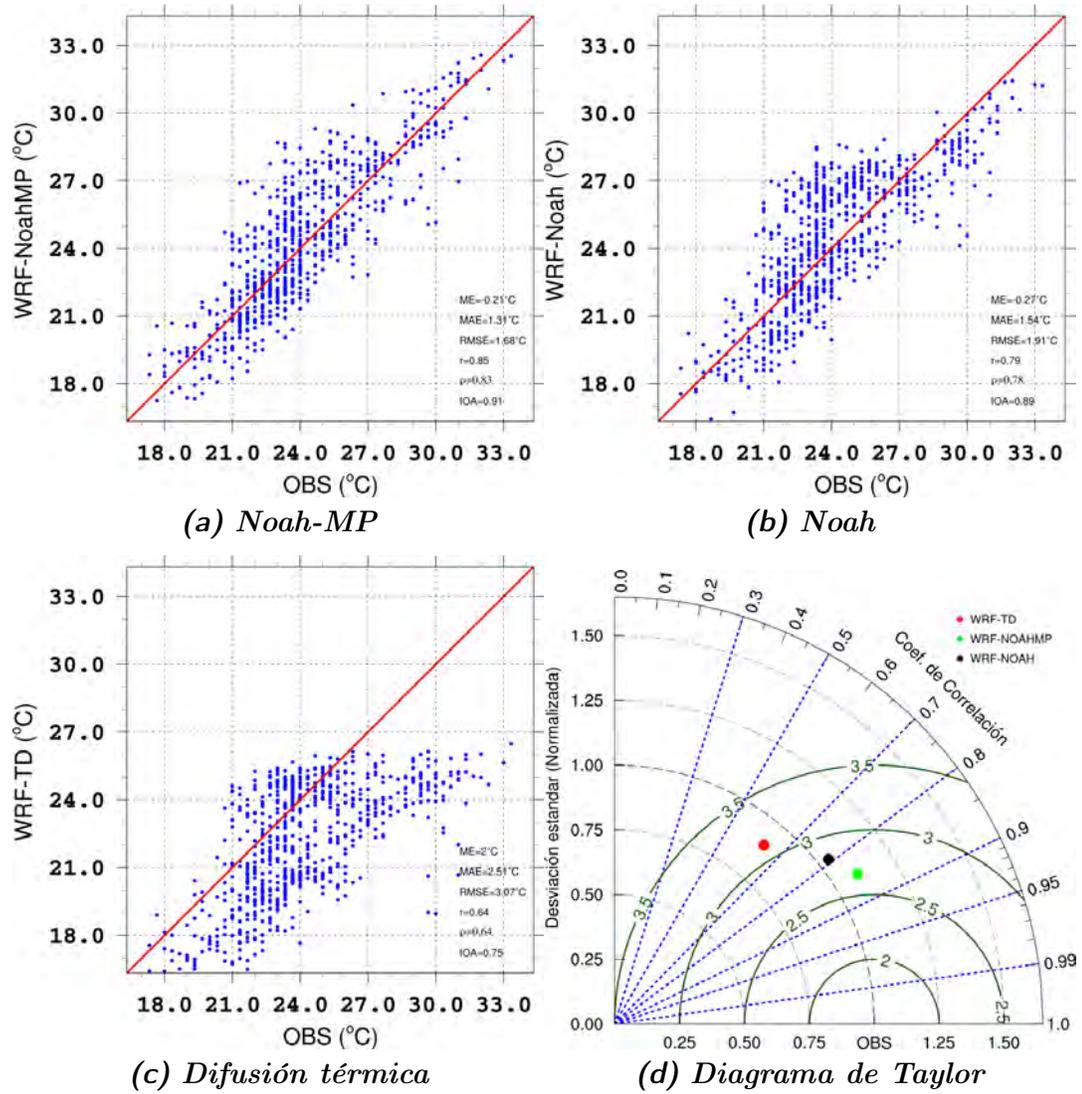


(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-46: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Antunez, Mich., durante 1982-1983.



*Fig. 6-47: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Antuñez, Mich.*

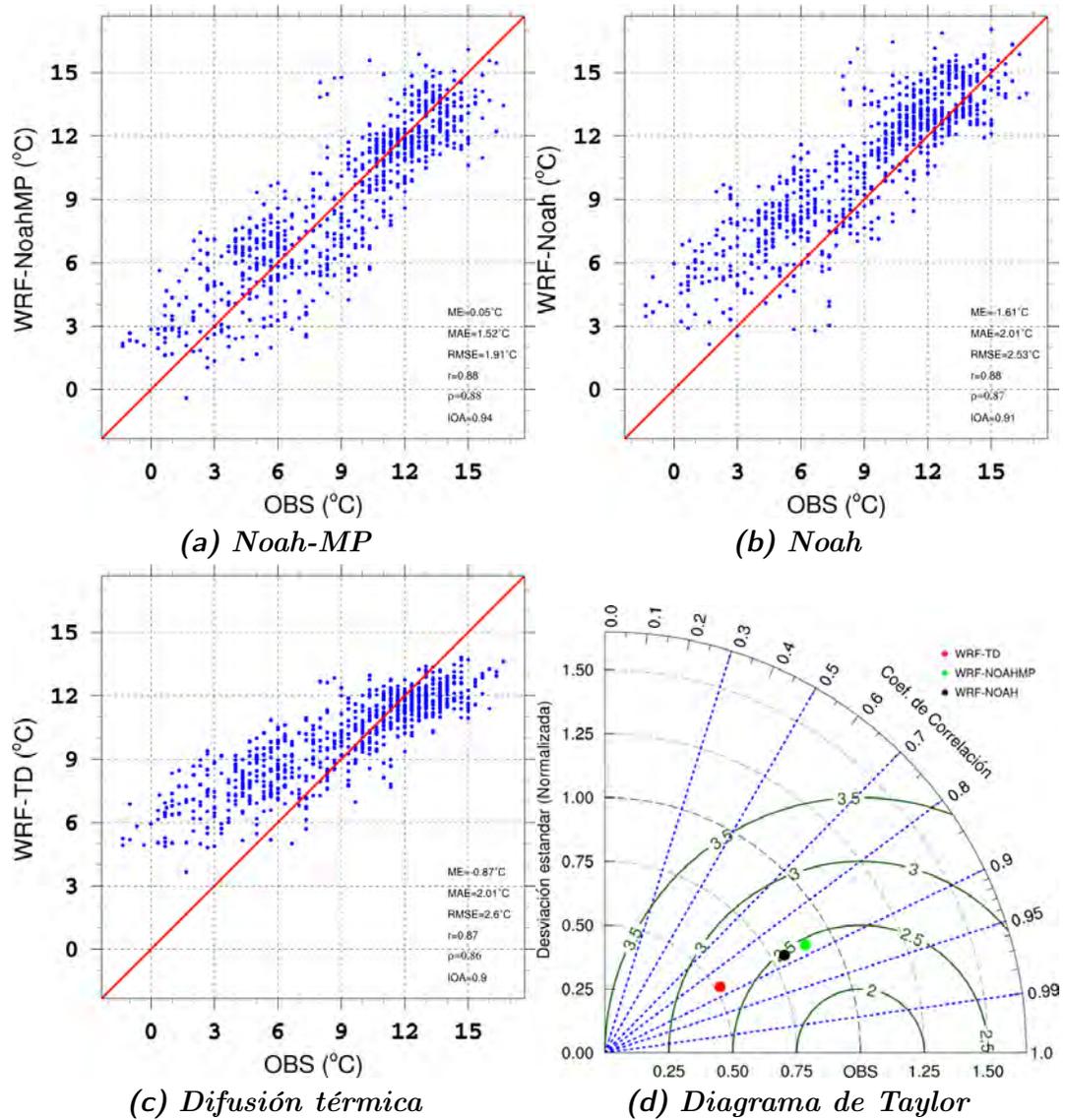
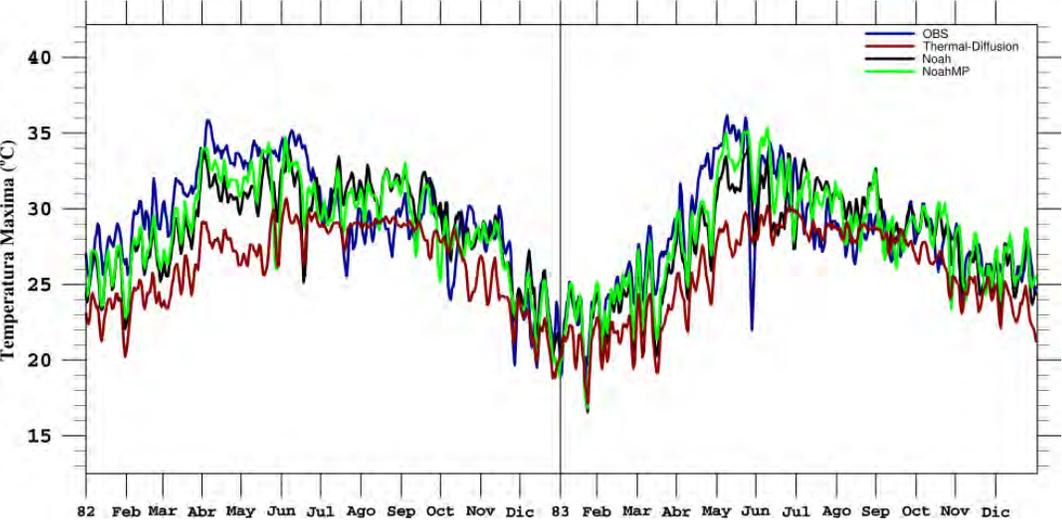
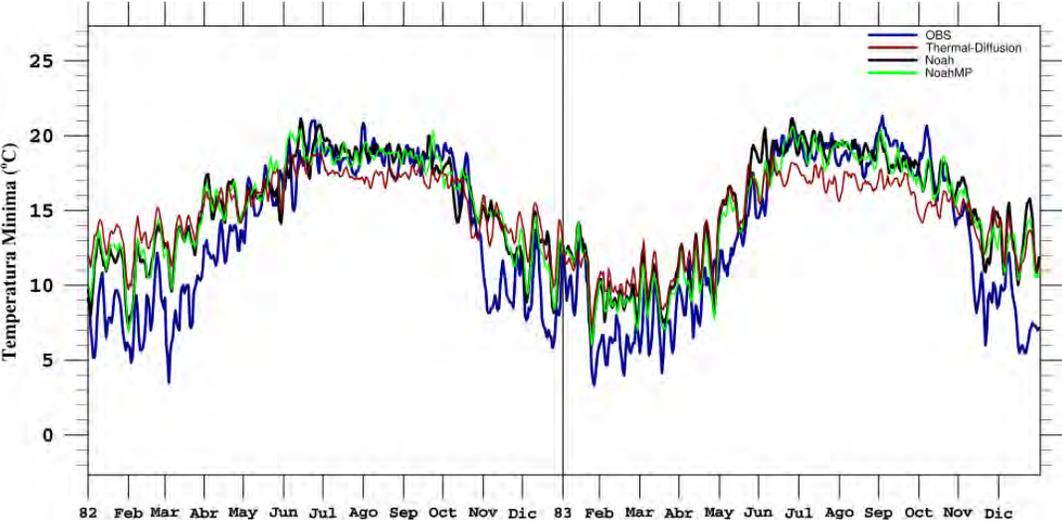


Fig. 6-48: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) *Noah-MP*, (b) *Noah* y (c) *Difusión térmica*, y (d) *Diagrama de Taylor* comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Antuñez, Mich.

Cerro Blanco.

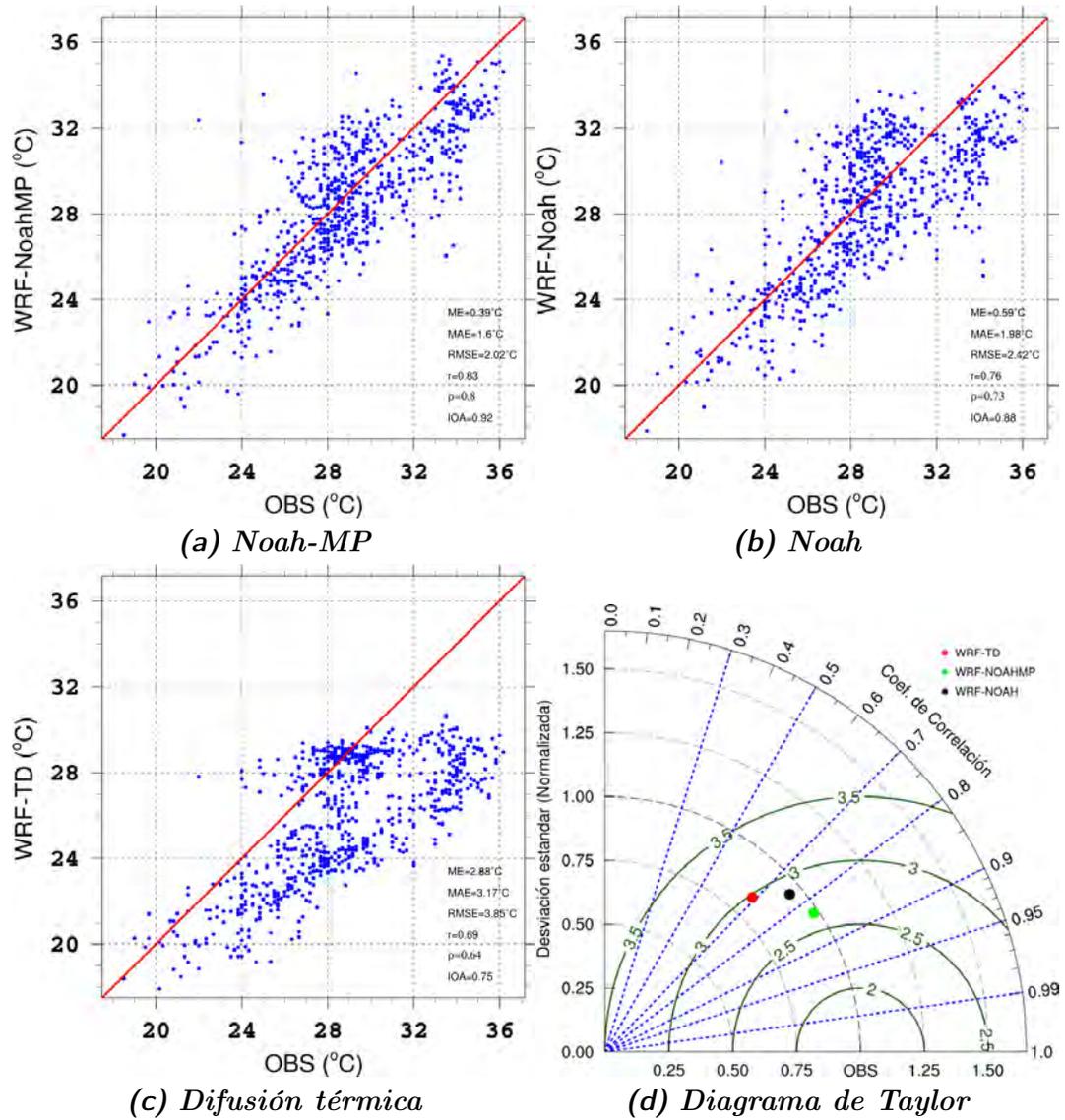


(a) *TMax*

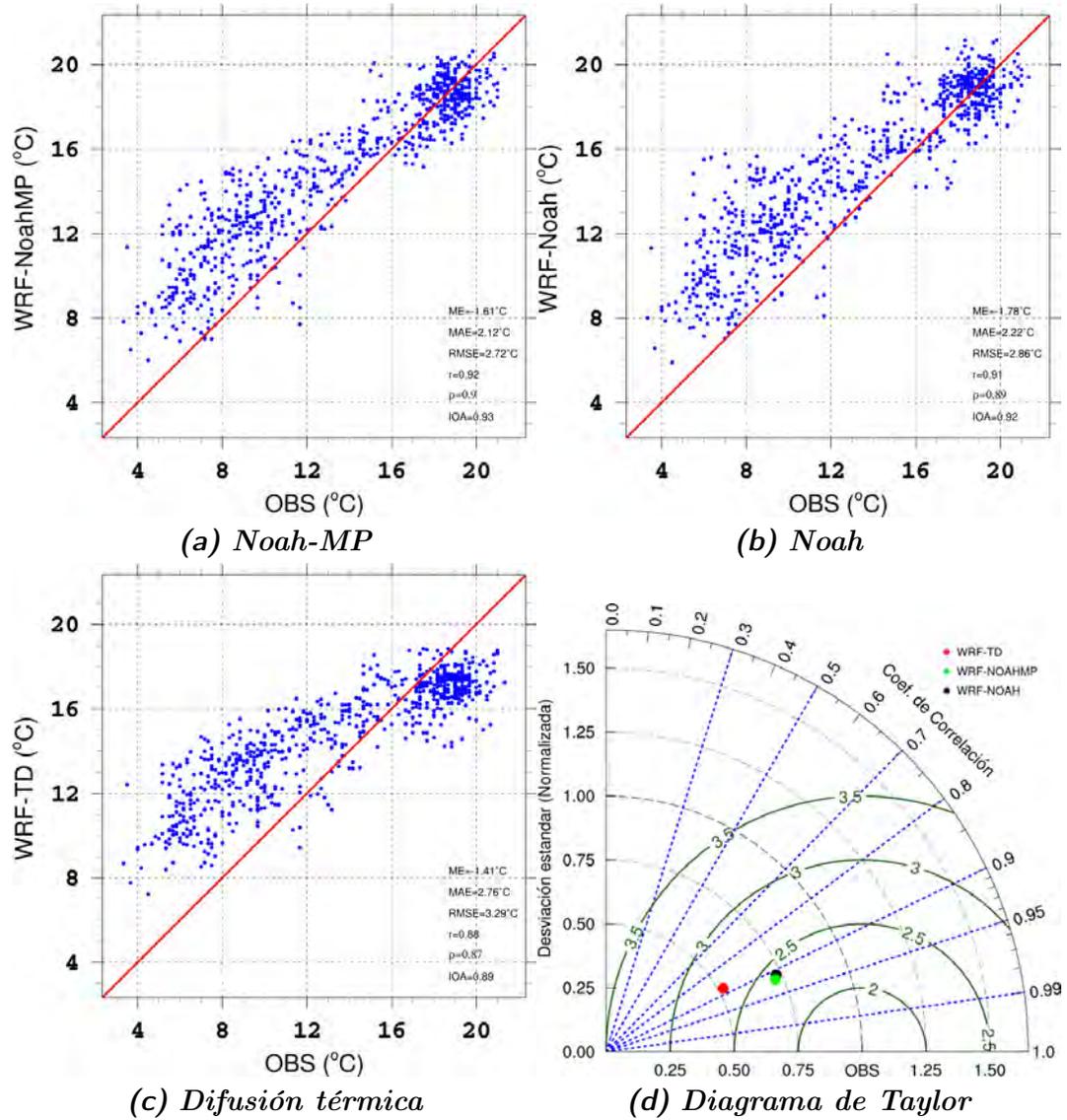


(b) *TMin*

Fig. 6-49: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Cerro Blanco, Nay., durante 1982-1983.

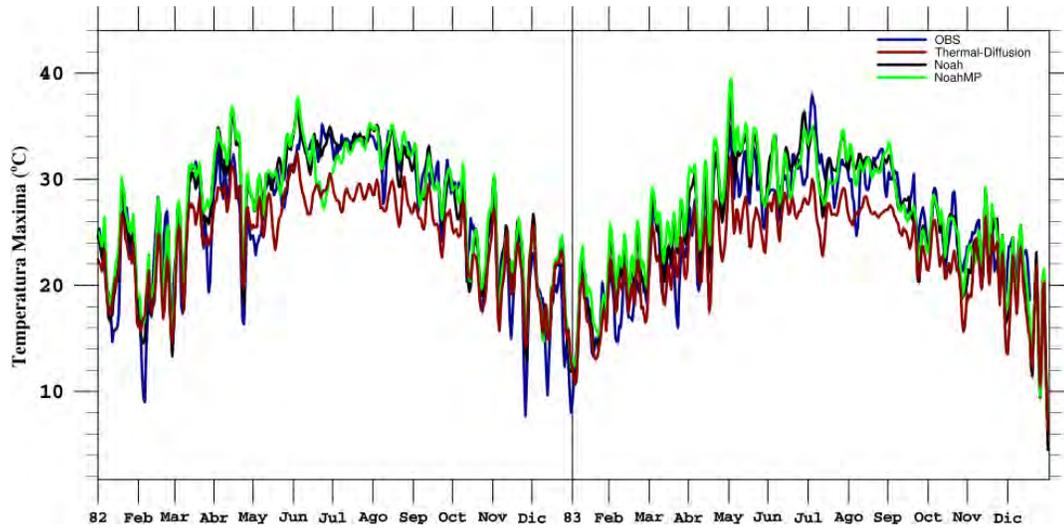


*Fig. 6-50: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Cerro Blanco, Nay.*

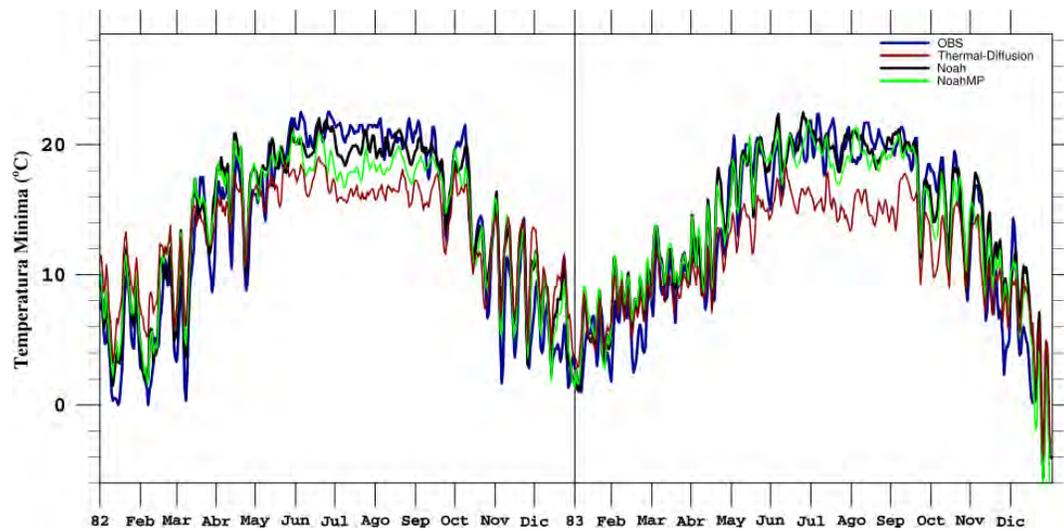


*Fig. 6-51: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Cerro Blanco, Nay.*

Icamole.

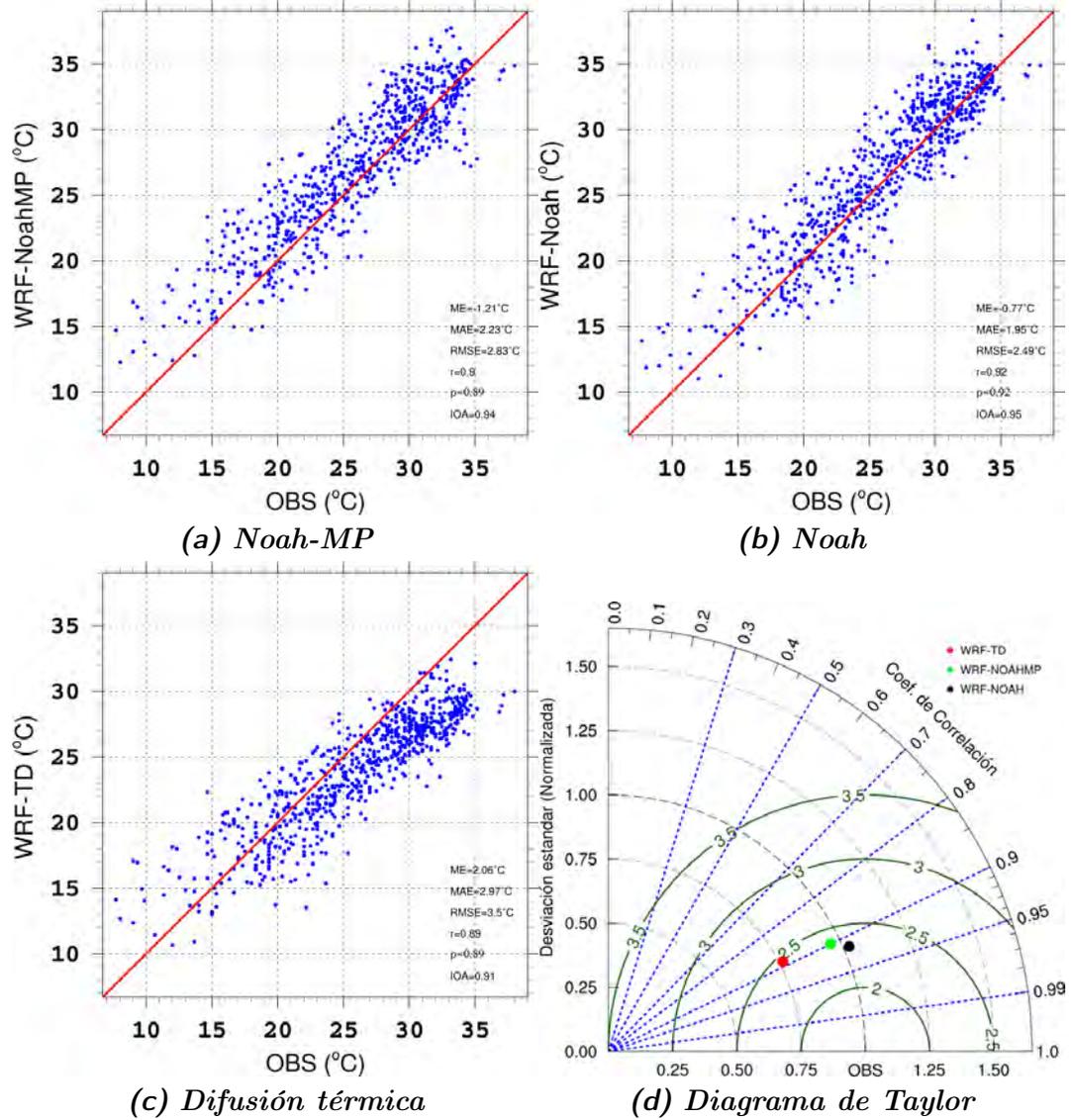


(a) *TMax*



(b) *TMin*

*Fig. 6-52: Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación Icamole, N.L., durante 1982-1983.*



*Fig. 6-53: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Icamole, N.L.*

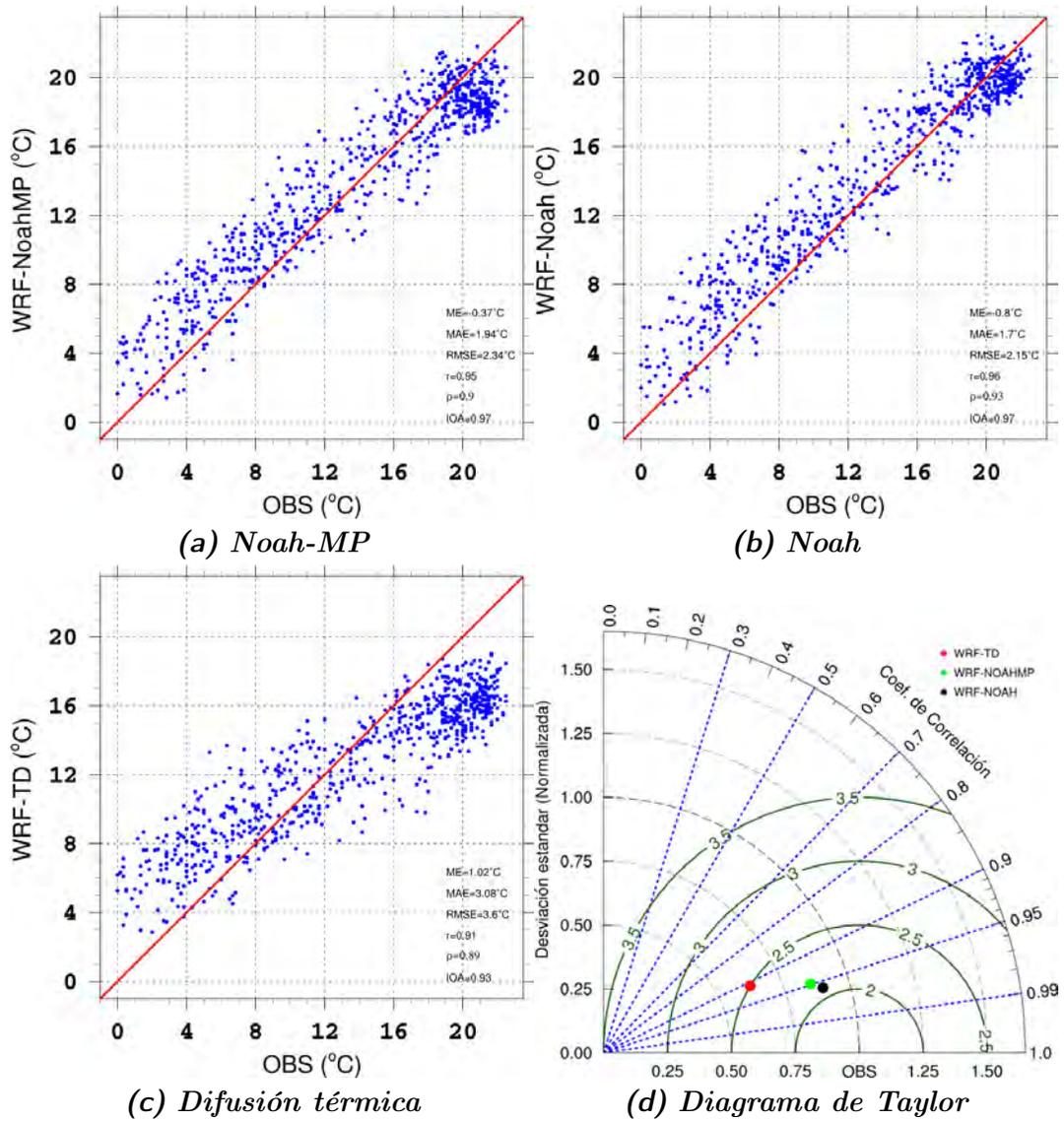
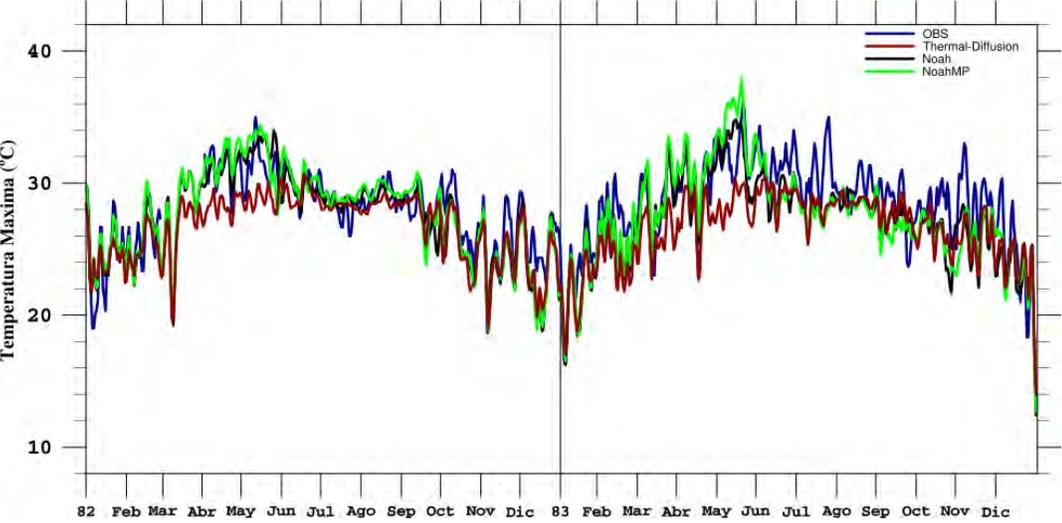
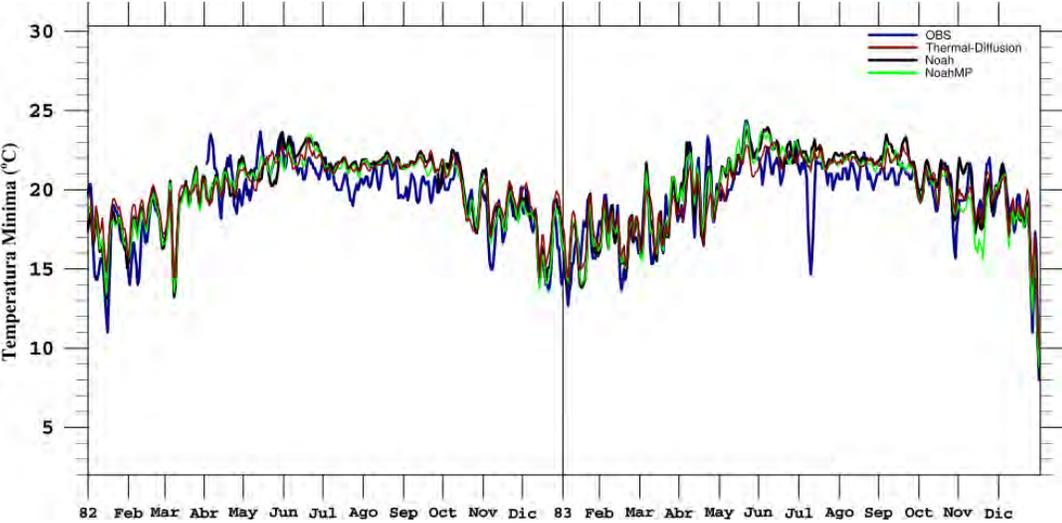


Fig. 6-54: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Icamole, N.L.

Cofradia.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-55: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Cofradia, Oax., durante 1982-1983.

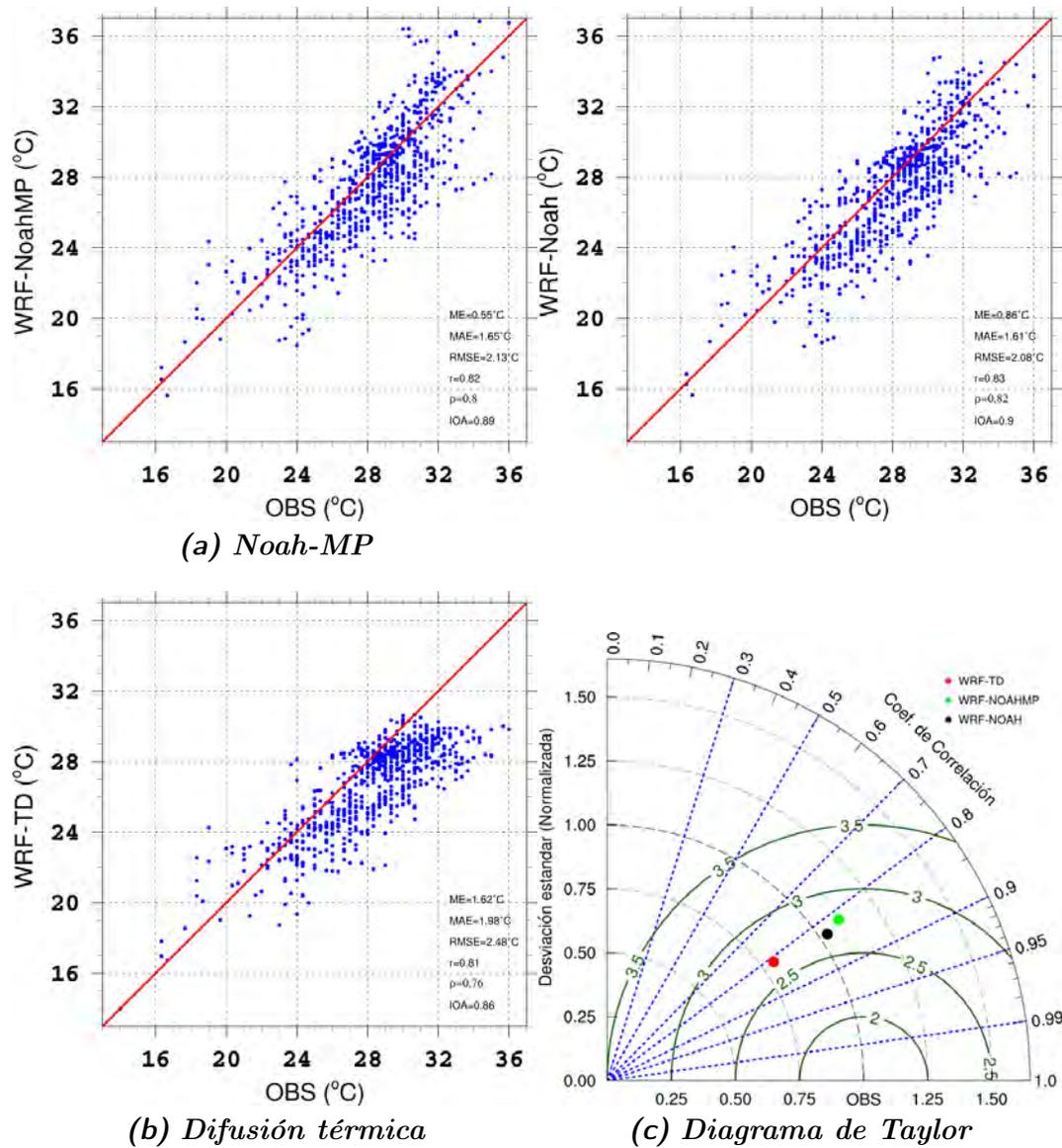


Fig. 6-56: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Cofradía, Oax.

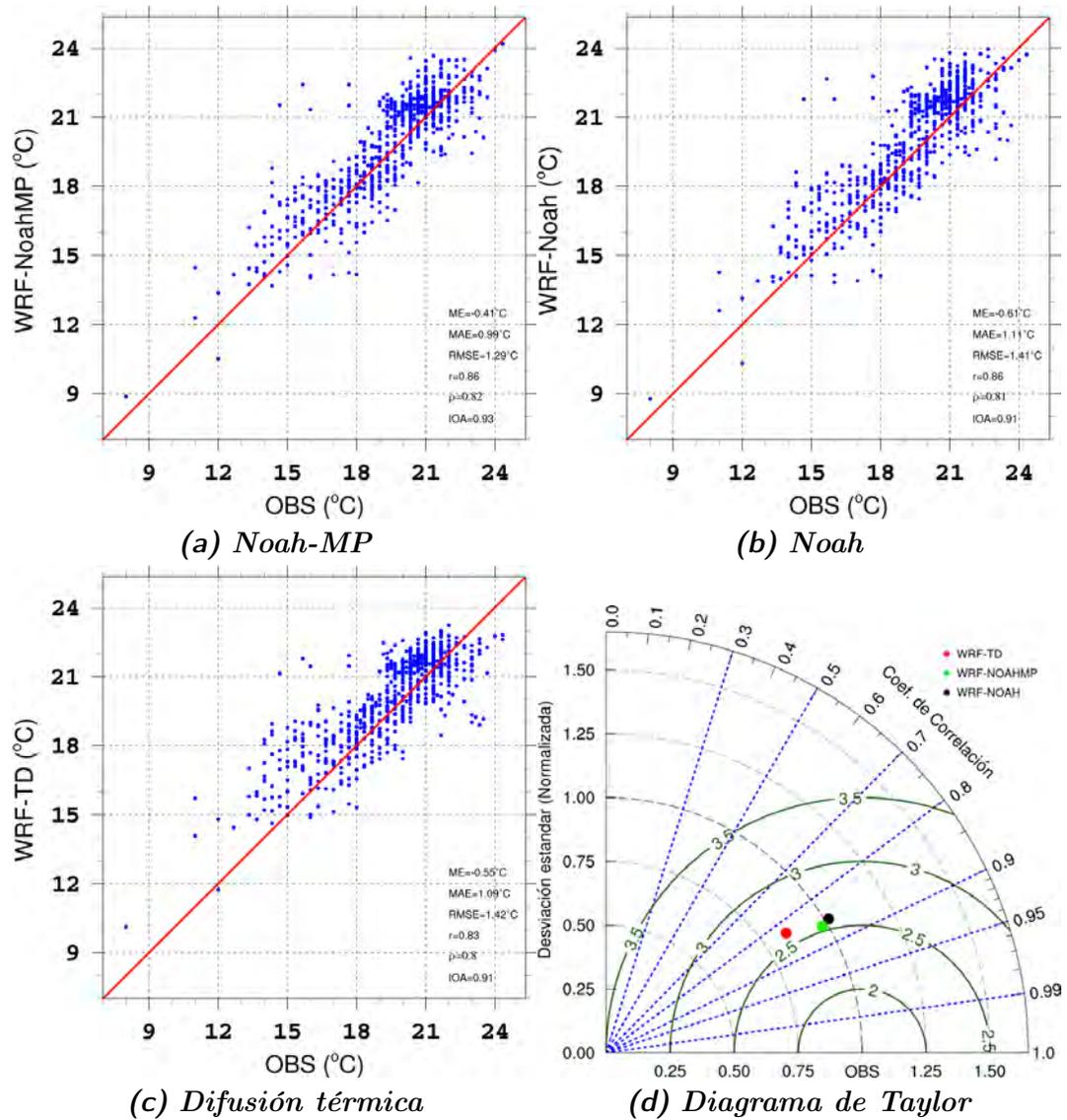
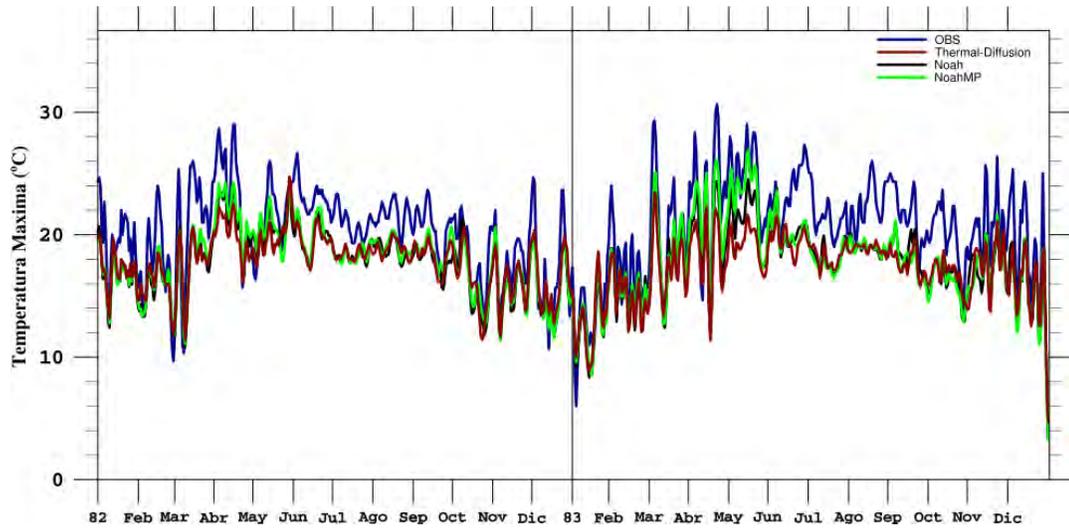
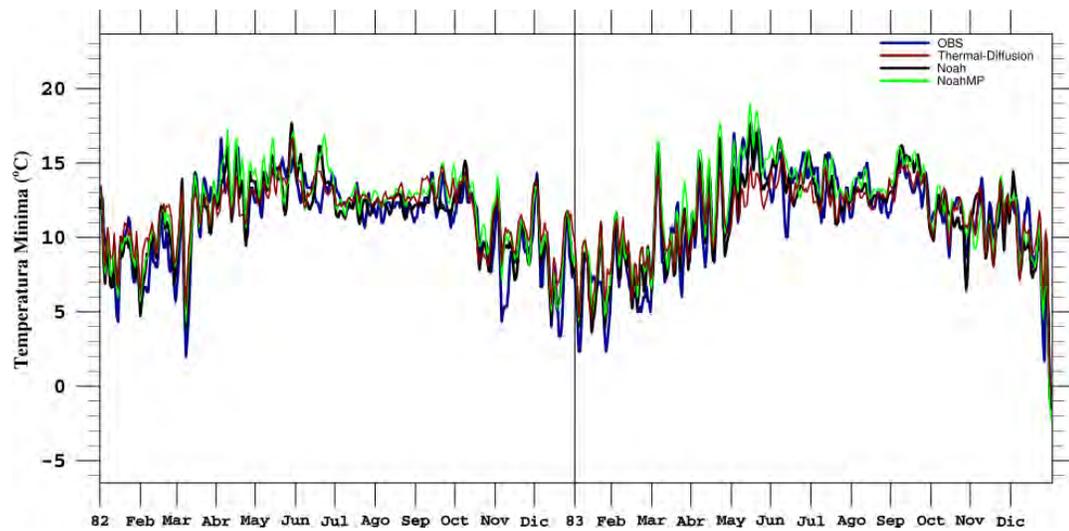


Fig. 6-57: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Cofradía, Oax.

Huahuaxtla.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-58: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Huahuaxtla, Pue., durante 1982-1983.

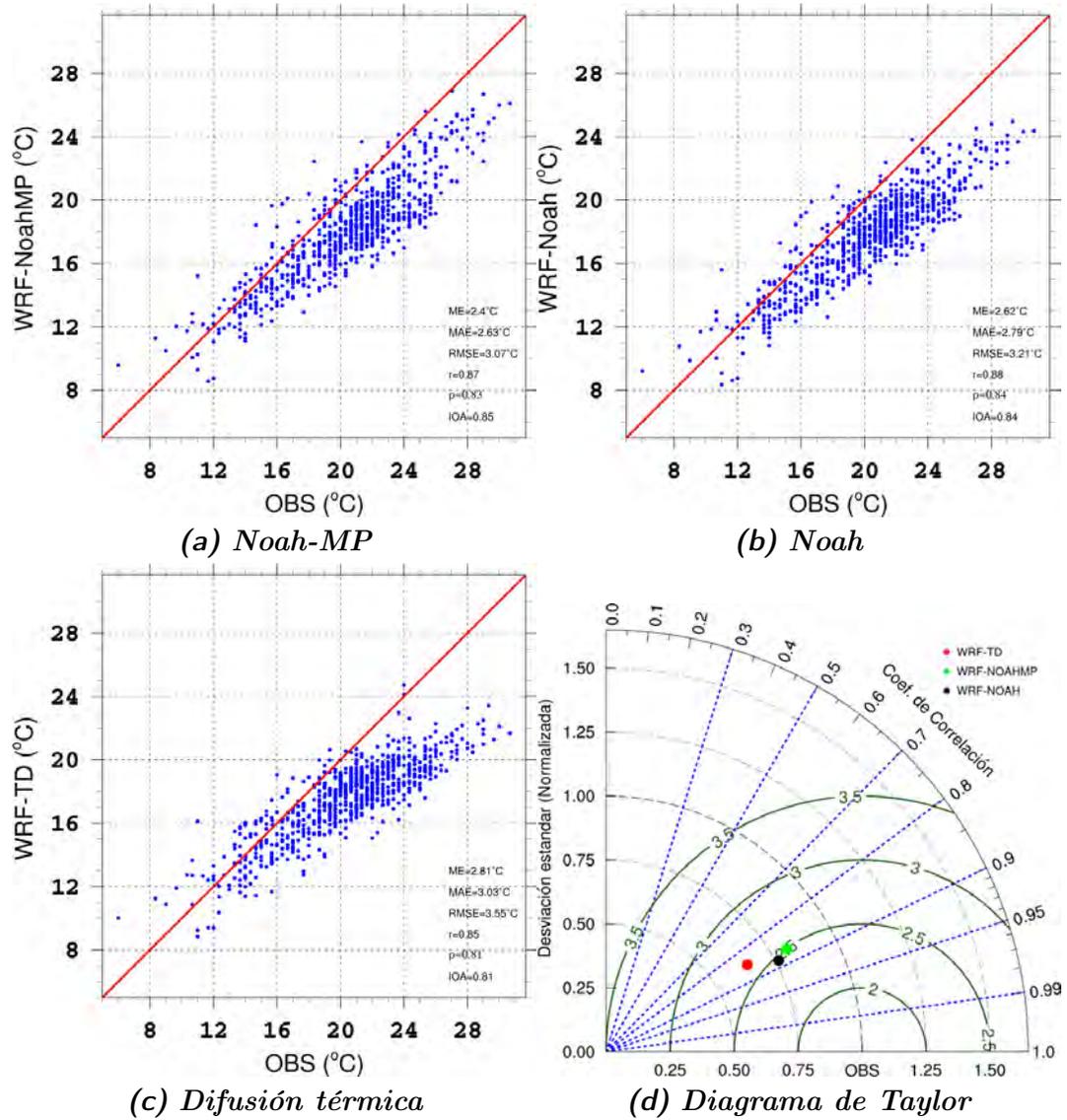
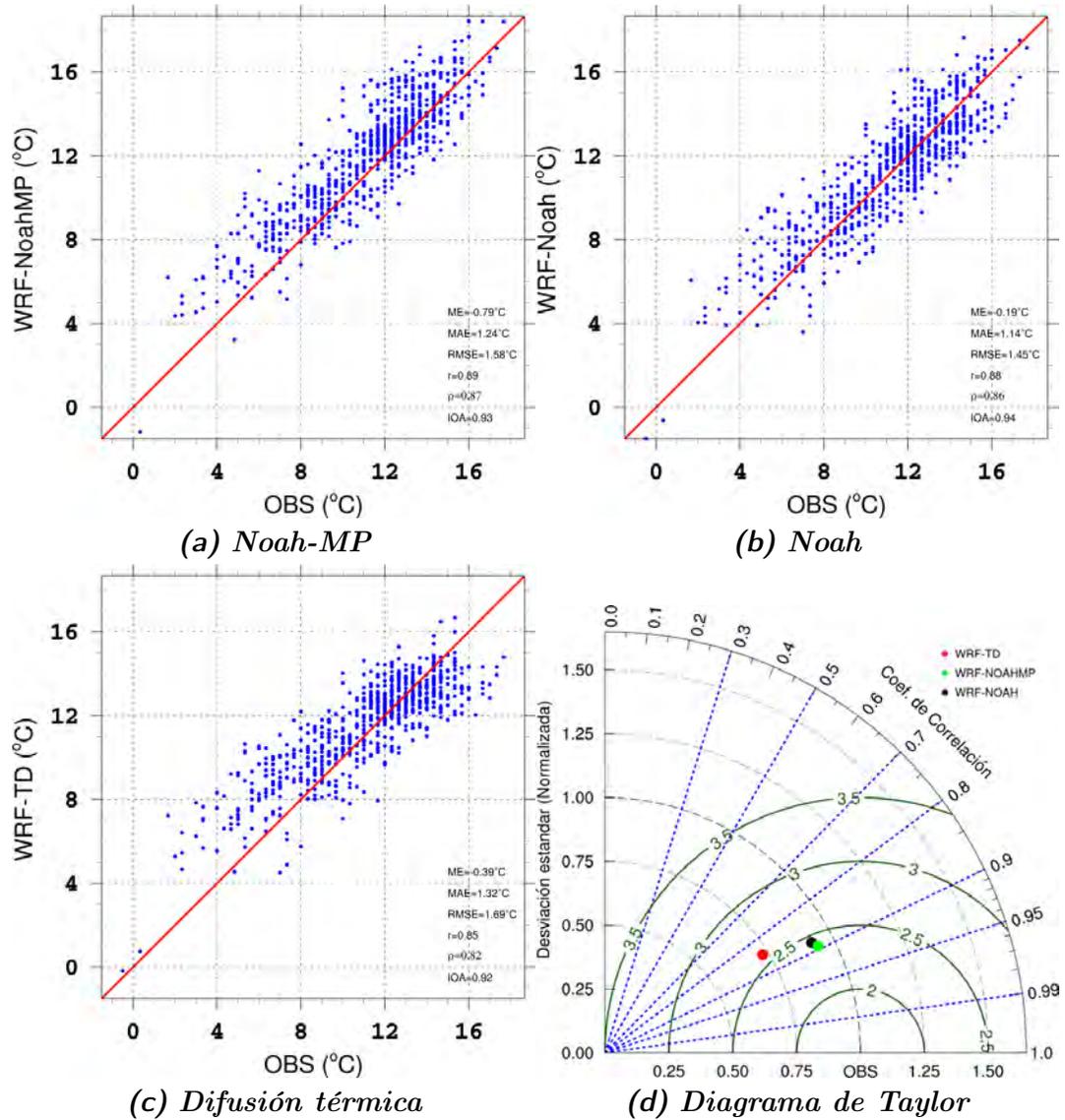
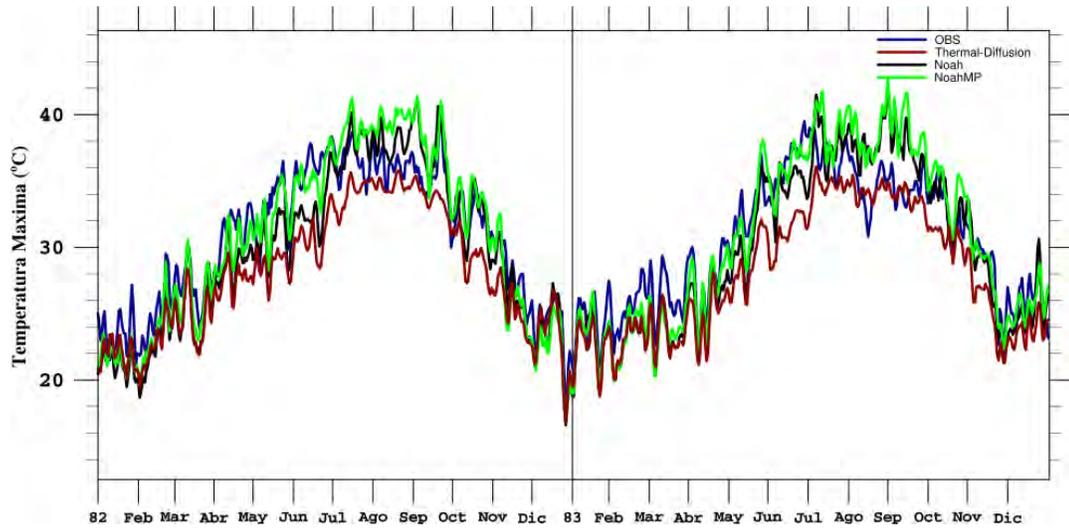


Fig. 6-59: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Huahuatla, Pue.

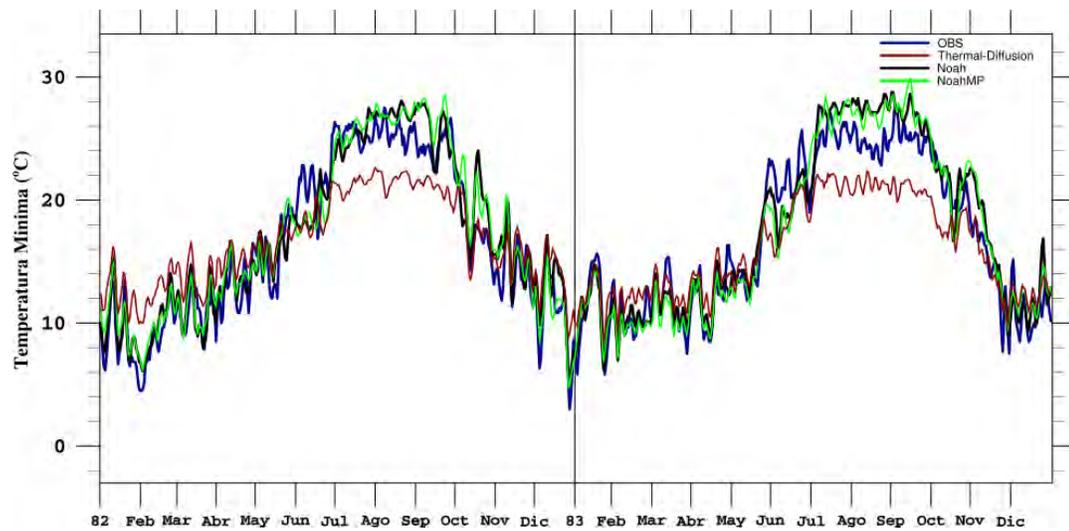


*Fig. 6-60: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Huahuatlá, Pue.*

El Carrizo.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

*Fig. 6-61: Comparación de las series de tiempo de (a) TMax y (b) TMin para la estación El Carrizo, Sin., durante 1982-1983.*

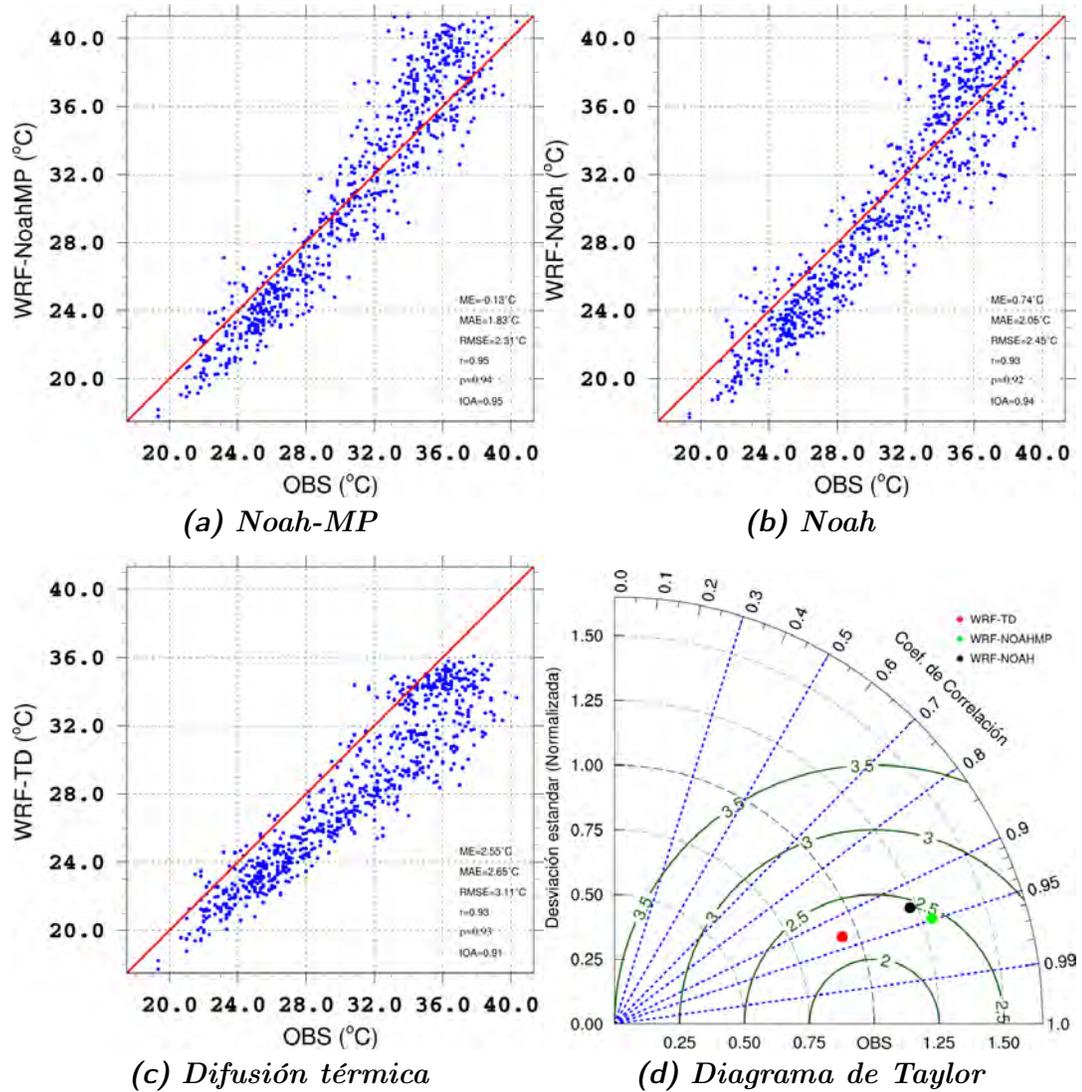
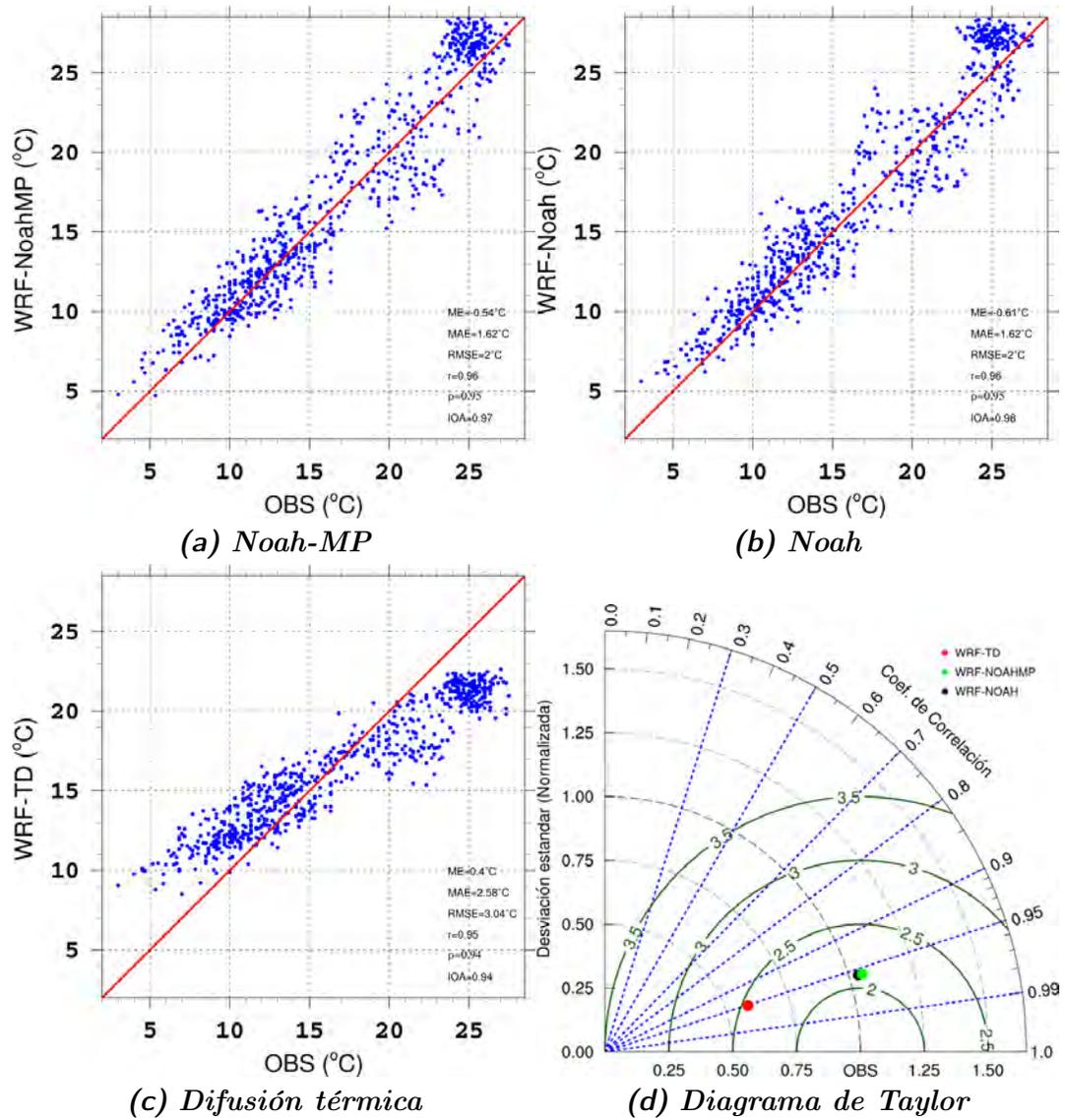
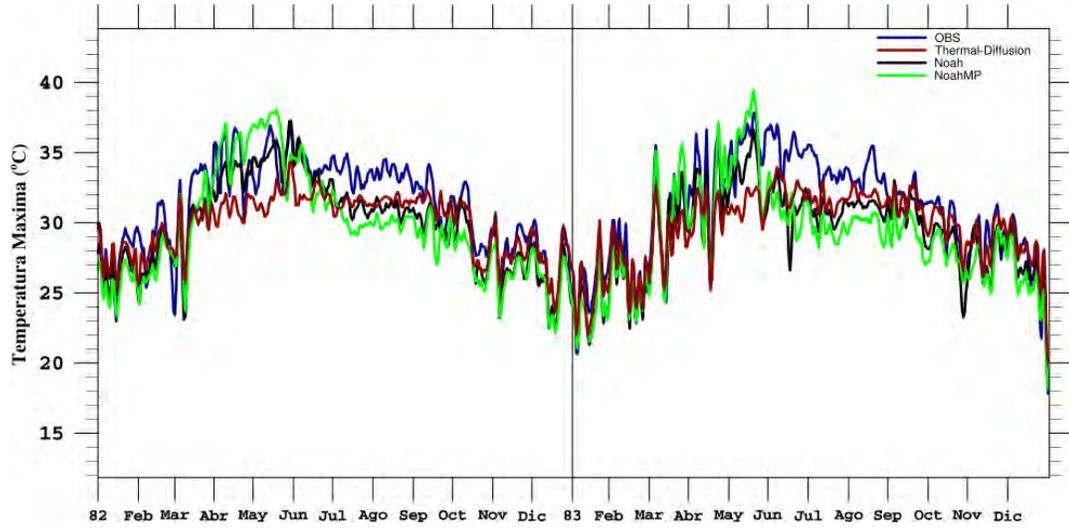


Fig. 6-62: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación El Carrizo, Sin.

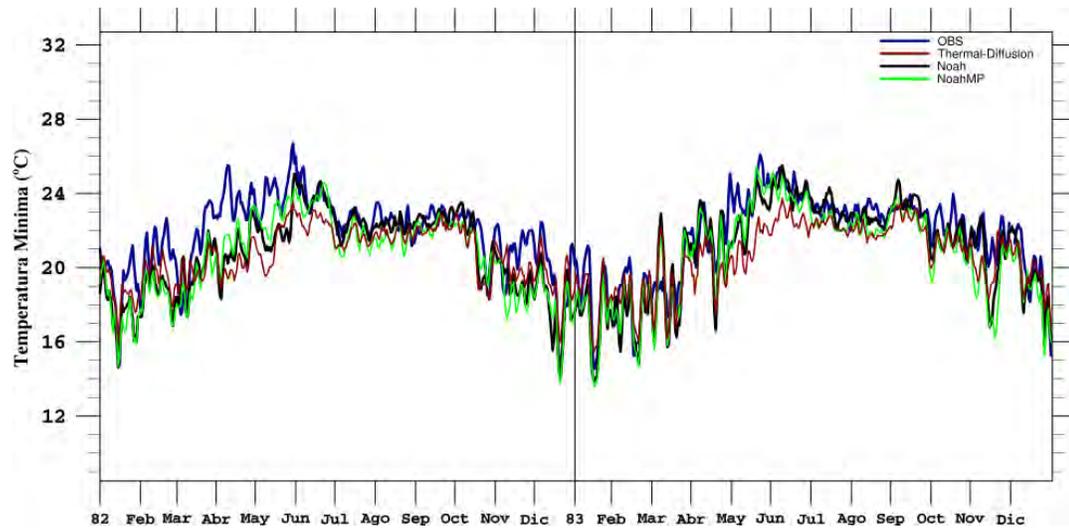


*Fig. 6-63: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación El Carrizo, Sin.*

Teapa.

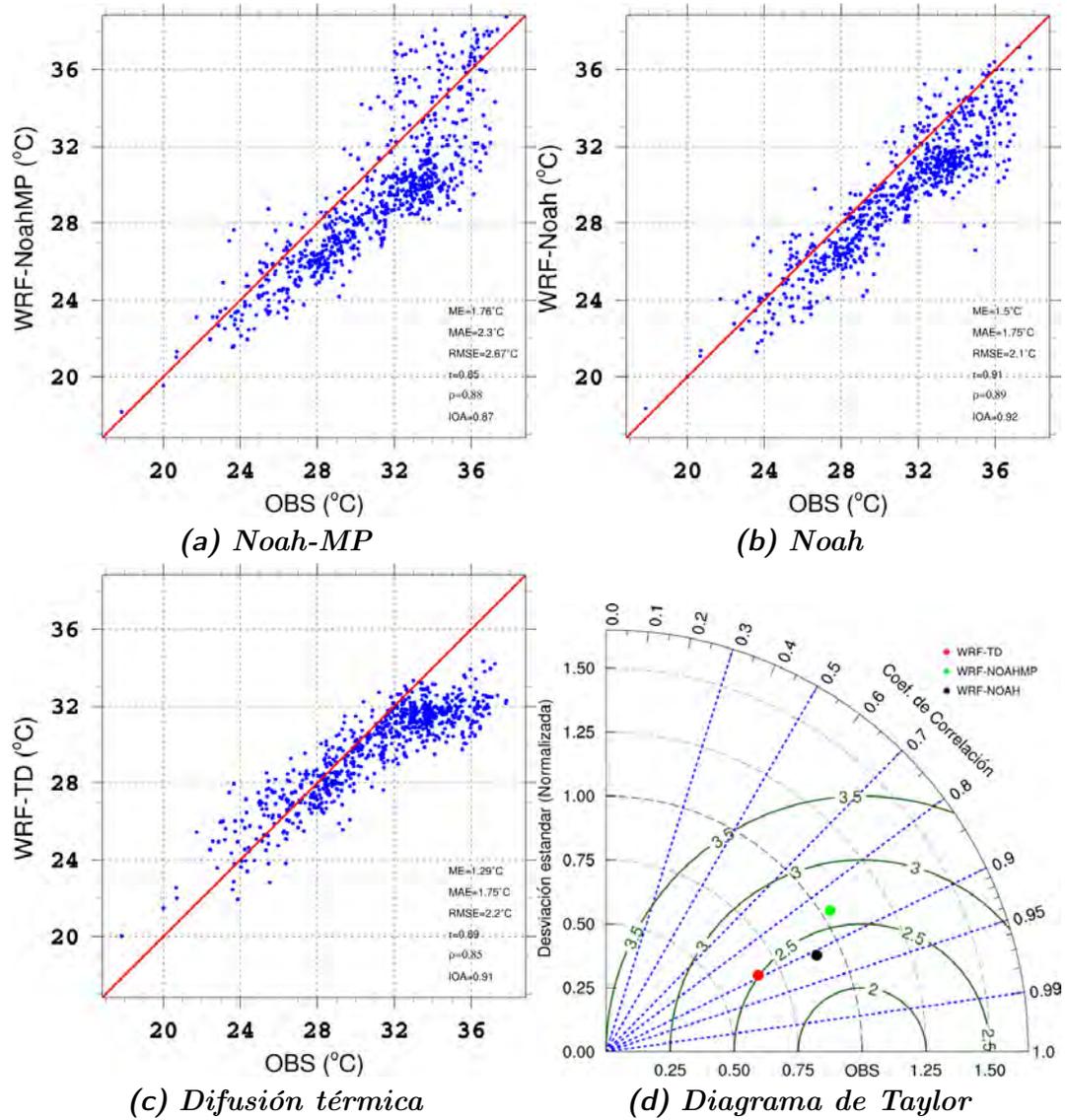


(a) *TMax*

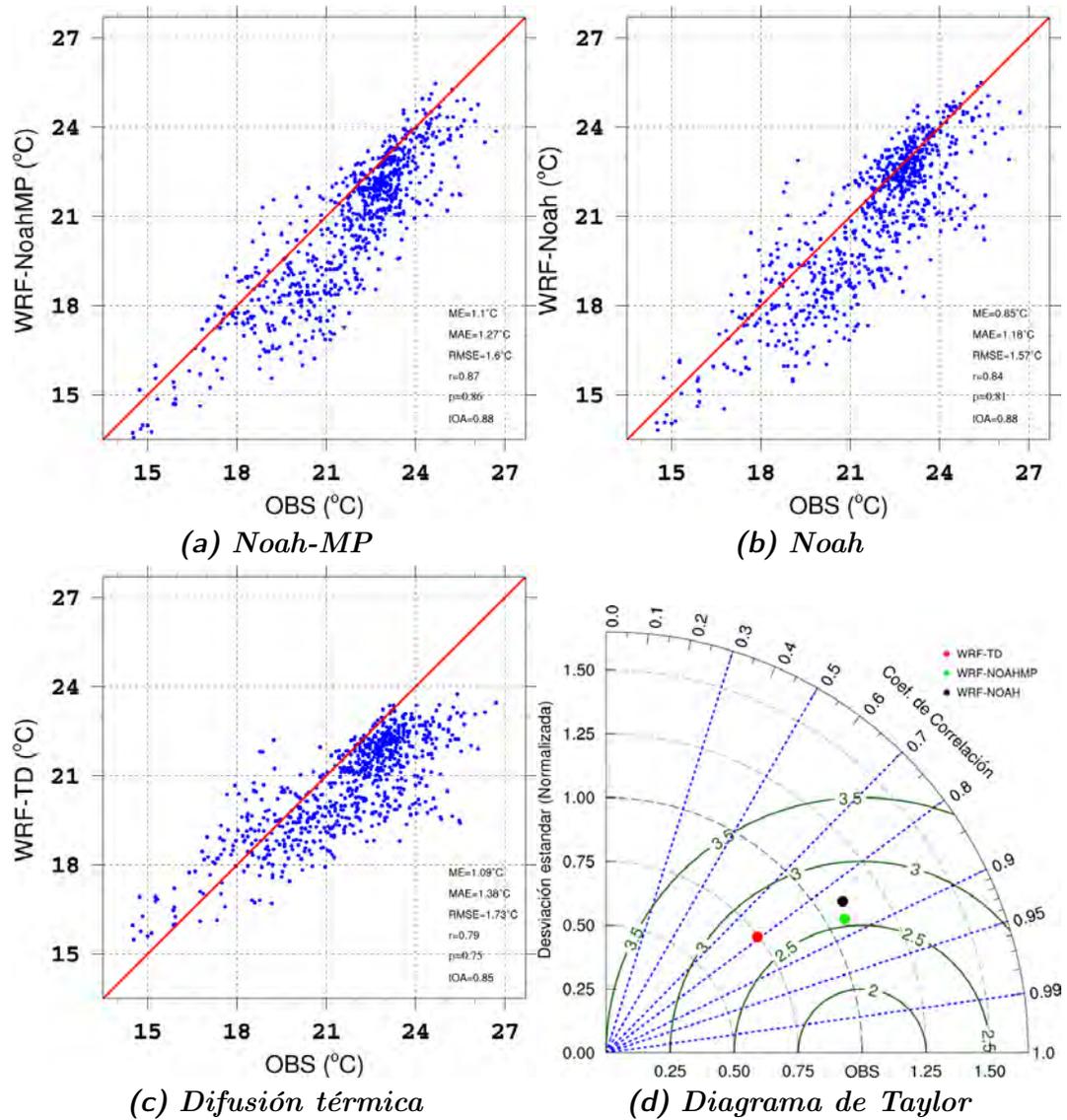


(b) *TMin*

Fig. 6-64: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación Teapa, Tab., durante 1982-1983.

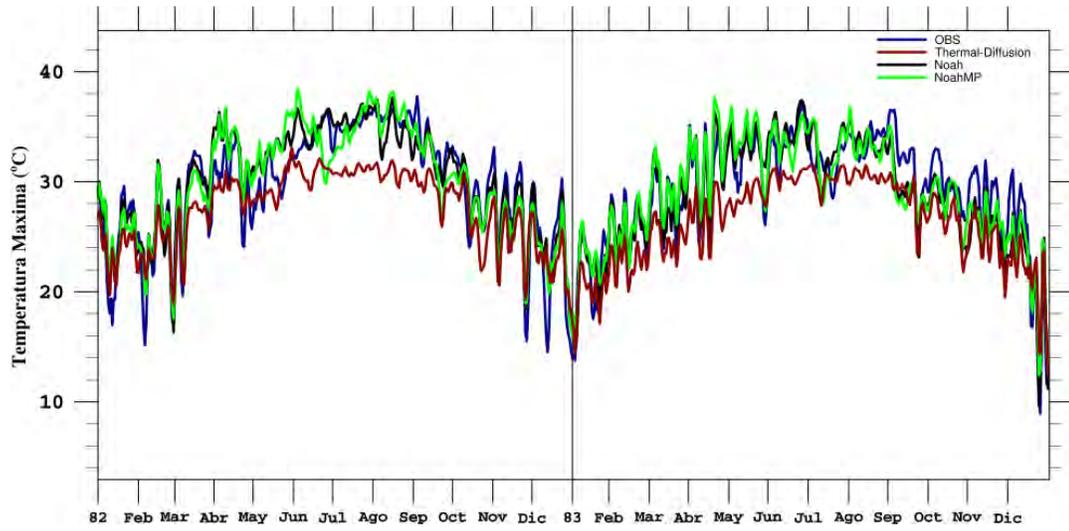


*Fig. 6-65: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación Teapa, Tab.*

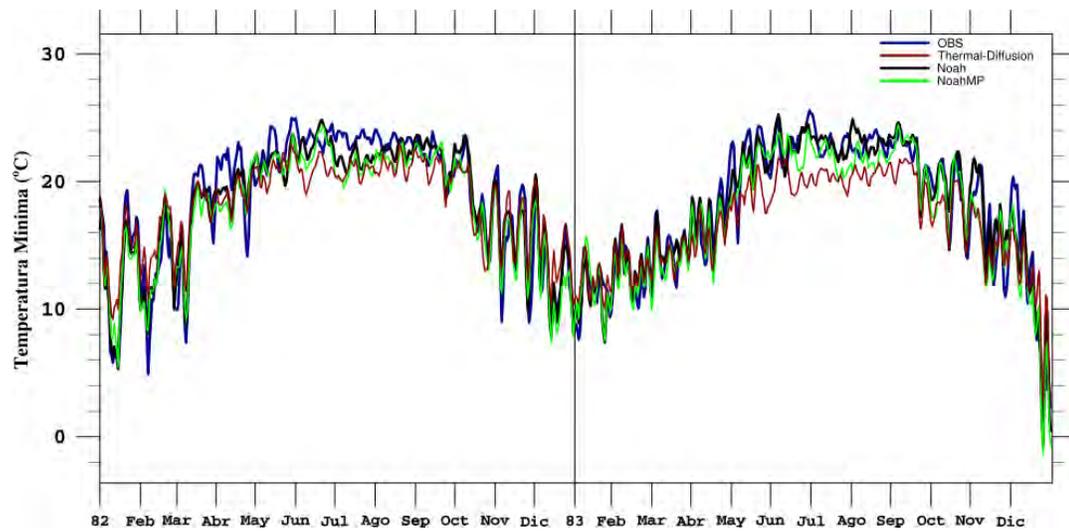


*Fig. 6-66: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación Teapa, Tab.*

R. Española.



(a) *TMax*



(b) *TMin*

Fig. 6-67: Comparación de las series de tiempo de (a) *TMax* y (b) *TMin* para la estación R. Española, Tamps., durante 1982-1983.

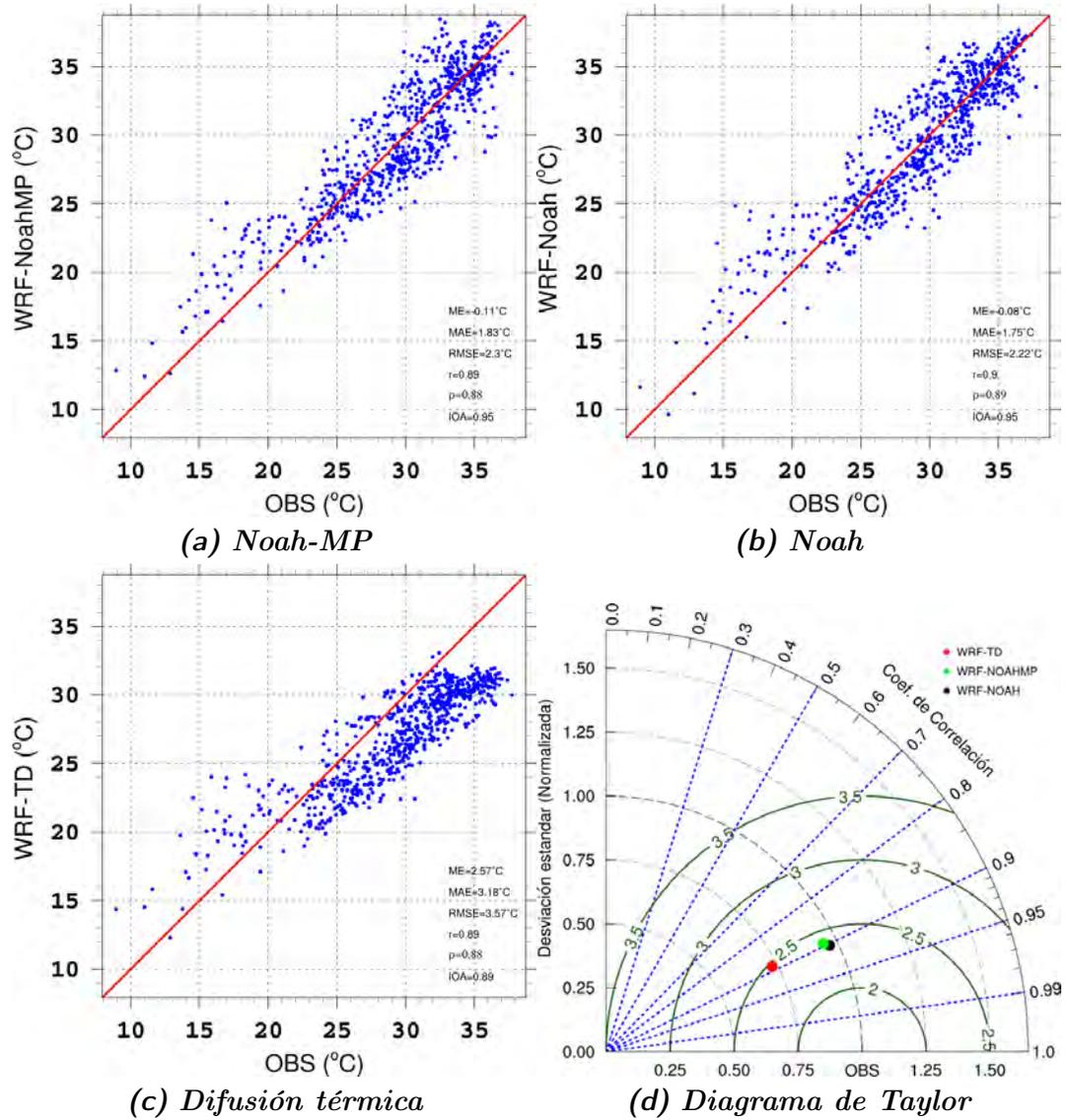


Fig. 6-68: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMax en la estación R. Española, Tamps.

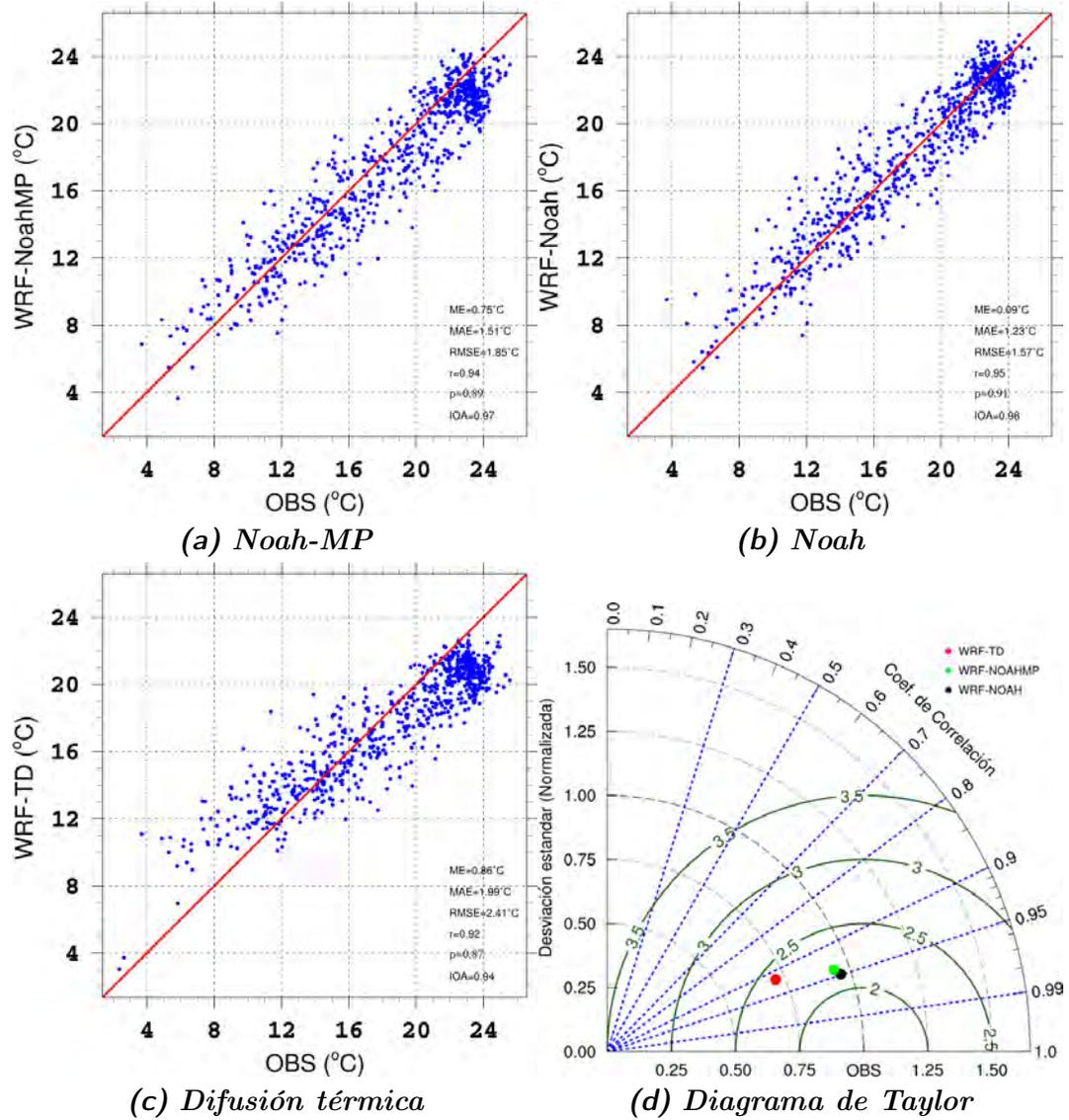


Fig. 6-69: Diagramas de dispersión entre observaciones y datos simulados con (a) Noah-MP, (b) Noah y (c) Difusión térmica, y (d) Diagrama de Taylor comparando los tres esquemas de LSM para TMin en la estación R. Española, Tamps.

### 6.3. Percentiles 90 y 10.

#### 6.3.1. Climatología mensual del percentil 90 ( $P_{90}$ ) para TMax, obtenidos a partir de datos del modelo WRF, durante el período 1980-89.

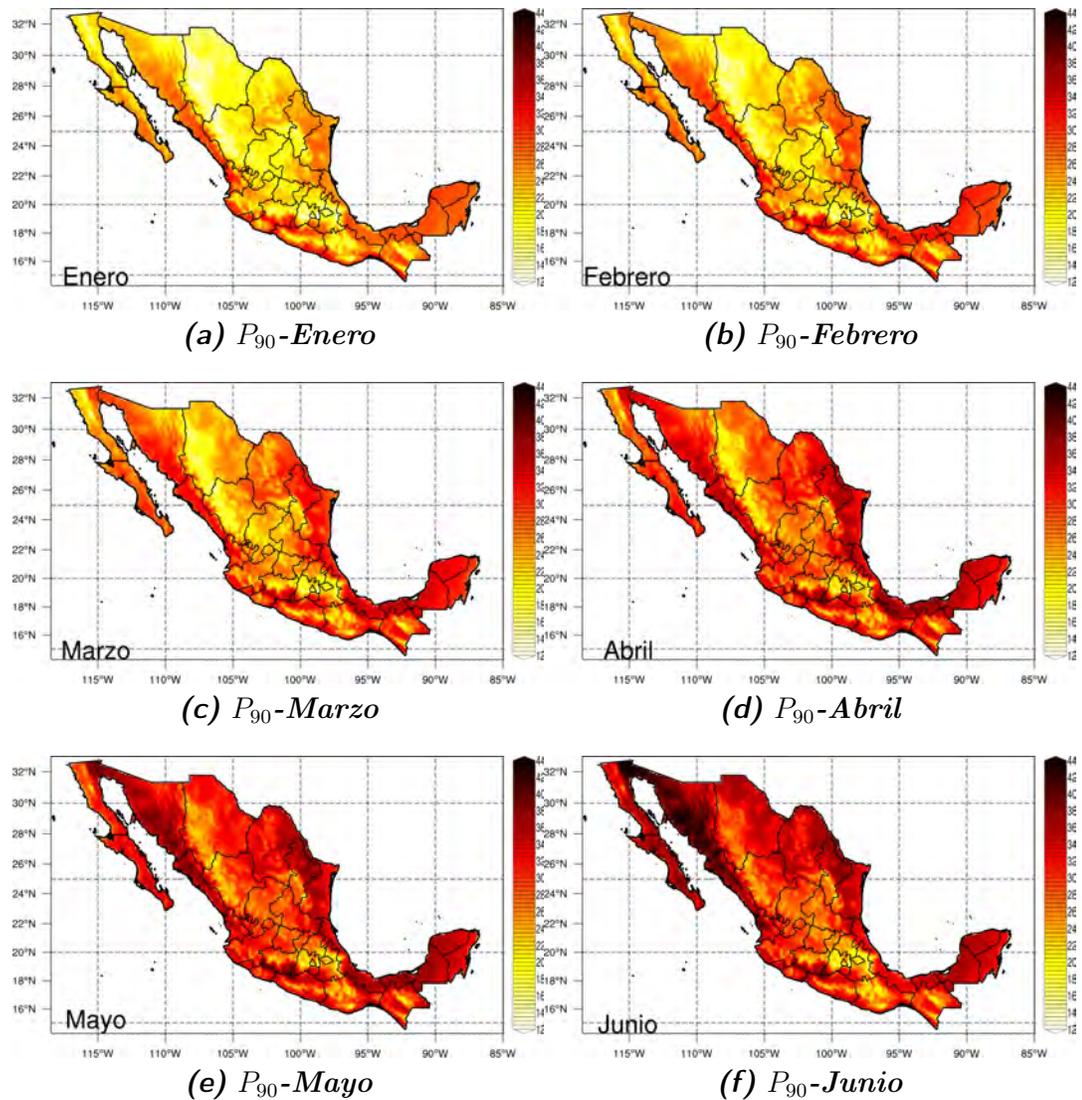
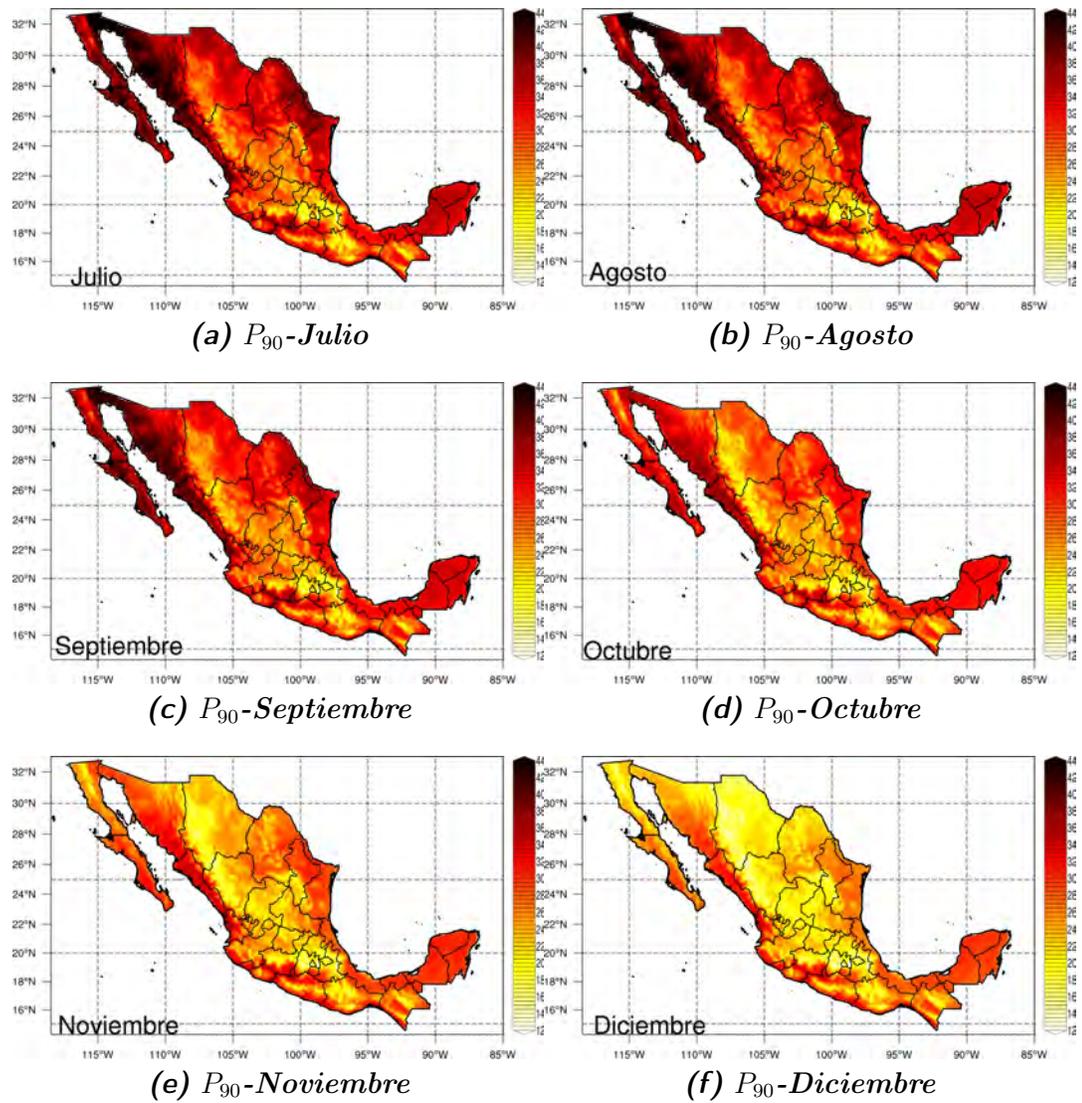


Fig. 6-70: Climatología mensual del percentil 90 ( $P_{90}$ ) para TMax, de enero a junio.



*Fig. 6-71: Climatología mensual del percentil 90 ( $P_{90}$ ) para  $T_{Max}$ , de julio a diciembre*

6.3.2. Climatología mensual del percentil 10 ( $P_{10}$ ) para TMin, obtenidos a partir de datos del modelo WRF, durante el período 1980-89.

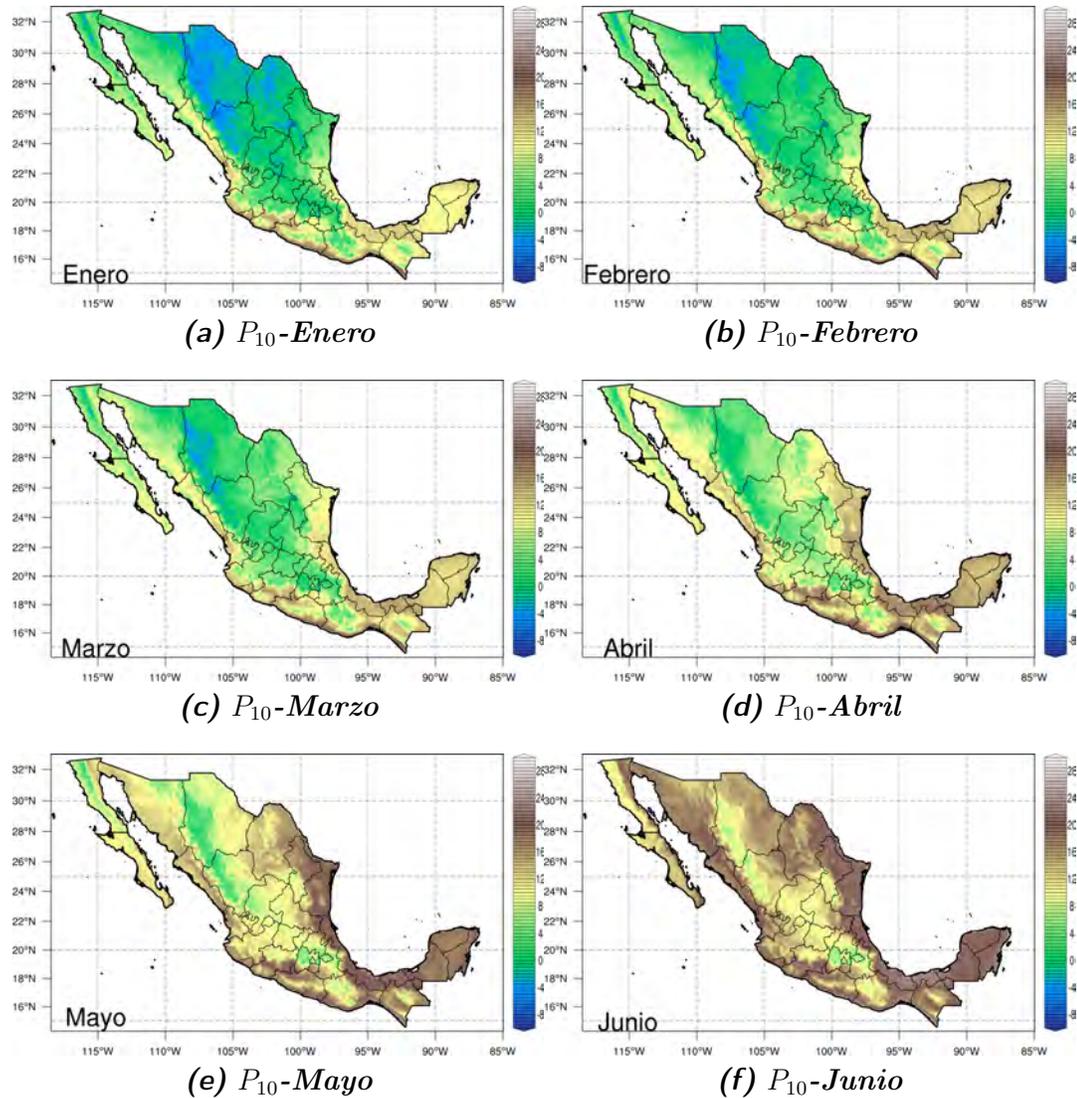
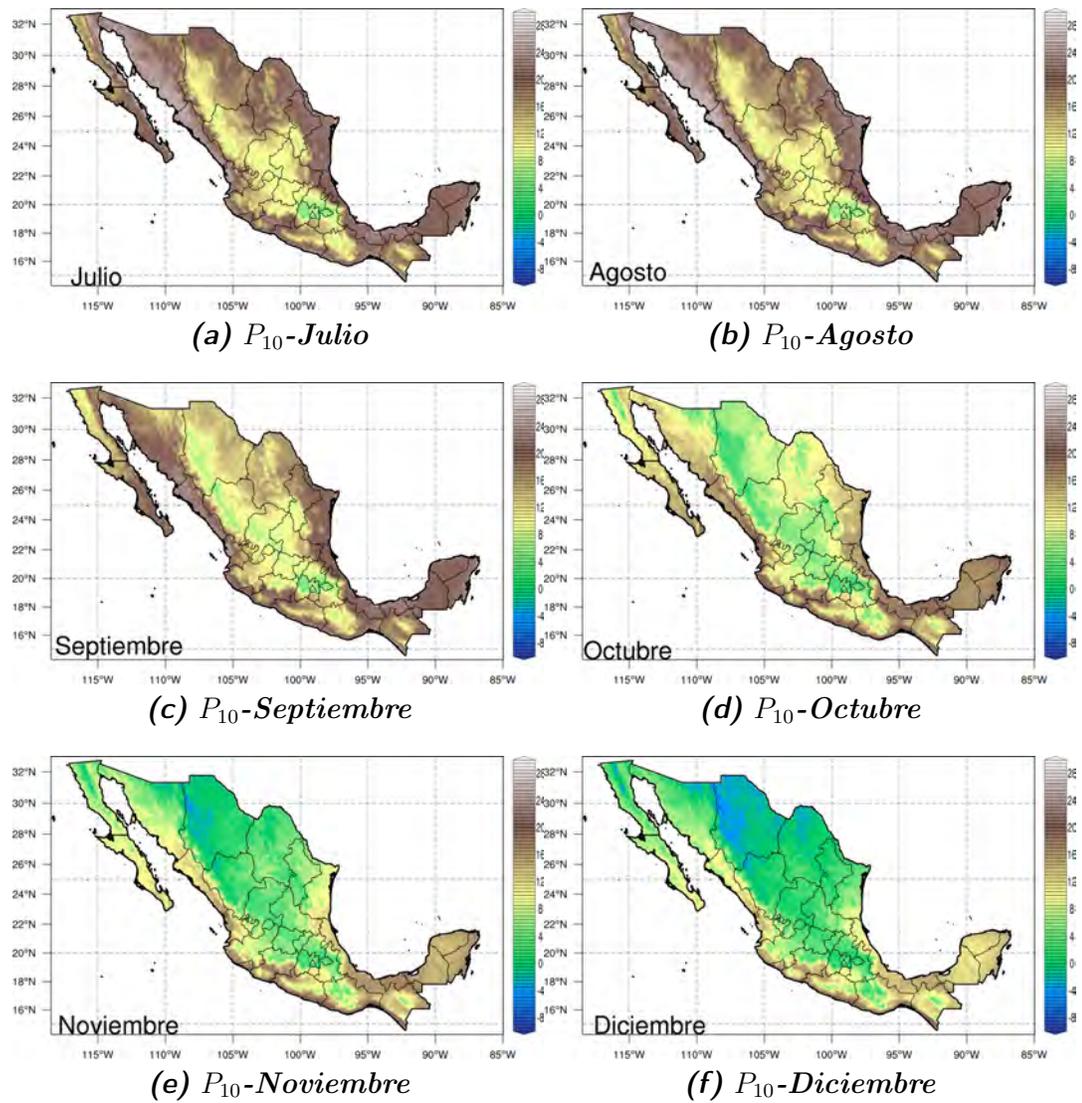


Fig. 6-72: Climatología mensual del percentil 10 ( $P_{10}$ ) para TMin, de enero a junio.



*Fig. 6-73: Climatología mensual del percentil 10 ( $P_{10}$ ) para TMin, de julio a diciembre*

#### 6.4. Índice TX90p .

##### 6.4.1. Mapas del índice TX90p para el año de 1982.

La barra de colores indica el % de días en los cuales la  $T_{Max}$  estuvo por arriba del  $P_{90}$ .

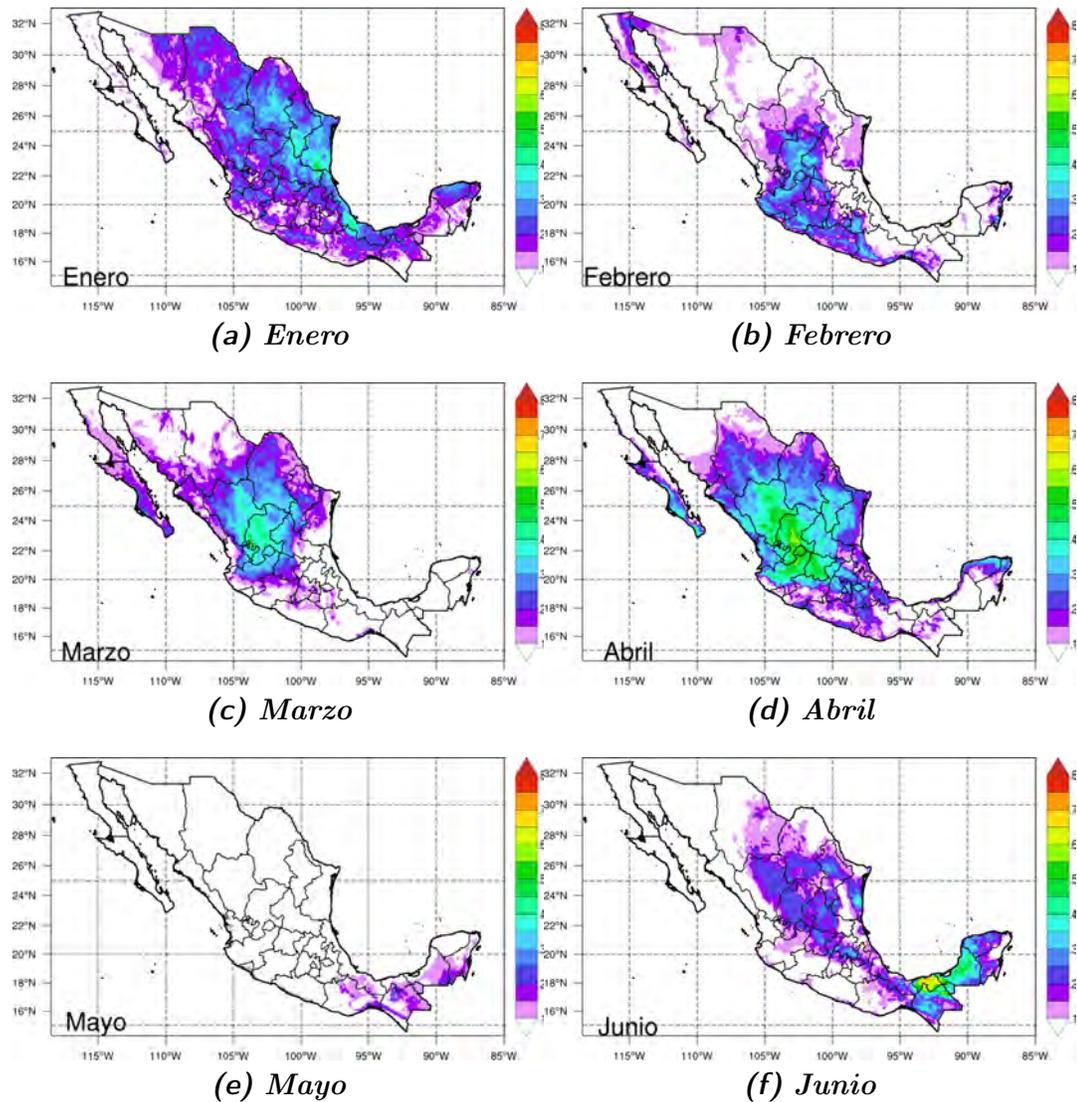


Fig. 6-74: Índice TX90p de enero a junio de 1982.

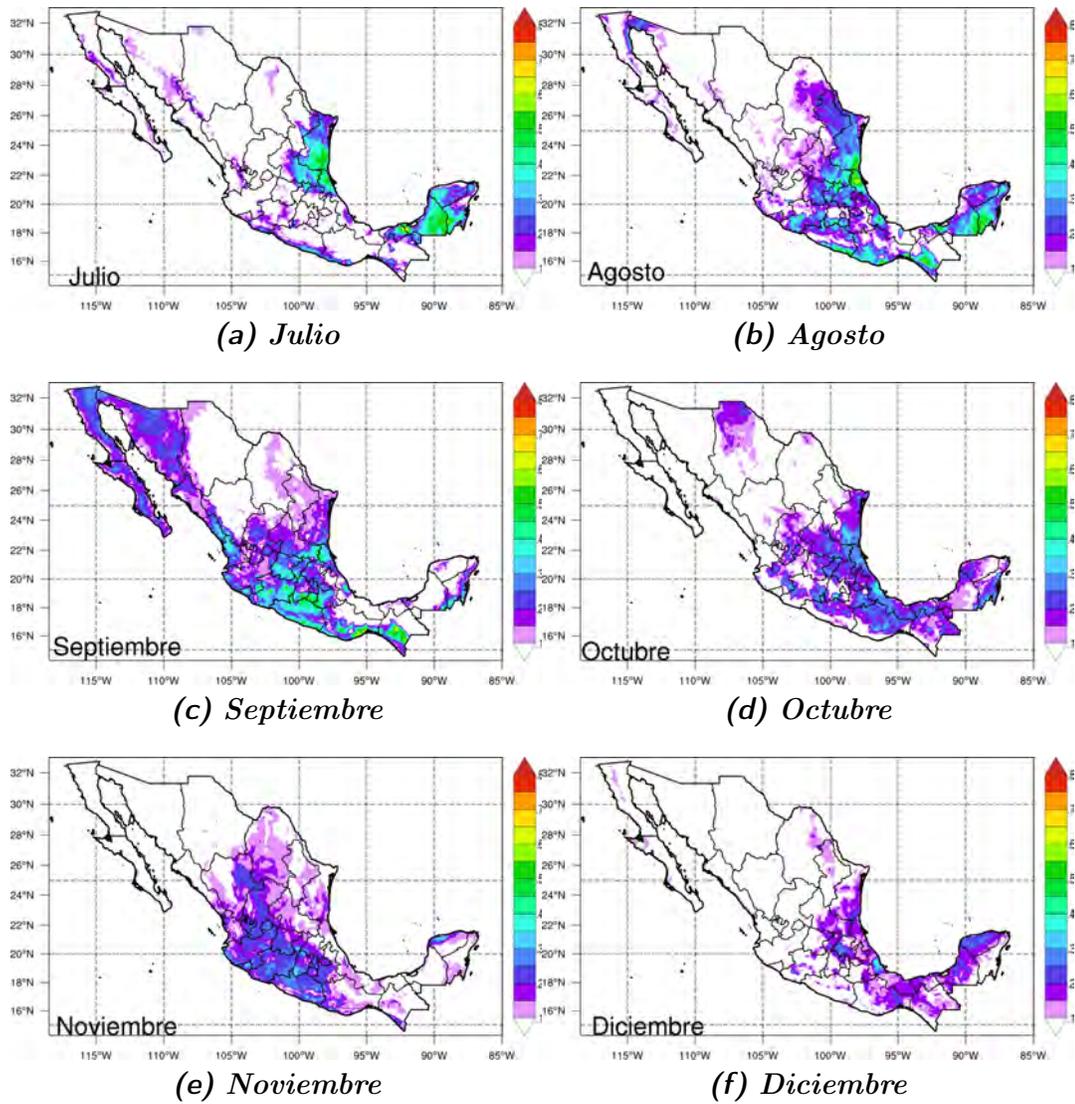


Fig. 6-75: Índice TX90p de julio a diciembre de 1982.

## 6.5. Índice TX90p .

### 6.5.1. Mapas del índice TX90p para el año de 1983.

La barra de colores indica el % de días en los cuales la  $T_{Max}$  estuvo por arriba del  $P_{90}$ .

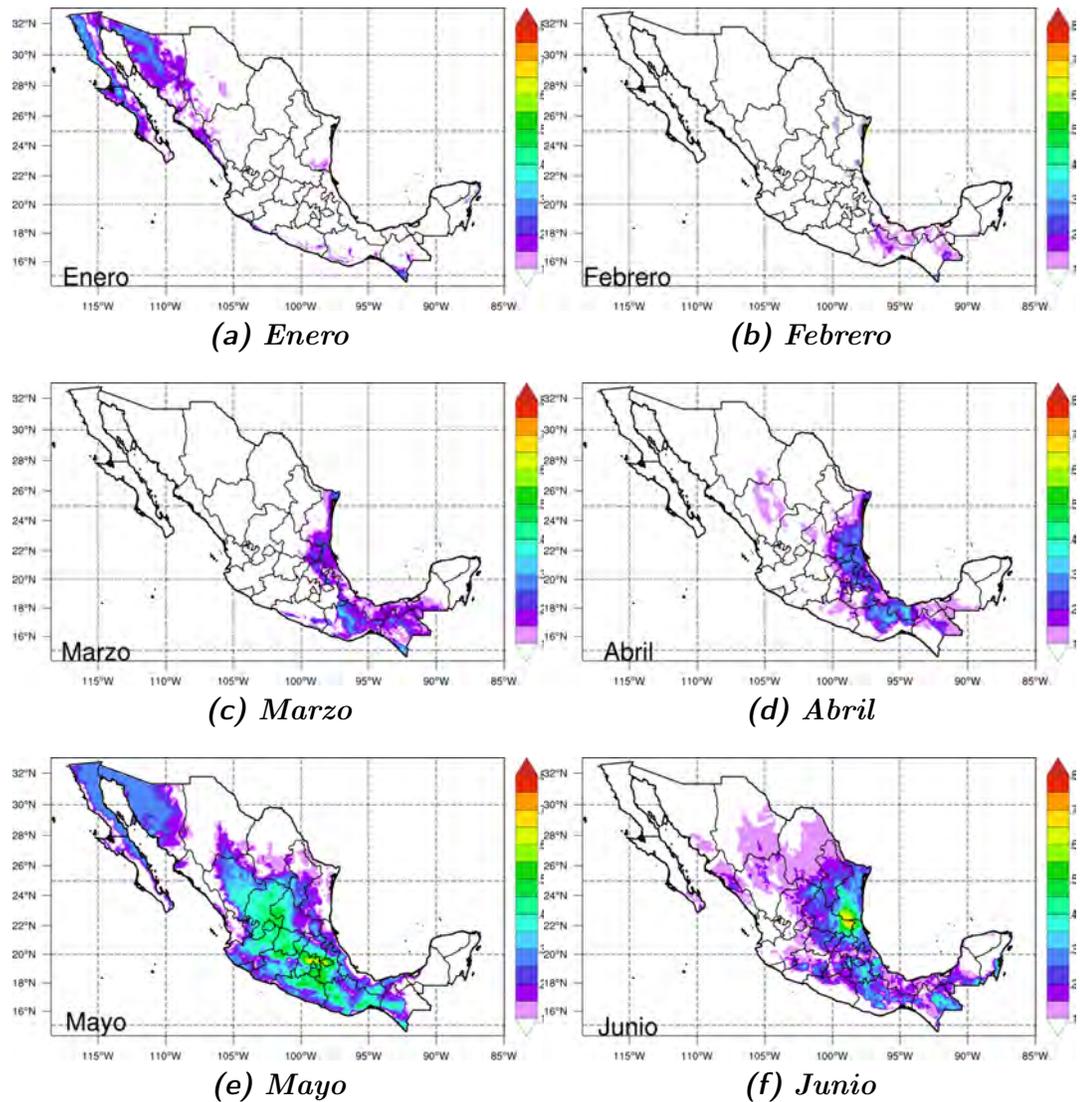


Fig. 6-76: Índice TX90p de enero a junio de 1983.

La barra de colores indica el % de días en los cuales la  $T_{Max}$  estuvo por arriba del  $P_{90}$ .

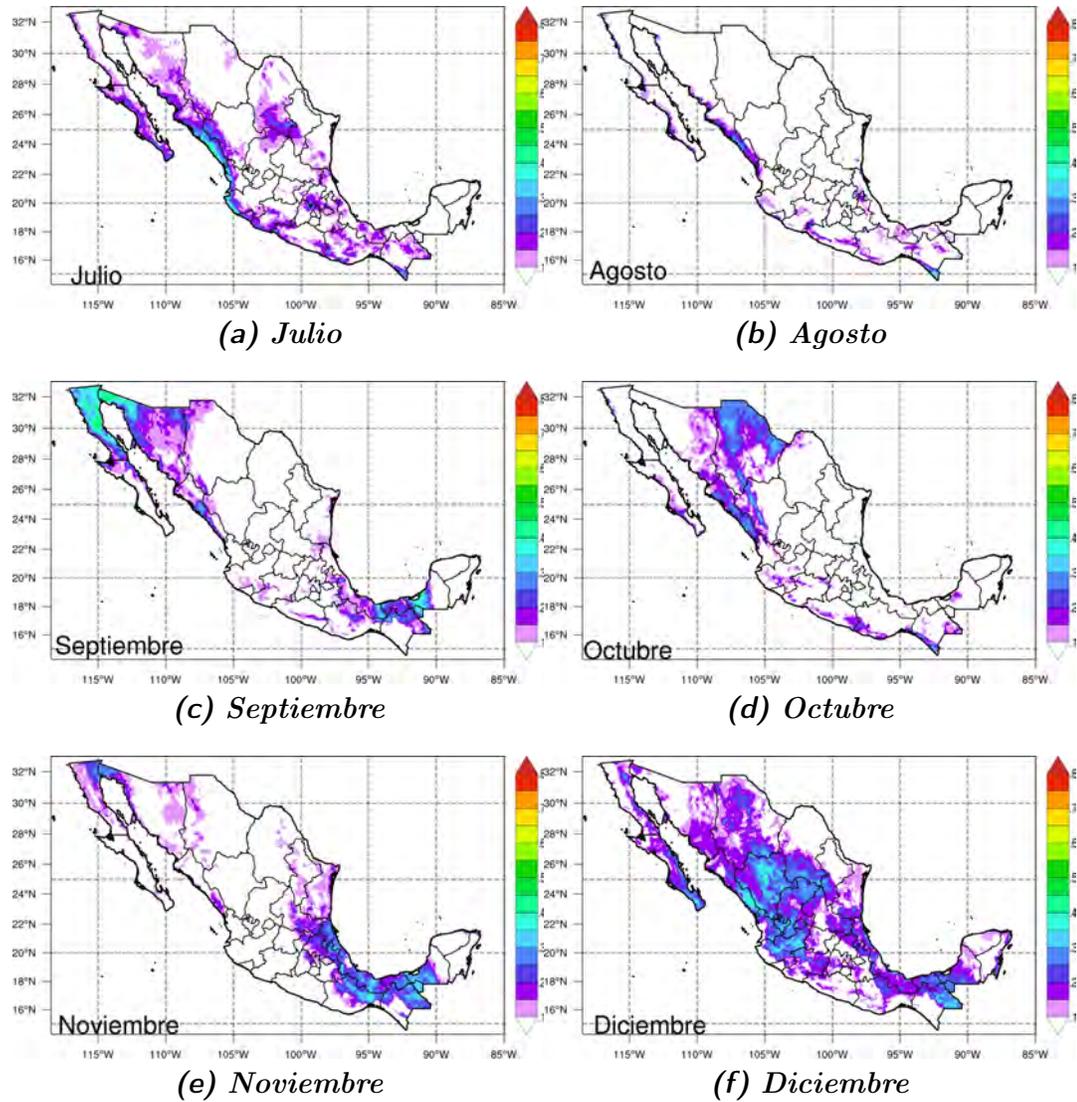


Fig. 6-77: Índice  $TX_{90p}$  de julio a diciembre de 1983.

## 6.6. Índice TN10p .

### 6.6.1. Mapas del índice TN10p para el invierno 1980-1981.

La barra de colores indica el % de días en los cuales la  $T_{Min}$  estuvo por debajo del  $P_{10}$ .

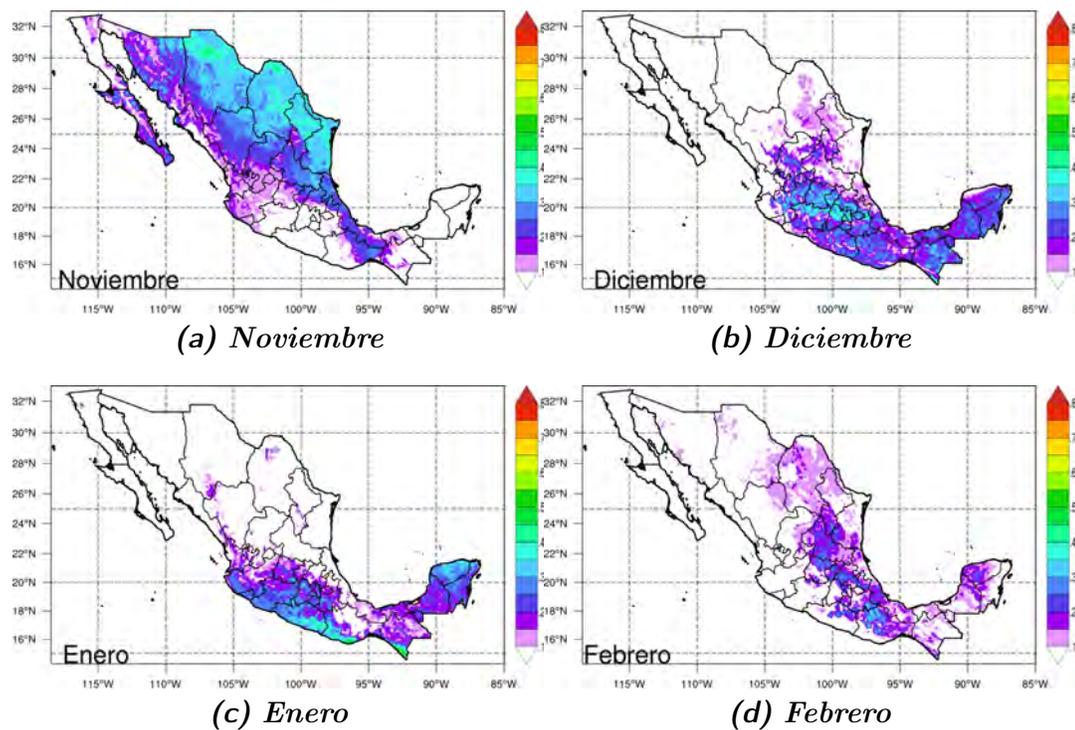
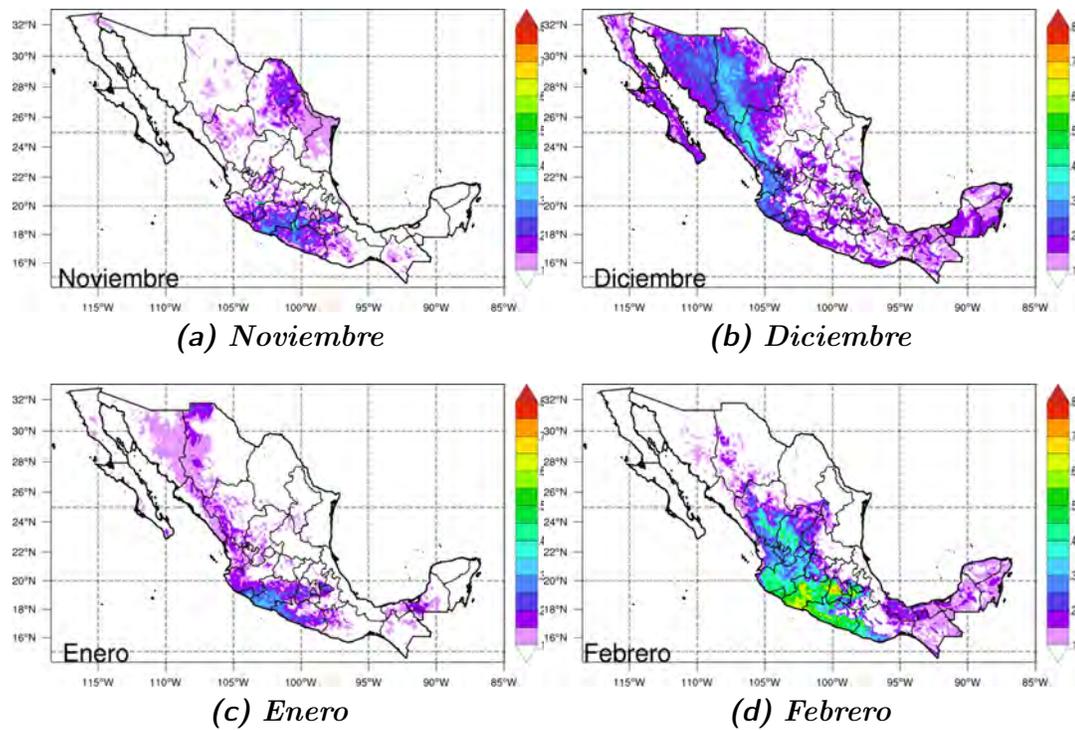


Fig. 6-78: Índice TN10p invierno 1980-81.

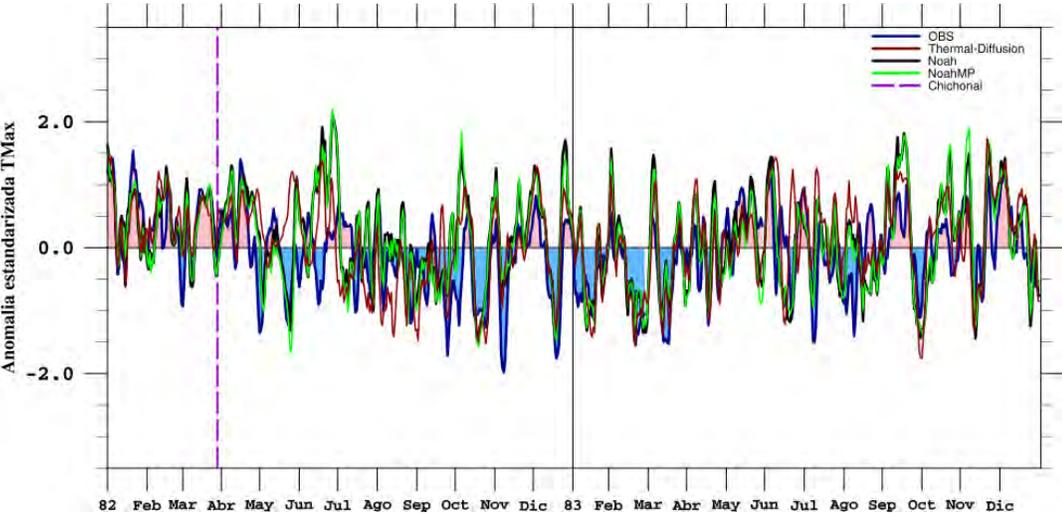
### 6.6.2. Mapas del índice TN10p para el invierno 1982-1983.

La barra de colores indica el % de días en los cuales la  $T_{Min}$  estuvo por debajo del  $P_{10}$ .

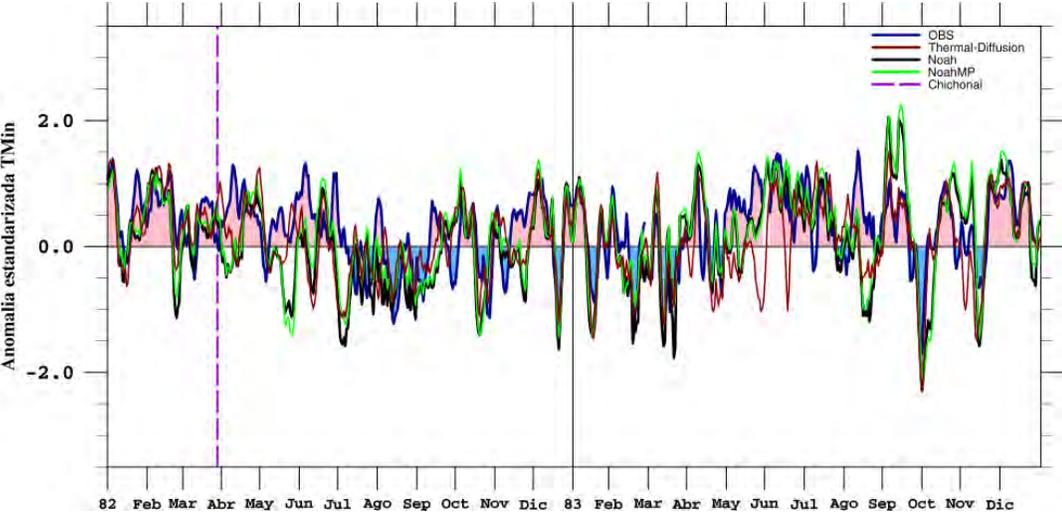


*Fig. 6-79: Índice TN10p invierno 1982-83.*

Champotón.



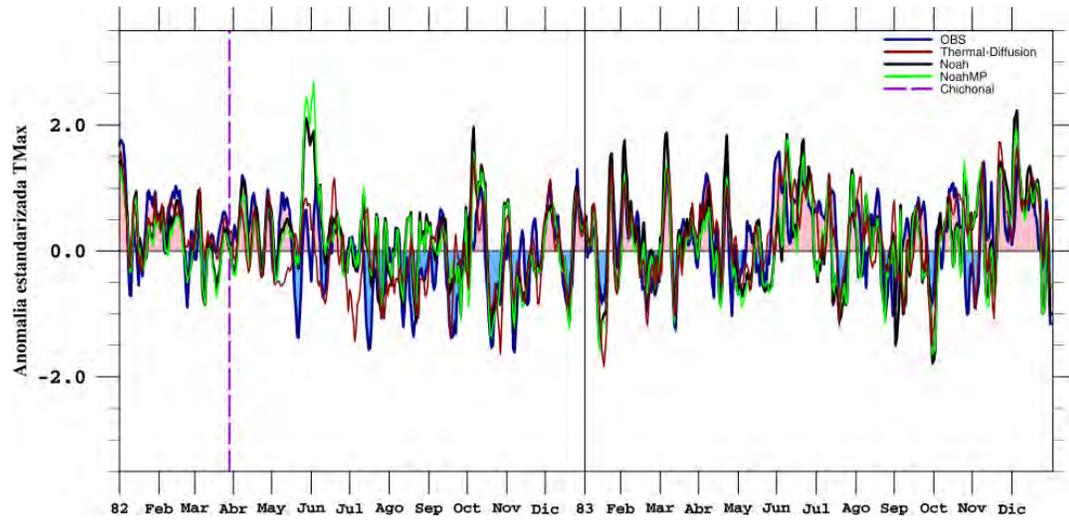
(a) TMax



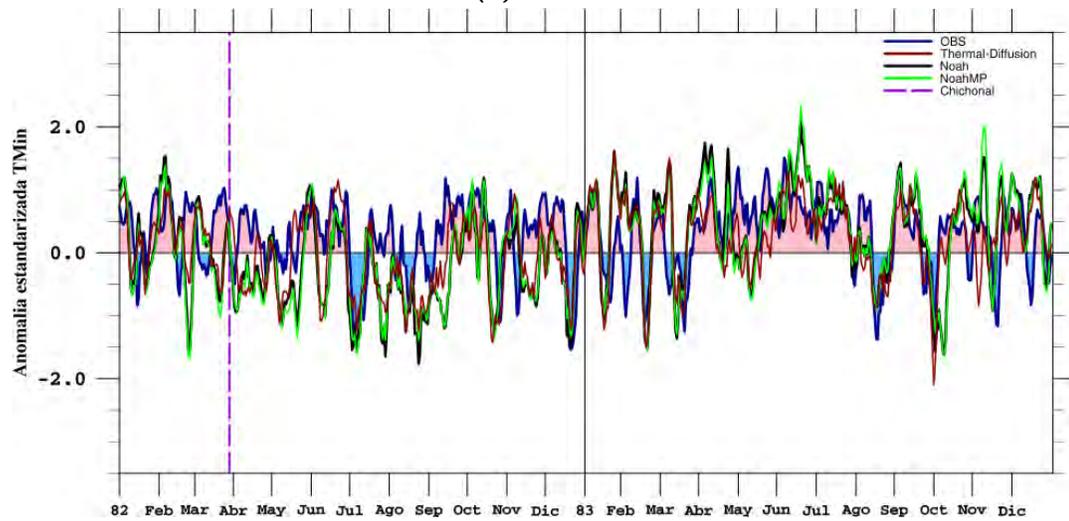
(b) TMin

Fig. 6-80: Champotón. Anomalías estandarizadas.

EL Jabalí, Chis.



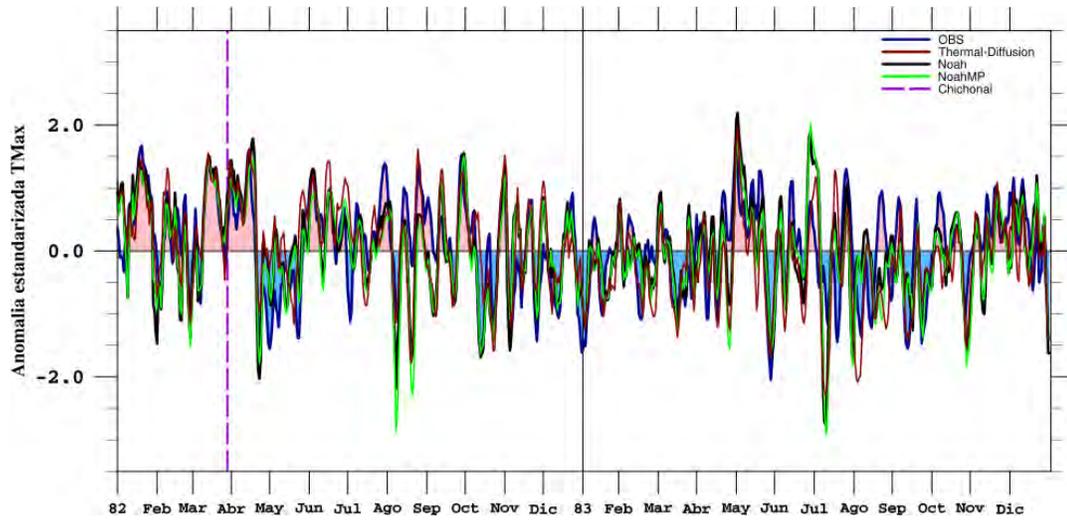
(a) *TMax*



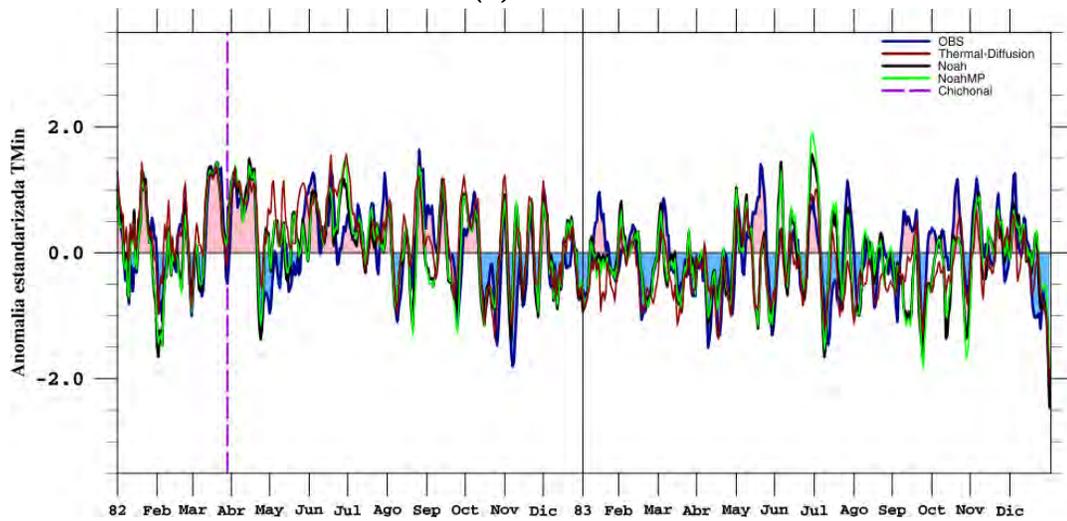
(b) *TMin*

Fig. 6-81: EL Jabalí, Chis. Anomalías estandarizadas.

Ramos Arizpe.



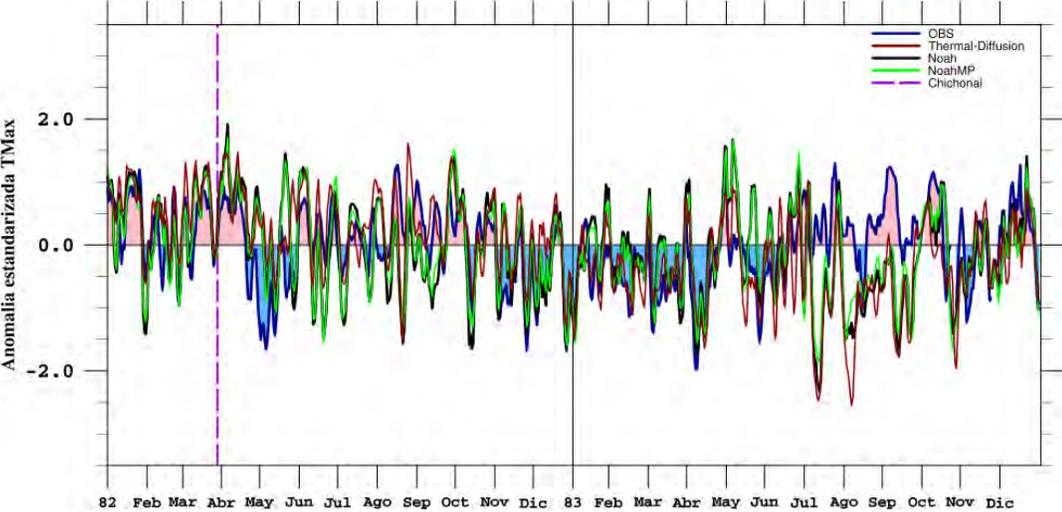
(a) *TMax*



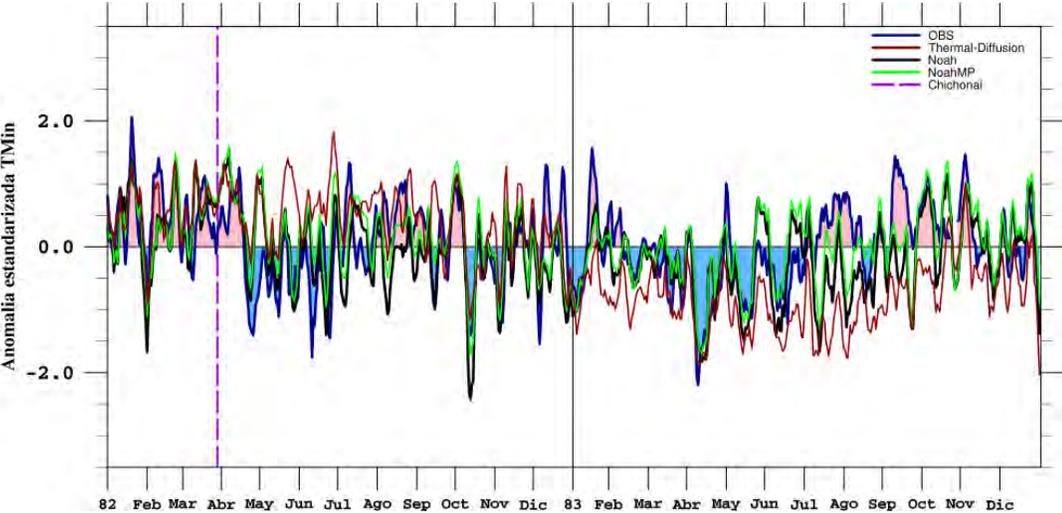
(b) *TMin*

Fig. 6-82: Ramos Arizpe. Anomalías estandarizadas.

C.E.M. Ciudad Deportiva.



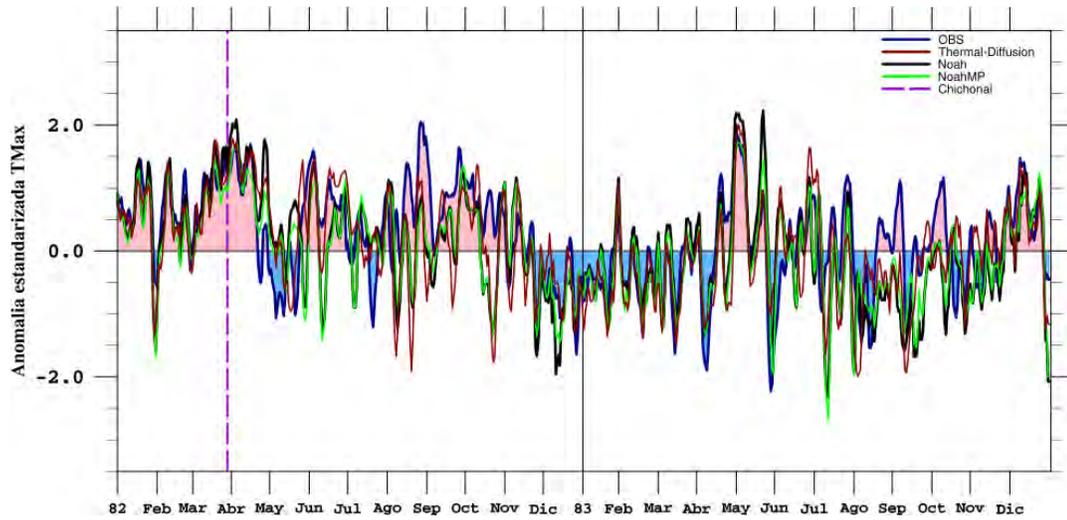
(a) TMax



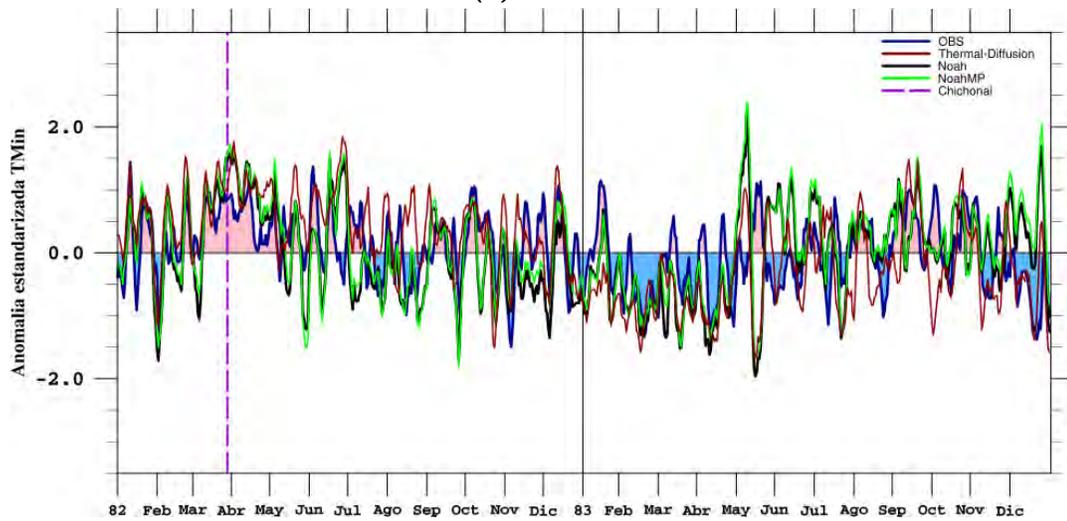
(b) TMin

Fig. 6-83: C.E.M. Ciudad Deportiva. Anomalías estandarizadas.

Peña del Águila.



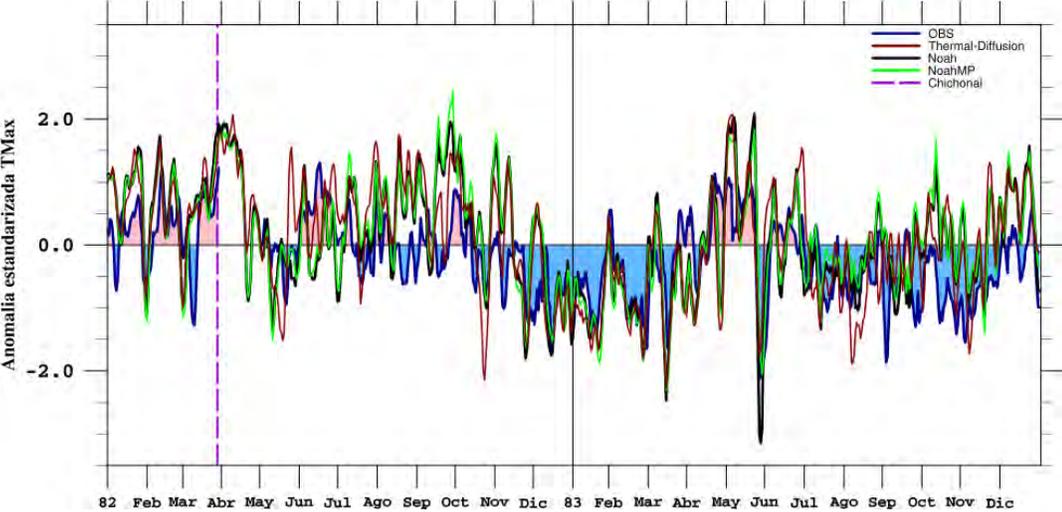
(a) *TMax*



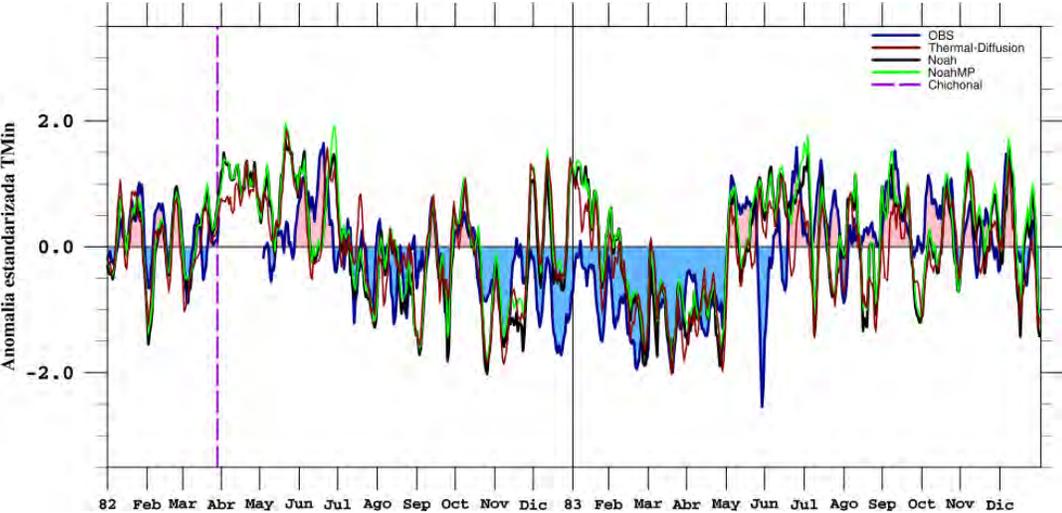
(b) *TMin*

Fig. 6-84: Peña del Águila. Anomalías estandarizadas.

Chapala.



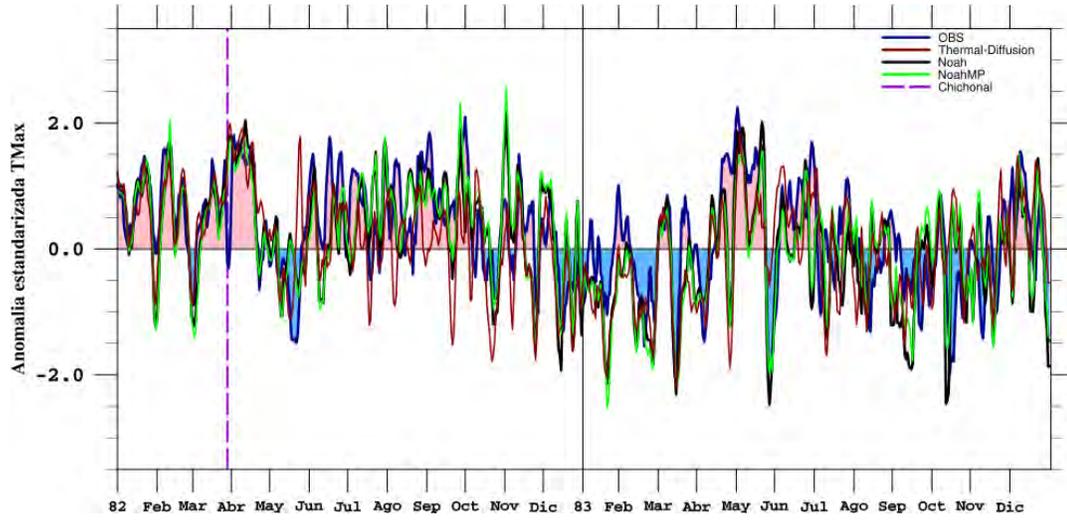
(a) TMax



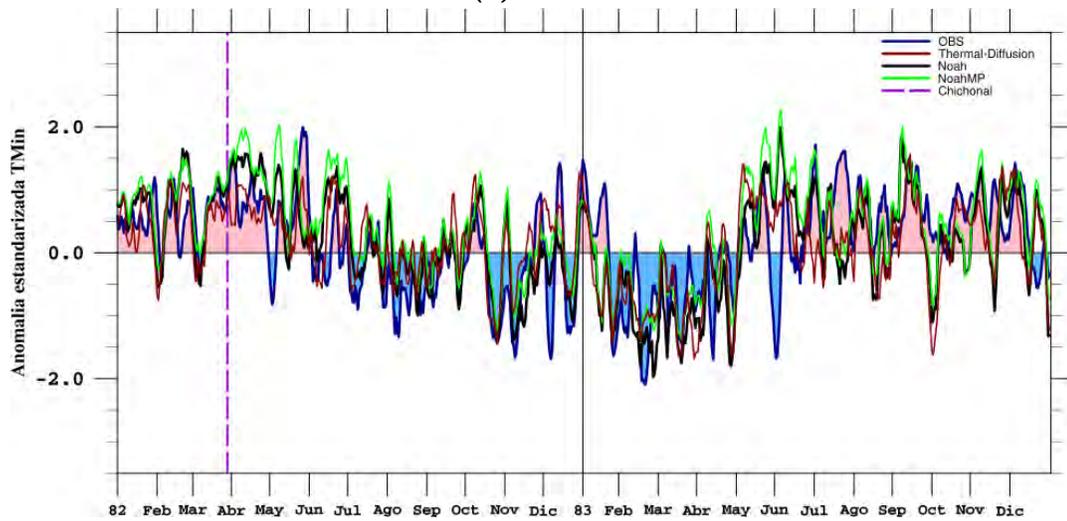
(b) TMin

Fig. 6-85: Chapala. Anomalías estandarizadas.

Antunez.



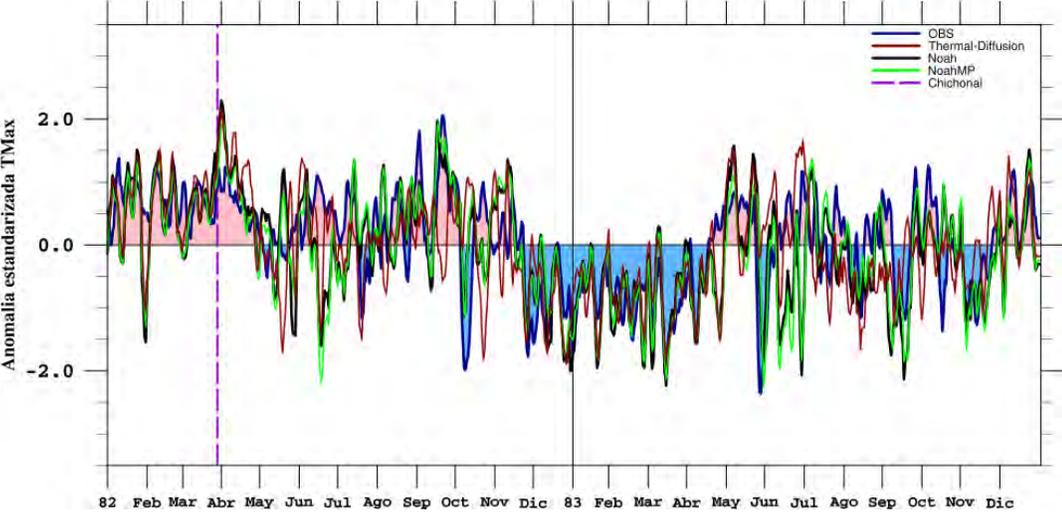
(a) *TMax*



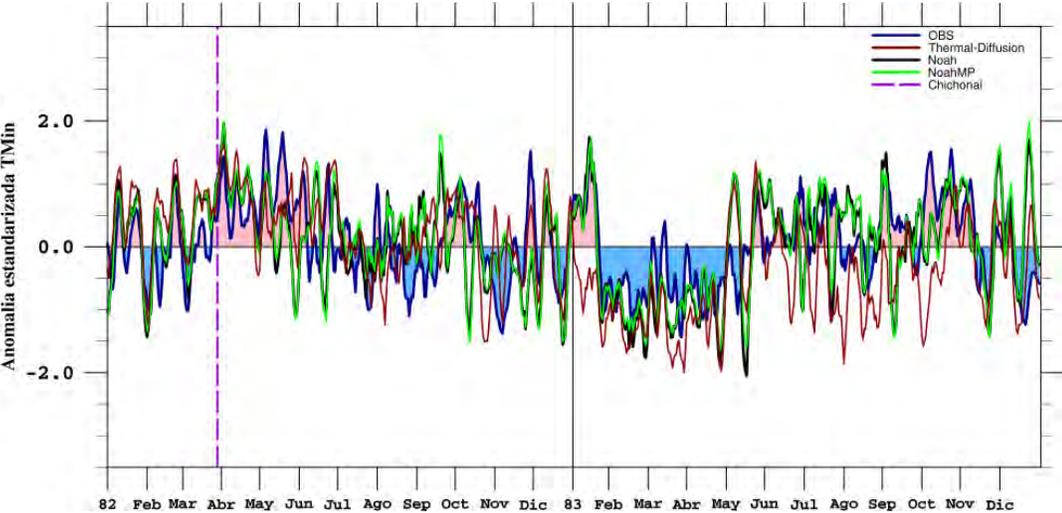
(b) *TMin*

Fig. 6-86: Antunez. Anomalías estandarizadas.

Cerro Blanco.



(a) TMax



(b) TMin

Fig. 6-87: Cerro Blanco. Anomalías estandarizadas.

## *Referencias*

- Argüeso, and Coauthors, 2011. Evaluation of WRF parameterizations for climate studies over southern Spain using a multi-step regionalization, *J Clim* 24:5633-5651.
- Auchmann, R., and Coauthors, 2013. Impact of volcanic stratospheric aerosols on diurnal temperature range in Europe over the past 200 years: Observations versus model simulations. *J. Geophys. Res.* 118: 9064-9077.
- Carrasco-Mijares, N., 2013. Reconstrucción y análisis de la variabilidad de la temperatura en México. Tesis de maestría, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Casanova-Chacón, J. y Olguín-Rodarte, M., 2016. Revisión de la climatología de heladas y días cálidos en México. Tesis conjunta de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
- Casati, and Coauthors, 2008: Forecast verification: Current status and future directions. *Meteorological Applications*, 15-1, 3-18.
- De la Cruz-Reyna, S. y A. L. Martin del Pozzo, 2009. The 1982 eruption of El Chichón Volcano, Mexico: Eye-witness perspectives of the disaster: *Geofís. Int.* 48-1, 12-31.
- Galindo, I., Otaola, J., Zenteno, G., 1984. Atmospheric Impact of The Volcanic Eruptions of El Chichón over Mexico. *Geofís. Int.* 23, 373-383.
- Gay, C., & Conde, C. (1990). Global and diffuse radiation at the surface (1978-1985). Evidence of El Niño and El Chichón.(In this issue).
- Jarraud, M. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland.
- Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (Eds.). (2003). Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science. John Wiley & Sons.
- López-Méndez, J. V. (2009). Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco. Tesis de maestría, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Lobato, R. (2003). Esquema de asimilación y verificación del modelo de mesoescala MM5.

- Manobianco, J., & Nutter, P. A. (1999). Evaluation of the 29-km Eta model. Part II: Subjective verification over Florida. *Weather and forecasting*, 14(1), 18-37.
- Mendoza, Pablo & P Clark, Martyn & Mizukami, Naoki & Newman, A & Barlage, Michael & Gutmann, Ethan & M Rasmussen, Roy & Rajagopalan, Balaji & Brekke, Levi & Arnold, Jeffrey. (2015). Effects of Hydrologic Model Choice and Calibration on the Portrayal of Climate Change Impacts. *Journal of Hydrometeorology*. 16. 762-780. 10.1175/JHM-D-14-0104.1.
- Murphy, A. H., Brown, B. G., & Chen, Y. S. (1989). Diagnostic verification of temperature forecasts. *Weather and Forecasting*, 4(4), 485-501.
- Nutter, P. A., & Manobianco, J. (1999). Evaluation of the 29-km Eta Model. Part I: Objective verification at three selected stations. *Weather and forecasting*, 14(1), 5-17.
- Powers, J. G., and Coauthors, 2017: The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717-1737.
- Rivera-Martínez, S. 2018. Análisis del uso de suelo y vegetación en México entre 1968 y 2011 para su uso en un modelo de pronóstico meteorológico. Tesis de licenciatura en Ingeniería Geomática. Facultad de Ingeniería, UNAM. 117 pp.
- Rivington, M., and Coauthors,(2008). Evaluating regional climate model estimates against site-specific observed data in the UK. *Climatic Change*, 88(2), 157-185.
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2), 191-219.
- Robock, A., & Matson, M. (1983). Circumglobal transport of the El Chichón volcanic dust cloud. *Science*, 221(4606), 195-197.
- Romero-Centeno, R.; Zavala-Hidalgo, J.; Raga, Graciela. 2012. Tropical cyclone landfall probabilities and track analysis for the Eastern North Pacific: 1970-2009. Presentado en 30th AMS Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Ponte Vedra Beach, FL.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Liu, H. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058.

Sato, M., and Coauthors, 1993: Stratospheric aerosol optical depth, 1850-1990. *J. Geophys. Res.* 98, 22987-22994.

Simard, M., Pinto, N., Fisher, J. B., & Baccini, A. (2011). Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G4).

Skamarock, W. C., and Coauthors, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech.

Stanski, H. , Wilson, L. y Burrows, W. (1989). *Survey of Common Methods in Meteorology*.

White, W., and Coauthors, (1999). Short-term forecast validation of six models. *Weather and Forecasting*, 14(1), 84-108.