



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

**ANÁLISIS DEL EVENTO METEOROLÓGICO DEL 2007
RELACIONADO CON LA INUNDACIÓN DE TABASCO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)**

P R E S E N T A

JOSÉ VALENTÍN LÓPEZ MÉNDEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE ZAVALA HIDALGO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DEL 2009

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado bajo el registro 202356.

Al Dr. Jorge Zavala Hidalgo, por el aprendizaje, amistad y la confianza ofrecida durante la maestría.

A los académicos: Dra. Graciela Binimelis de Raga, Dr. José Agustín García Reynoso, Dr. Ernesto Caetano Neto y Dr. Mario Arturo Ortíz Pérez; por los comentarios dirigidos a mejorar este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Planteamiento del problema.....	3
Objetivos.....	5
CAPÍTULO 1 ANÁLISIS SINÓPTICO Y REGIÓN DE ESTUDIO	7
1.1 Análisis sinóptico: primer periodo.....	7
1.2 Análisis sinóptico: segundo periodo.....	11
1.3 Región de estudio.....	14
CAPÍTULO 2 DATOS Y METODOLOGÍA	19
2.1 Modelo WRF.....	19
2.1.1 Descripción del núcleo ARW.....	21
2.1.2 Configuración del modelo.....	23
2.2 Bases de datos.....	25
2.2.1 Estaciones del SMN.....	25
2.2.2 Boyas del NDBC	29
2.2.3 Estaciones de la GASIR	29
2.2.4 Datos TRMM	29
2.2.5 Análisis finales del NCEP	31
2.2.6 Datos del reanálisis NCEPR2	31
2.2.7 Imágenes satelitales	31
2.2 Metodología	32
2.2.1 Estadísticos.....	32

CAPÍTULO 3 VALIDACIÓN DEL MODELO WRF	36
3.1 Consideraciones generales	37
3.2 Temperatura a 2 m: Casos particulares	38
3.3 Temperatura a 2 m: Desempeño general del modelo WRF	44
3.4 Viento a 10 m: Casos particulares	48
3.5 Viento a 10 m: Desempeño general del modelo WRF	57
3.6 Consideraciones para un trabajo futuro	60
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES	62
4.1 Definición de <i>Evento extremo</i>	63
4.2 Análisis del viento	64
4.3 Análisis de la precipitación	71
4.3.1 Registros in situ	72
4.3.2 Análisis del primer periodo de lluvias	74
4.3.3 Análisis del segundo periodo de lluvias	83
4.3.4 Análisis de las diferencias entre los periodos de precipitación	96
4.4 Influencia del huracán Noel	104
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	113

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

- 2.1 Lista de las estaciones meteorológicas del SMN y de las boyas del NDBC incluyendo la entidad, coordenadas y elevación.-----26
- 2.2 Lista de las estaciones meteorológicas de la GASIR incluyendo la entidad, coordenadas y elevación-----30

CAPÍTULO 3

- 3.1 Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z -----39
- 3.2 Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro-----43
- 3.3 Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z-----50
- 3.4 Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC-----56

CAPÍTULO 4

- 4.1** Correlación compleja entre el vector de viento observado a 10 m de las boyas del NDBC y el estimado con el modelo WRF-----70
- 4.2** Precipitaciones acumuladas (mm) en las estaciones de la GASIR para los dos periodos de precipitación intensa y el total de ambos eventos -----74
- 4.3** Estadísticos asociados a la comparación de las precipitaciones estimadas por el TRMM y el WRF contra los registros de las estaciones de la GASIR durante el primer periodo de precipitaciones-----83
- 4.4** Precipitaciones acumuladas en las estaciones de la GASIR del 28 al 31 de octubre, considerado como el segundo periodo para este análisis; y del 28 de octubre al 2 de noviembre, consideradas como el total del segundo evento de precipitación -----84
- 4.5** Estadísticos asociados a la comparación de las precipitaciones estimadas por el TRMM y el WRF contra los registros de las estaciones de la GASIR durante el segundo periodo de precipitaciones-----95

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

1.1	Análisis de superficie del día 21 de octubre a las 03Z -----	8
1.2	Imagen infrarroja del satélite GOES del día 21 de Octubre a las 03Z-----	9
1.3	Análisis de superficie del día 23 de octubre a las 15Z -----	10
1.4	Imagen infrarroja del satélite GOES del día 23 de Octubre a las 12Z -----	10
1.5	Análisis de superficie del día 25 de octubre a las 06Z -----	11
1.6	Análisis de superficie para los días (a) 29 de octubre a las 21Z y (b) 31 de octubre a las 03Z -----	12
1.7	Análisis de superficie del día 27 de octubre a las 06Z e imagen infrarroja del satélite GOES del día 27 de Octubre a las 06Z -----	13
1.8	Análisis de superficie del día 30 de octubre a las 21Z -----	14
1.9	Istmo de Tehuantepec -----	15
1.10	Normales climatológicas mensuales de la temperatura media (1951-1980) para las ciudades de: Xalapa, Ver., Oaxaca, Oax., Tuxtla Gutiérrez, Chis. y Villahermosa, Tab.-----	16
1.11	Normales climatológicas de la lámina mensual de precipitación acumulada (1941-1996) para los estados de Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Tabasco -----	17

CAPÍTULO 2

2.1	Principales componentes del modelo WRF 3.0-----	21
2.2	Diagrama de flujo del modelo WRF 3.0-----	22
2.3	Dominio utilizado para las simulaciones numéricas con el modelo WRF-3.0 -----	24
2.4	Ubicación geográfica de las 72 EMAS del SMN y de las tres boyas del NDBC ---	28
2.5	Ubicación geográfica de las estaciones de la GASIR-----	30

CAPÍTULO 3

- 3.1** Pronóstico de temperatura a 72 horas en la estación de Campeche, Camp., iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Series de temperatura de los datos observados y pronosticados por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de las series de temperatura -----38
- 3.2** Pronóstico de temperatura a 72 horas en la estación de Angamacutiro, Mich., iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Series de temperatura de los datos observados y pronosticados por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de las series de temperatura -----39
- 3.3** Estadísticos para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre con relación a las observaciones en la estación de Campeche, Camp.-----41
- 3.4** Estadísticos para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre con relación a las observaciones en la estación de Angamacutiro, Mich.-----42
- 3.5** Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre-----45
- 3.6** Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF -----47
- 3.7** Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42002, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado y pronosticado por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento-----48
- 3.8** Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42001, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado y pronosticado por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento-----49
- 3.9** Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42001, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado y pronosticado por el modelo en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento-----49

3.10	a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42002. b) Rapidez del viento medido en la boya-----	53
3.11	a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42001. b) Rapidez del viento medido en la boya-----	54
3.12	a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42055. b) Rapidez del viento medido en la boya-----	55
3.13	Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de viento a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre-----	59
3.14	Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF-----	60

CAPÍTULO 4

4.1	Pronóstico a 57 horas de la rapidez y dirección del viento a 10 m con el modelo WRF (WRF-21-10-2007-12Z)-----	65
4.2	Pronóstico a 24 horas de la rapidez y dirección del viento a 10 m con el modelo WRF (WRF-22-10-2007-12Z)-----	65
4.3	Puntos tomados como referencia para definir un <i>norte</i> -----	67
4.4	Rapidez del viento a 10 m cada 6 horas de los datos del NCEPR2 en el punto 20°N, 93.75°W para el periodo 1979-2007-----	67
4.5	Distribución de frecuencias, como porcentaje de ocurrencia, de la rapidez del viento en los eventos de norte para el periodo 1979-2007 a partir de los datos del NCEPR2 -----	68
4.6	Observaciones horarias de la rapidez del viento a 10 m en las boyas del NDBC del 17 al 31 de octubre del 2007 -----	69
4.7	Comparación entre los vectores de viento a 10 m obtenidos con el modelo WRF en los puntos interpolados en las coordenadas de las boyas y las observaciones en las boyas del NDBC ubicadas en el Golfo de México, del 17 al 31 de octubre del 2007-----	70
4.8	Correlación lineal entre los datos horarios de la rapidez del viento observado a 10 m en las boyas del NDBC y los obtenidos con el modelo del 17 al 31 de octubre -----	71

4.9	Precipitaciones diarias acumuladas en las estaciones de la GASIR del 20 de octubre al 5 de noviembre del 2007-----	73
4.10	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-23-10-2007-12Z. (b) WRF-22-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas-----	75
4.11	Presión reducida al nivel del mar y vorticidad absoluta en 1000 hPa. FNL-23-10-2007-12Z-----	76
4.12	Imagen satelital infrarroja del 23-10-2007-12Z -----	76
4.13	Humedad relativa y viento en 850 hPa. a) FNL-24-10-2007-12Z b) WRF: 22-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas -----	77
4.14	Cortes zonales de humedad relativa en 17.43 °N (latitud de Sayula, Chiapas). a) FNL-22-10-2007-12Z; b) WRF-22-10-2007-12Z, condiciones iniciales; c) FNL-24-10-2007-00Z; d) WRF 23-10-2007-12Z, pronóstico a 36 horas -----	78
4.15	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir del 22-10-2007-12Z. b) TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z-----	80
4.16	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir del 22-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z -----	81
4.17	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-26-10-2007-12Z. (b) WRF-25-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas -----	85
4.18	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-29-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas -----	87
4.19	Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-30-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas -----	88
4.20	Humedad relativa y viento en 400 hPa. (a) FNL-29-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas -----	89
4.21	Cortes zonales de humedad relativa en 17.22 °N (latitud de Ocoatepec, Chiapas). a) FNL-28-10-2007-12Z. b) WRF 23-10-2007-12Z, condiciones iniciales. c) FNL-24-10-2007-00Z. d) WRF 23-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas -----	91
4.22	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir de 28-10-2007-12Z. b) TRMM del 28-10-2007-12Z al 31-10-2007-12Z-----	92

4.23	a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir de 28-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z-----	94
4.24	Latitudes utilizadas para realizar los cortes zonales -----	96
4.25	Cortes zonales para las latitudes mostradas en la figura 4.24. a) Pronóstico a 24 horas del día 22 de octubre. b) Pronóstico a 24 horas del día 28 de octubre-----	97
4.26	Cortes zonales igual que en 4.25. En (a), (b) y (c) se muestra el pronóstico a 24, 48 y 72 horas respectivamente, iniciando el modelo el día 22 de octubre. En (d), (e) y (f) se muestra el pronóstico a 24, 48 y 72 respectivamente, iniciando el modelo el día 28 de octubre-----	99
4.27	Cortes zonales como en 4.25. a) Pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 22 de octubre. b) Pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 28 de octubre-----	101
4.28	Flujo de vapor de agua para los dos eventos de precipitación durante 72 horas de pronóstico. a) Flujo horario. b) Flujo acumulado-----	102
4.29	Precipitaciones acumuladas en las estaciones de la GASIR del 20 de octubre al 5 de noviembre-----	103
4.30	Imágenes satelitales del día 28 de octubre a las 12Z. a) Imagen infrarroja indicando la temperatura del tope de las nubes de acuerdo con la escala de la figura 1.2. b) Imagen de vapor de agua-----	104
4.31	Análisis de superficie del día 28 de octubre a las 12Z -----	105
4.32	Humedad relativa y viento en 850 hPa. WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 72 horas -----	106
4.33	Cortes meridionales para las longitudes mostradas en la figura 4.32. Pronóstico a 72 horas del 28 de octubre-----	106

RESUMEN

A finales de octubre y principios de noviembre del 2007, las condiciones meteorológicas asociadas a un frente frío ocasionaron daños en las plataformas petroleras ubicadas en el sur del Golfo de México e inundaciones en el sureste de la República Mexicana. Los daños económicos provocados por este evento fueron evaluados en 31.8 mil millones de pesos y son considerados entre los más costosos en la República Mexicana. Con el objetivo de estudiar estas condiciones meteorológicas, se utilizó el modelo meteorológico *Weaher Research and Forecasting Model*, configurado como un sistema de pronóstico operativo para la República Mexicana. Se analizaron también los reanálisis del *National Climatic Environmental Prediction* (NCEP), las estimaciones de precipitación del *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), datos de boyas océano-meteorológicas y de estaciones meteorológicas. Los resultados indican que el modelo reproduce con bastante precisión los sistemas meteorológicos que ocasionaron los vientos intensos sobre el Golfo de México y las precipitaciones intensas en los estados de Chiapas y Tabasco que afectaron, principalmente, a la ciudad de Villahermosa. El análisis del viento mostró que el evento de norte asociado al frente frío fue un *evento extremo*, ya que se encuentra dentro del 1.5 % de los más intensos del total de los *nortes* considerando el periodo 1979-2007. En cuanto a las precipitaciones, los resultados muestran que estas fueron consecuencia de diversos factores; en primera instancia, por causa del frente frío número 4 que el 23 de octubre interactuó con un área de inestabilidad ubicada en el sureste del Golfo de México; posteriormente, entre el 28 y el 31 de octubre, como consecuencia de intensos vientos a lo largo de un frente estacionario que transportó humedad desde Florida hasta el Istmo de Tehuantepec, principalmente a través de los niveles bajos de la atmósfera. Se encontró que no hubo un aporte de humedad de la tormenta tropical Noel que se ubicaba al suroeste de Florida y que las precipitaciones fueron consecuencia de la combinación de condiciones meteorológicas y no del cambio climático antropogénico. La evaluación de los datos de precipitación indica que el satélite TRMM subestimó la precipitación hasta en un 100%, mientras que con las simulaciones numéricas se obtuvieron mejores resultados. El análisis del desempeño de las simulaciones numéricas mostró que en condiciones de viento débil el modelo tiene errores considerables en la dirección del viento, pero reproduce con bastante precisión los cambios drásticos en la dirección y magnitud asociados al evento extremo. Para la temperatura, se encontró que el modelo es capaz de reproducir gran parte de la variabilidad del ciclo diurno de temperatura, así como la variabilidad de este parámetro debida a cambios drásticos en las condiciones atmosféricas.

ABSTRACT

A finales de octubre y principios de noviembre del 2007, las condiciones meteorológicas asociadas a un frente frío ocasionaron daños en las plataformas petroleras ubicadas en el sur del Golfo de México e inundaciones en el sureste de la República Mexicana. Los daños económicos provocados por este evento fueron evaluados en 31.8 mil millones de pesos y son considerados entre los más costosos en la República Mexicana. Con el objetivo de estudiar estas condiciones meteorológicas, se utilizó el modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting Model*, configurado como un sistema de pronóstico operativo para la República Mexicana. Se analizaron también los reanálisis del *National Climatic Environmental Prediction* (NCEP), las estimaciones de precipitación del *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), datos de boyas océano-meteorológicas y de estaciones meteorológicas. Los resultados indican que el modelo reproduce con bastante precisión los sistemas meteorológicos que ocasionaron los vientos intensos sobre el Golfo de México y las precipitaciones intensas en los estados de Chiapas y Tabasco que afectaron, principalmente, a la ciudad de Villahermosa. El análisis del viento mostró que el evento de norte asociado al frente frío fue un *evento extremo*, ya que se encuentra dentro del 1.5 % de los más intensos del total de los *nortes* considerando el periodo 1979-2007. En cuanto a las precipitaciones, los resultados muestran que estas fueron consecuencia de diversos factores; en primera instancia, por causa del frente frío número 4 que el 23 de octubre interaccionó con un área de inestabilidad ubicada en el sureste del Golfo de México; posteriormente, entre el 28 y el 31 de octubre, como consecuencia de intensos vientos a lo largo de un frente estacionario que transportó humedad desde Florida hasta el Istmo de Tehuantepec, principalmente a través de los niveles bajos de la atmósfera. Se encontró que no hubo un aporte de humedad de la tormenta tropical Noel que se ubicaba al suroeste de Florida y que las precipitaciones fueron consecuencia de la combinación de condiciones meteorológicas y no del cambio climático antropogénico. La evaluación de los datos de precipitación indica que el satélite TRMM subestimó la precipitación hasta en un 100%, mientras que con las simulaciones numéricas se obtuvieron mejores resultados. El análisis del desempeño de las simulaciones numéricas mostró que en condiciones de viento débil el modelo tiene errores considerables en la dirección del viento, pero reproduce con bastante precisión los cambios drásticos en la dirección y magnitud asociados al evento extremo. Para la temperatura, se encontró que el modelo es capaz de reproducir gran parte de la variabilidad del ciclo diurno de temperatura, así como la variabilidad de este parámetro debida a cambios drásticos en las condiciones atmosféricas.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

Por su ubicación geográfica, la República Mexicana es afectada por sistemas meteorológicos de latitudes medias durante el invierno y por sistemas tropicales en verano. De octubre a abril un gran número de sistemas de alta presión provenientes de altas latitudes llegan a la República Mexicana; estos sistemas son conocidos comúnmente como *nortes* y se caracterizan por tener asociadas masas de aire frío y seco, provocando que las temperaturas mínimas del ciclo anual se registren en los meses de invierno y que las láminas de precipitación acumulada en el sureste del país sean las menores con respecto al ciclo anual de precipitación. De junio a noviembre predominan los sistemas tropicales asociados con masas de aire cálido y húmedo, por lo que se alcanzan los máximos en las láminas de precipitación para la mayor parte del país. Son varios los sistemas que afectan a la República Mexicana durante el verano; entre los más importantes están el monzón mexicano y los ciclones tropicales, tanto del Océano Pacífico como del Océano Atlántico. Los sistemas meteorológicos, tanto de invierno como verano, tienen influencia directa sobre la sociedad y los distintos sectores económicos del país. Por ejemplo, las bajas temperaturas que se registran cuando predominan los sistemas invernales llegan a causar decesos y pérdidas en el sector agrícola debido a que los cultivos no resisten las temperaturas extremas; en el verano, las constantes lluvias causan el crecimiento y desbordamiento de ríos que conllevan inundaciones y afectan a miles de personas.

Es claro entonces que México es vulnerable a una diversidad de patrones atmosféricos en cualquier época del año, y que puede verse afectado por un número grande de fenómenos meteorológicos en una determinada temporada del año (por ejemplo, varios ciclones tropicales), o bien por algunos

casos particulares que generen condiciones meteorológicas extremas. Esta situación hace evidente la necesidad de estudiar estos fenómenos, con el propósito de conjuntar información que ayude a prevenir o mitigar desastres futuros.

En este trabajo se estudia un evento particular, a saber, el frente frío número 4 ocurrido a finales de octubre del 2007, el cual se caracterizó por tener asociados vientos y precipitaciones intensas que contribuyeron al accidente en una de las plataformas petroleras ubicadas en el sur del Golfo de México y a la inundación en el estado de Tabasco, afectando principalmente la ciudad de Villahermosa, que es la capital del estado.

El estado de Tabasco está localizado en el sureste de la República Mexicana, tiene una extensión de 24,738 km² y representa el 1.3 % del territorio nacional (INEGI, 2008). Sus límites políticos están distribuidos de la siguiente manera: el norte del estado está limitado por el Golfo de México y Campeche; al sur está limitado por la frontera con el estado de Chiapas; al este limita con Campeche y la República de Guatemala, y al oeste con el estado de Veracruz. La superficie del estado está compuesta principalmente por una planicie con una altitud menor a 50 metros sobre el nivel del mar (msnm), pero en el sur empiezan las pendientes orográficas de las regiones montañosas que se extienden hacia el estado de Chiapas. La ubicación geográfica del estado, su baja altitud y su proximidad con el Golfo de México, determinan el desarrollo de climas cálidos con influencia marina, donde la variabilidad de temperatura es moderada. Tiene un ciclo estacional de precipitación con lluvias más intensas de junio a octubre, y es una de las seis regiones más lluviosas, ya que junto con Veracruz, Chiapas, Oaxaca, Campeche y la Sierra de Chihuahua contribuyen al 40% del volumen de precipitación anual total en México.

De acuerdo con el análisis de impacto socioeconómico realizado por la CEPAL (2008), la inundación cubrió con agua el 62% de la superficie del estado y dejó casi 1.5 millones de damnificados (75 % de la población de Tabasco). El daño económico fue evaluado en 31.8 miles de millones de pesos considerando todos los sectores, actividades y estratos sociales afectados, y es catalogado como uno de los desastres más grandes ocurridos en México, sólo superado por el impacto de los sismos en la Ciudad de México en 1985 y los efectos acumulados de los huracanes Wilma y Stan ocurridos en el 2005.

El estudio del evento meteorológico llevado a cabo en este trabajo se realiza fundamentalmente

utilizando el modelo numérico atmosférico de mesoescala llamado *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). El WRF es el resultado de la interacción entre diversas instituciones que se han planteado como objetivo construir un modelo de pronóstico numérico para lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y la predicción del tiempo (Skamarock, 2008). Es denominado modelo de *siguiente generación* debido a las capacidades que se han agregado a lo largo de su desarrollo y que han mejorado, en muchos casos, la reproducción de procesos atmosféricos con respecto a modelos similares como el MM5 (*Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model*). En México existen varias instituciones que han implementado operativamente modelos para realizar predicción numérica del tiempo; sin embargo, la mayoría ha trabajado con el modelo MM5, el cuál ha dejado de ser desarrollado por el surgimiento del modelo WRF (UCAR, 2008b). Aunque es grande el número de investigaciones realizadas con el modelo MM5 en México, no existen trabajos acerca de una evaluación de los sistemas de pronóstico implementados y menos de estudios análogos con el modelo WRF. Por esta razón, en este trabajo se utiliza el modelo WRF como herramienta principal el cuál, a la par del desarrollo de este trabajo, ha sido implementado operativamente en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Además de analizar los detalles del evento meteorológico en particular, se estudian los alcances y limitaciones del modelo mediante un proceso de evaluación estadística, comúnmente denominado *validación*. Para lograrlo, se utilizan bases de datos que complementan la información meteorológica y que sirven para evaluar los resultados numéricos. Dichas bases de datos incluyen mediciones in situ, datos satelitales, salidas de otros modelos, etc.

Objetivos

Los objetivos planteados para el desarrollo del trabajo de tesis son los siguientes:

- Caracterizar los aspectos meteorológicos particulares del frente frío no 4 que afectó a la República Mexicana a finales de octubre y principios de noviembre del 2007, utilizando el modelo atmosférico WRF y diversas fuentes de datos.
- Evaluar la habilidad del modelo WRF para la reproducción del evento.
- Determinar con qué frecuencia pueden suceder eventos similares.

- Evaluar los productos satelitales de estimación de precipitación durante el evento.
- Evaluar el desempeño del modelo como un sistema de pronóstico aplicado a la República Mexicana.

La tesis consta de cinco capítulos. El capítulo uno incluye la descripción sinóptica del caso de estudio, es decir, una descripción de las condiciones meteorológicas que ocasionaron los vientos en el Golfo de México y las precipitaciones en el sureste de la República. En el capítulo dos se describe el modelo WRF y la configuración utilizada para realizar las simulaciones numéricas; asimismo se describen las bases de datos y los estadísticos usados para el proceso de validación. En el capítulo tres se presentan los resultados del proceso de validación; en primera instancia se analizan los pronósticos para algunos casos particulares en un tiempo determinado y posteriormente se extiende el análisis para la República Mexicana durante el periodo de tiempo que va del 1 de octubre al 5 de noviembre. En el capítulo cuatro se presentan y discuten los resultados referentes a las condiciones meteorológicas del evento con base en las simulaciones numéricas, analizando detalladamente la magnitud de los vientos y de las precipitaciones. Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 1

ANÁLISIS SINÓPTICO

Y REGIÓN DE ESTUDIO

Las condiciones meteorológicas que se analizan en este trabajo ocurrieron entre el 23 de octubre y el 2 de noviembre del 2007. De acuerdo con la información meteorológica recopilada, el análisis del evento puede realizarse considerando dos periodos de tiempo. El primero involucra las condiciones meteorológicas del 23 al 25 de octubre, periodo que se caracterizó por la entrada de un sistema de alta presión a la República Mexicana que provocó vientos intensos y fuerte oleaje sobre el Golfo de México, así como precipitaciones en los estados de Veracruz, Tabasco, Chiapas y Campeche. El segundo periodo puede considerarse entre el 28 de octubre y 2 de noviembre, el cual se caracterizó por intensas precipitaciones sobre el sureste de México que contribuyeron a uno de los desastres más grandes registrados en México, la inundación de la ciudad de Villahermosa en Tabasco. Considerando los daños reportados durante estos dos periodos de tiempo, la región de estudio se centra en el Golfo de México y en la región sureste de la República Mexicana, particularmente los estados de Chiapas y Tabasco.

1.1 Análisis sinóptico: primer periodo

De acuerdo con el análisis de superficie del *Hydrometeorological Prediction Center* (HPC, 2008), el 21 de octubre a las 03Z (Fig. 1.1) un sistema de alta presión entró a Estados Unidos (E.U.) por los estados de Oregon y Washington, cuyo centro presentaba un valor máximo de presión reducida al nivel del mar (PRNM) de 1028 hPa. Al mismo tiempo, en el Golfo de México se ubicaba un frente estacionario que se extendía desde el estado de Florida en E. U. hasta Tamaulipas en México y en el Mar Caribe se identificaba una zona de inestabilidad asociada a una vaguada¹. En el Océano

¹ El término vaguada se refiere a un área alongada de relativa baja presión atmosférica.

Pacífico se aprecia la tormenta tropical Kiko que, de acuerdo con el *National Hurricane Center* (NHC) se ubicaba a más de 150 millas náuticas de Manzanillo, Colima, con un desplazamiento y continua debilitación en dirección oeste-noreste (NHC, 2008).

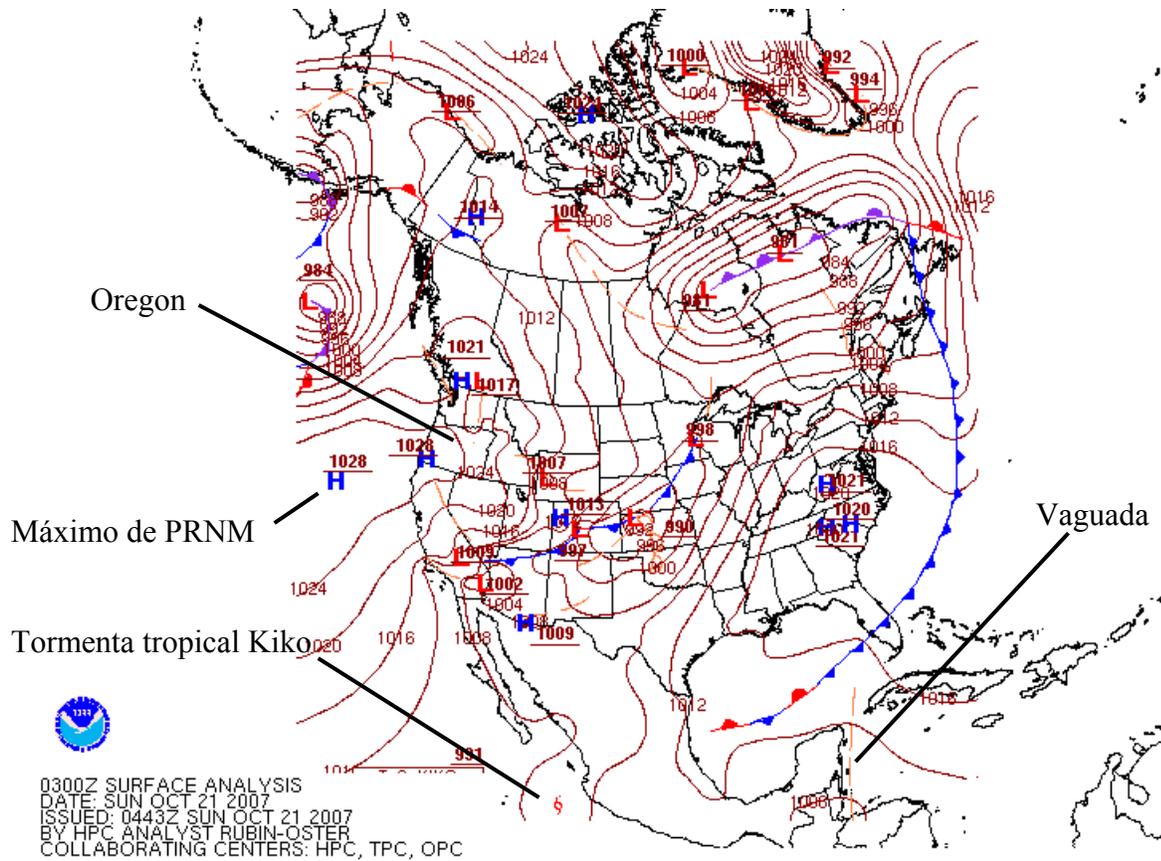


Figura 1.1. Análisis de superficie del día 21 de octubre a las 03Z. La figura denota con H (Azul) los centros de alta presión y con L (Roja) los centros de baja presión. Las líneas azules con triángulos indican los frentes fríos, las rojas con medios círculos los frentes cálidos, la combinación de las dos líneas anteriores los frentes estacionarios y las líneas moradas representan los frentes ocluidos. Las líneas de vaguada se denotan por líneas discontinuas de color naranja. Fuente: HPC.

La imagen infrarroja del satélite GOES correspondiente a la misma fecha del análisis (Fig. 1.2) muestra un área de fuerte convección sobre el Golfo de Tehuantepec, el área de inestabilidad asociada a la vaguada en el Mar Caribe y una débil convección en el Océano Pacífico asociada con los efectos de la tormenta tropical Kiko.

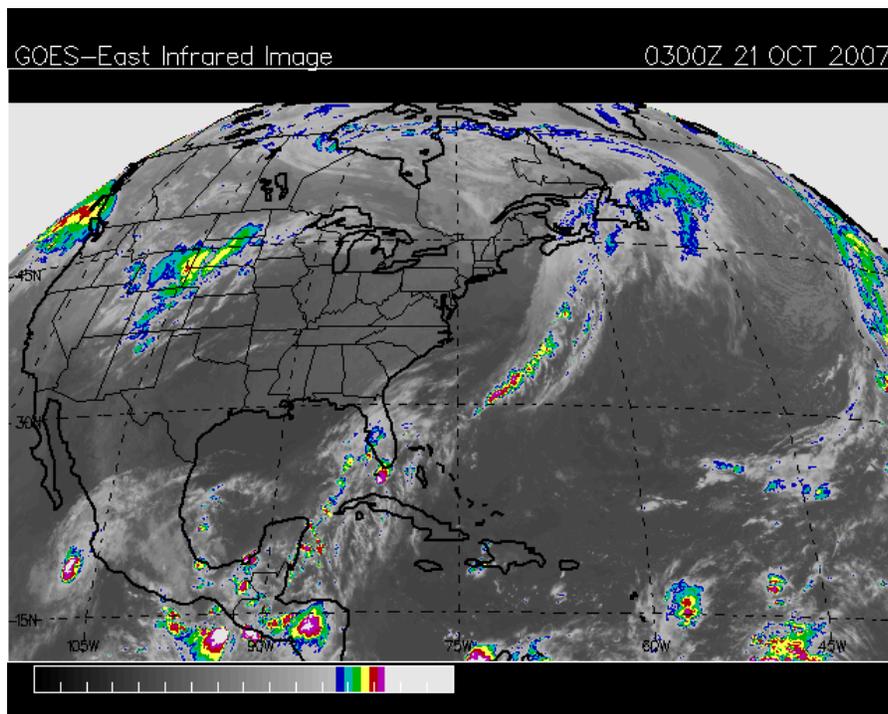


Figura 1.2. Imagen infrarroja del satélite GOES del día 21 de Octubre a las 03Z. La barra de color indica la temperatura del tope de las nubes, el color más oscuro representa temperaturas mayores, los colores y el brillo intenso indican las temperaturas más bajas. Estas últimas pueden ser asociadas con áreas de fuerte convección y tormentas. Fuente: *California Regional Weather Service (CRWS, 2008)*.

El movimiento de los sistemas meteorológicos fue tal que en 24 horas el sistema de alta presión intensificó su presión al pasar por Las Rocallosas, alcanzando un valor de PRNM de 1043 hPa. Posteriormente, el sistema se desplazó hacia el sureste y la masa de aire frío asociada se extendió sobre un área que abarcaba el oeste de E.U., el norte de México y el Golfo de México (Fig. 1.3), imponiendo condiciones de subsidencia en la atmósfera, descenso de temperaturas en superficie y convección a lo largo de la línea frontal.

El paso del sistema de alta presión a través del Golfo de México provocó vientos intensos y fuerte oleaje que afectaron las zonas costeras mexicanas. La humedad asociada a la vaguada en el Caribe se desplazó hacia el oeste e interactuó con la convección que generaba el frente frío al atravesar el Golfo de México, ocasionando lluvias intensas en los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas entre los días 22 y 25 de octubre (Fig. 1.4).

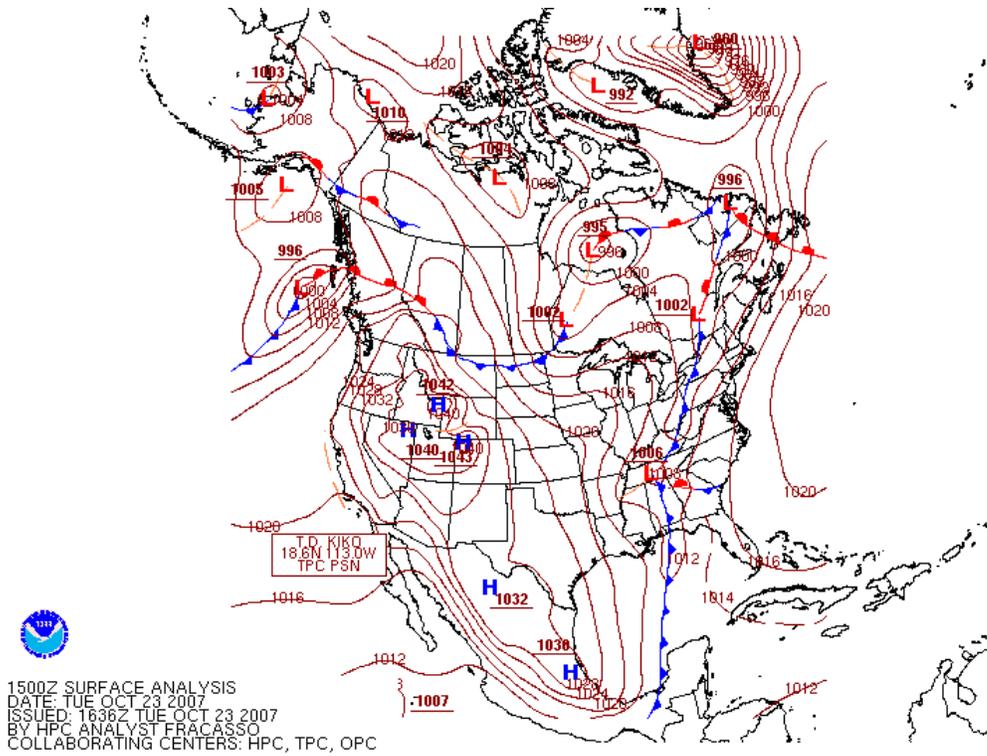


Figura 1.3. Similar a la figura 1.1 pero para el día 23 de octubre a las 15Z.

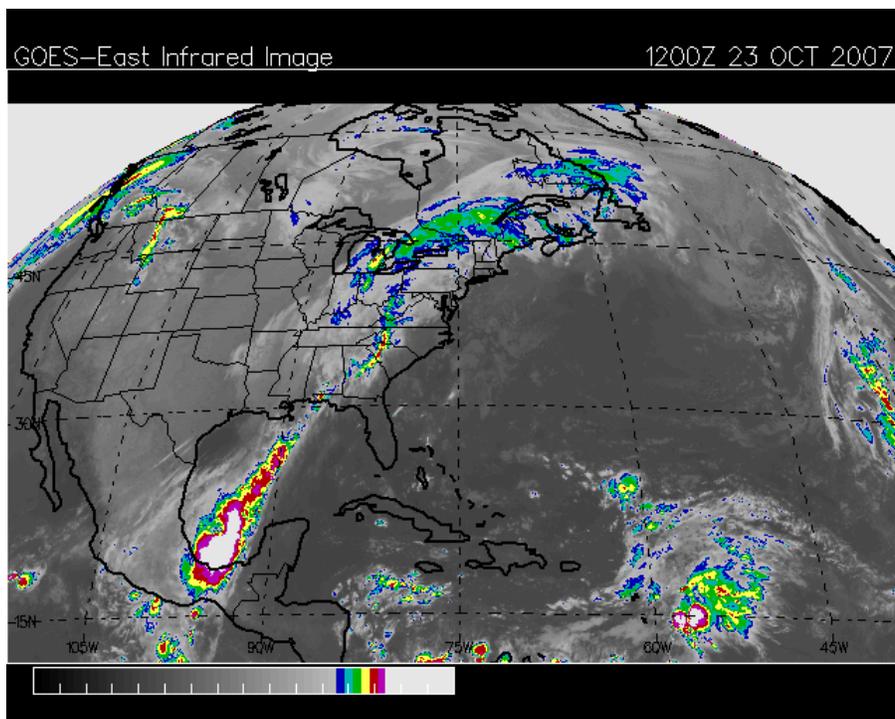


Figura 1.4. Similar a la figura 1.2 pero para el día 23 de Octubre a las 12Z.

El reporte especial emitido por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) acerca del frente frío, menciona que los fuertes vientos sobre el Golfo provocados por el sistema de alta presión fueron pronosticados desde el día 18 de octubre (SMN, 2007). El pronóstico del día 22 de octubre del SMN, 24 horas antes de que el frente frío cruzara el Golfo, indicó que la intensidad de los vientos sería de *fuerte* a *severa*. De acuerdo con la escala que manejan en los pronósticos de viento, el término *fuerte* significa vientos entre 62 y 88 km/hr y *severo* significa vientos mayores a 118 km/h; ambos términos están relacionados con la escala Beaufort, la cual hace referencia a vientos sostenidos. El reporte no contiene información especial acerca de los pronósticos de precipitación a pesar de que ahí mismo se indica que del 19 al 25 de octubre se registraron precipitaciones acumuladas de hasta 396 mm en Sayula, Chiapas.

1.2 Análisis sinóptico: segundo periodo

El análisis de superficie del día 25 de octubre (Fig. 1.5) muestra que el frente frío se modificó a frente estacionario debido a la interacción con una gran masa de aire tropical ubicada en el Mar Caribe. Posteriormente, el frente se desplazó hacia el oeste como un frente cálido hasta llegar al Istmo de Tehuantepec, donde se convirtió en estacionario debido a que un nuevo sistema de alta presión llegó al Golfo de México, provocando una nueva intensificación de los vientos con una componente predominante del norte, dirigidos a la costa sur del Golfo de México.

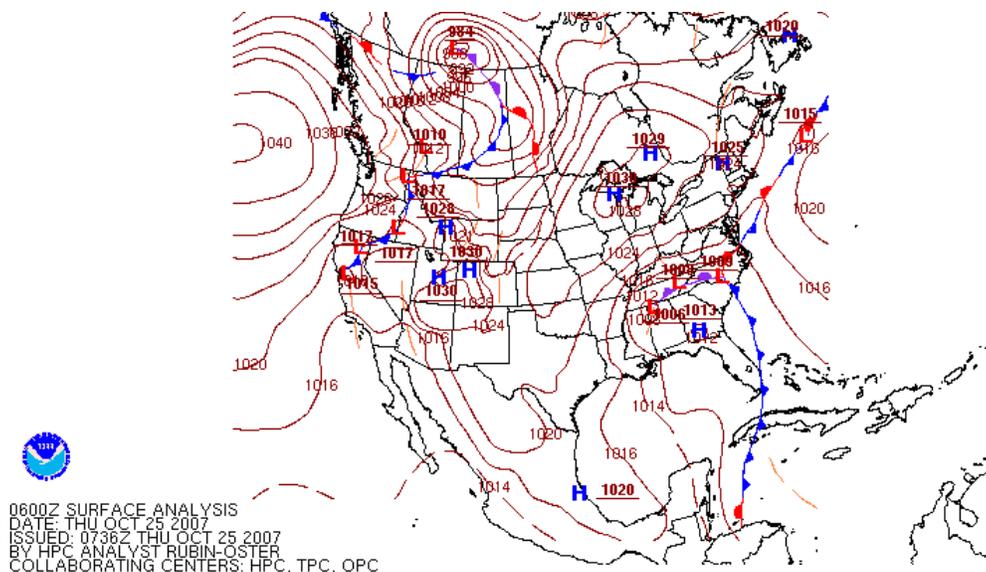


Figura 1.5. Similar a la figura 1.1 pero para el día 25 de octubre a las 06Z.

El día 29 el frente estacionario se extendía desde Florida hasta las costas de Tabasco (Fig. 1.6a) manteniéndose en esa posición por más de 48 horas (Fig. 1.6b), generando un flujo de vientos hacia el Istmo que transportó humedad y contribuyó a las precipitaciones registradas en esa región.

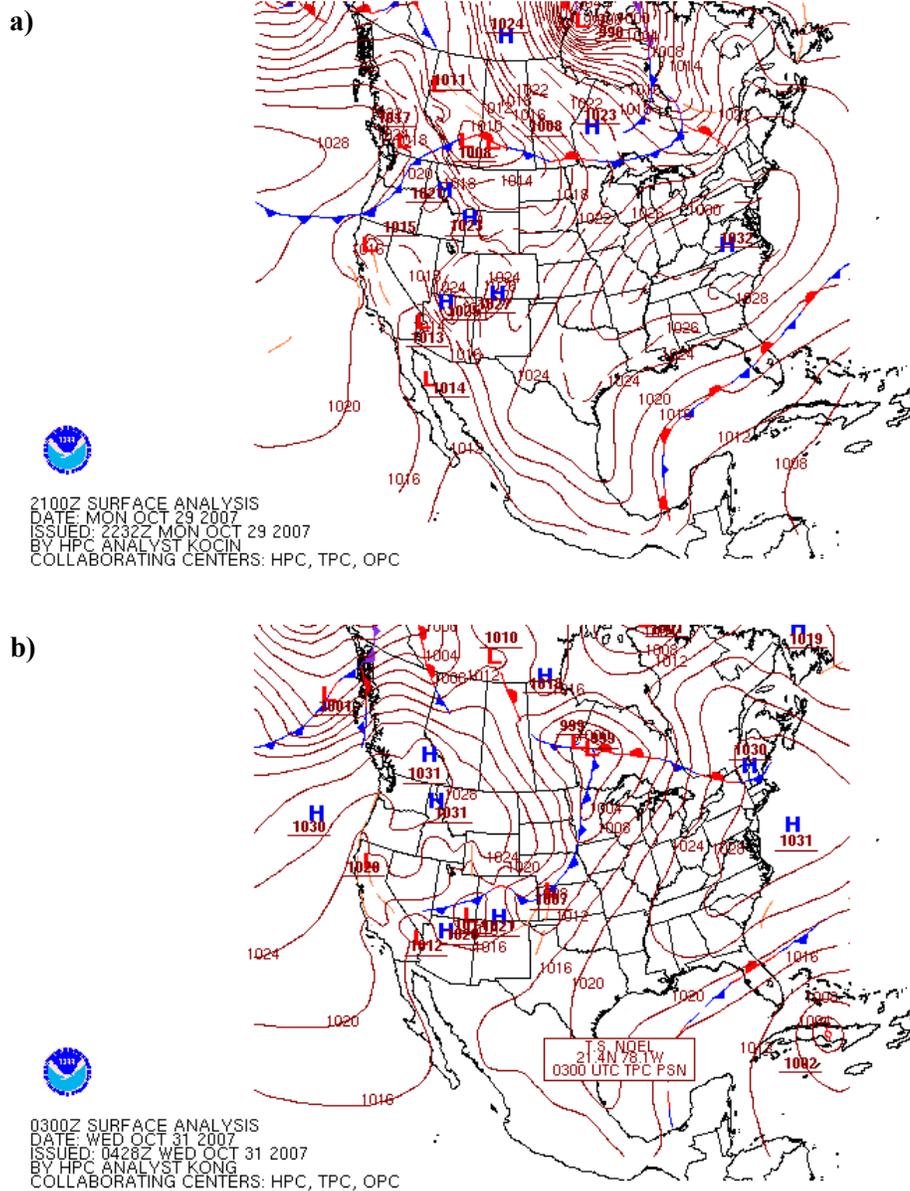


Figura 1.6. Similar a la figura 1.1 pero para los días (a) 29 de octubre a las 21Z y (b) 31 de octubre a las 03Z.

Mientras el frente se desplazaba al oeste en el Mar Caribe un área de convección asociada a una línea de vaguada y una onda tropical se desplazaba hacia la Península de Yucatán (Fig. 1.7a y 1.7b). La humedad asociada a estas condiciones fue advectada hacia el Istmo al encontrar el flujo de vientos ya establecido sobre el Golfo de México.

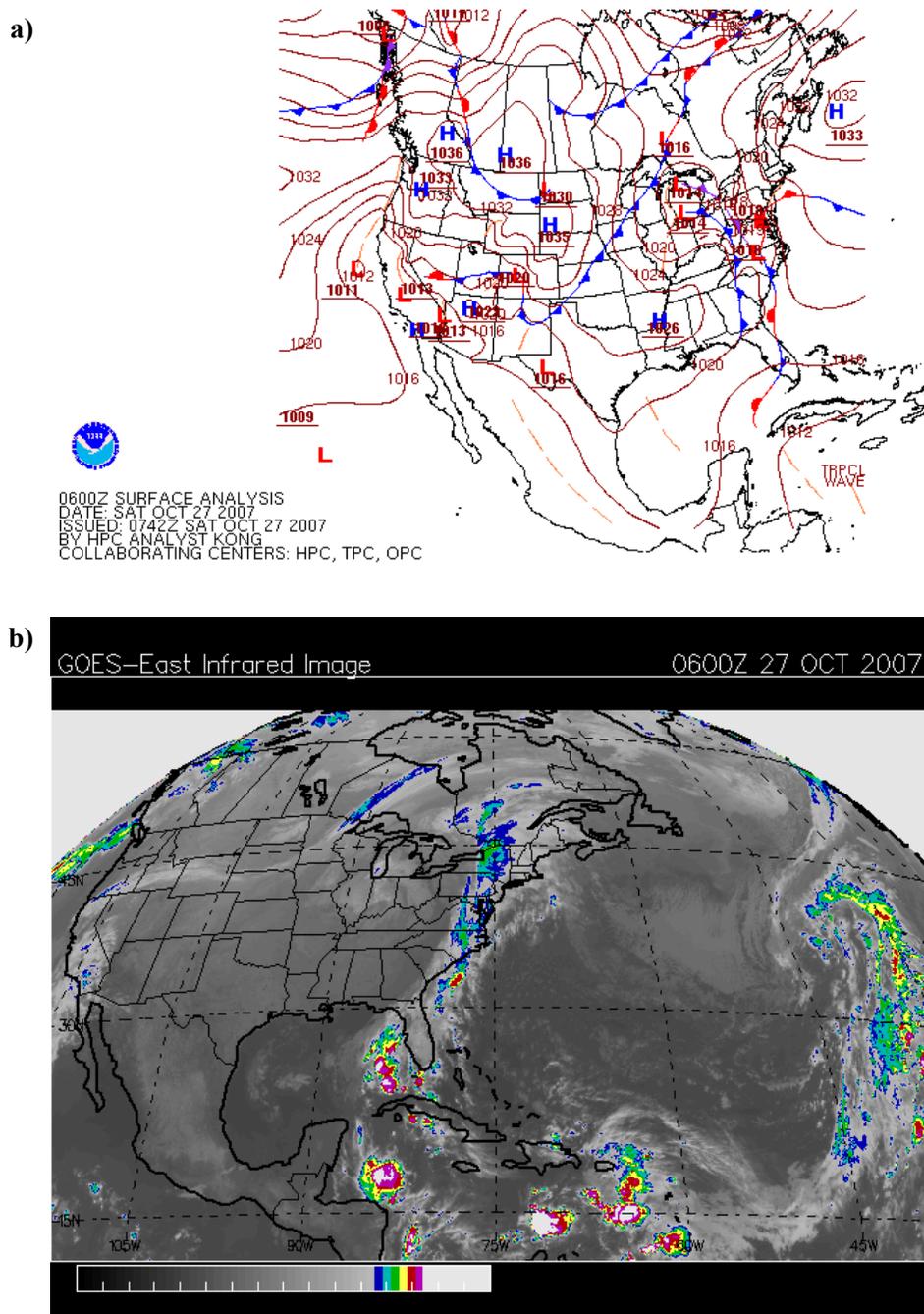


Figura 1.7. (a) Análisis de superficie del día 27 de octubre a las 06Z. (b) Imagen infrarroja del satélite GOES del día 27 de Octubre a las 06Z.

Los pronósticos del SMN del 28 al 31 de octubre indicaron precipitaciones *intensas*, categoría máxima en su escala para los pronósticos de precipitación, lo cual significa que las lluvias acumuladas en 24 horas podrían ser mayores a 70 mm. Los registros superaron ampliamente la precipitación que estimaban los pronósticos, ya que el informe indica que la precipitación acumulada entre del 26 al 31 de octubre en Ocoatepec, Chiapas alcanzó 962 mm.

Por otra parte, la figura 1.8 muestra sobre Cuba el centro de baja presión asociado a la tormenta tropical Noel. El desarrollo de este sistema ocurrió cuando aún se encontraba el frente estacionario y el flujo dirigido hacia el Istmo, por lo que se analizó la posibilidad de que este sistema hubiera aportado humedad a través de este flujo de vientos, contribuyendo a las precipitaciones del segundo periodo (ver sección 4.4).

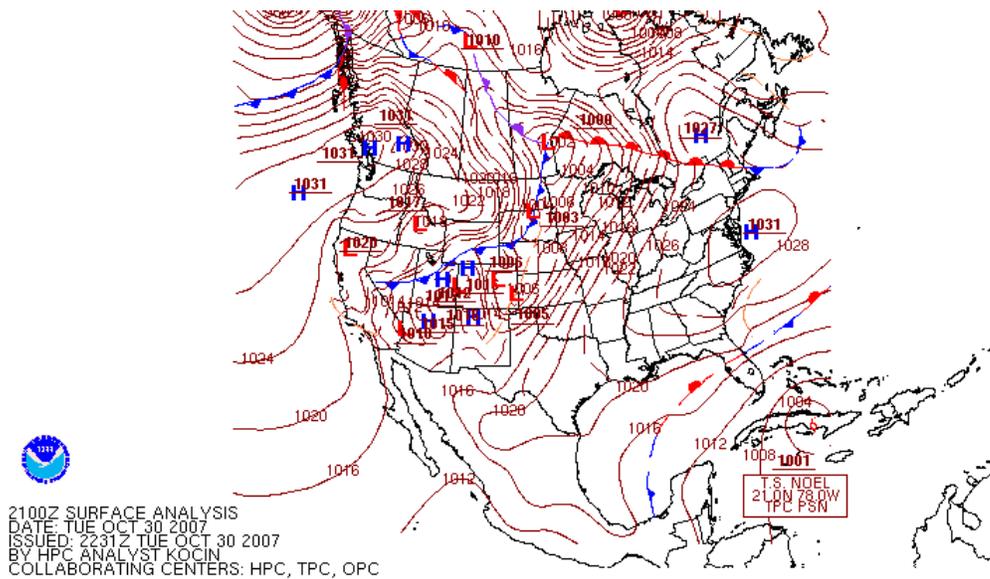


Figura 1.8. Análisis de superficie del día 30 de octubre a las 21Z.

1.3 Región de estudio

La región de estudio de este trabajo se determinó en base a las zonas que fueron afectadas con las condiciones meteorológicas descritas en las secciones anteriores. En el primer periodo los fuertes vientos que se registraron en el Golfo de México contribuyeron al accidente de la plataforma petrolera Usumacinta ubicada en el sur del Golfo de México. El accidente ocasionó 22 pérdidas humanas, daños económicos y un impacto al medio ambiente y a la pesca derivados del derrame de

combustible (Senado de la República, 2008). En cuanto al segundo periodo la descripción sinóptica indica que las precipitaciones contribuyeron a la ocurrencia de la inundación de la ciudad de Villahermosa en Tabasco. Por lo anterior y de acuerdo con lo descrito en la introducción, el área geográfica de interés para este estudio es el sur del Golfo de México y el sureste de México, particularmente los estados de Chiapas y Tabasco.

El estado de Tabasco tiene una extensión territorial de 24,738 km² y representa el 1.3% de la superficie del país mientras que Chiapas cuenta con una extensión de 73,289 km² y representa el 3.7% del territorio (INEGI, 2008). Parte de los estados de Tabasco, Chiapas, Oaxaca y Veracruz conforman la región del Istmo de Tehuantepec, que es una delgada extensión territorial que separa al Golfo de México del Océano Pacífico (Fig. 1.9). Esta región se ubica en medio de varias cadenas montañosas, al oeste se localiza la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Oaxaca mientras que al este se encuentra la Sierra Madre de Chiapas, con una altitud superior a los 2,000 msnm. El Istmo representa un cambio drástico en la topografía pues su altitud es de aproximadamente 250 msnm, con una extensión longitudinal aproximada de 40 km. Enfocándose sobre los estados de Tabasco y Chiapas, se observa que la altitud de la Sierra de Chiapas disminuye hacia los límites con el estado de Tabasco, en donde el terreno se convierte en una planicie con alturas por debajo de los 50 msnm, lo cual convierte a la región en un área vulnerable a inundaciones.

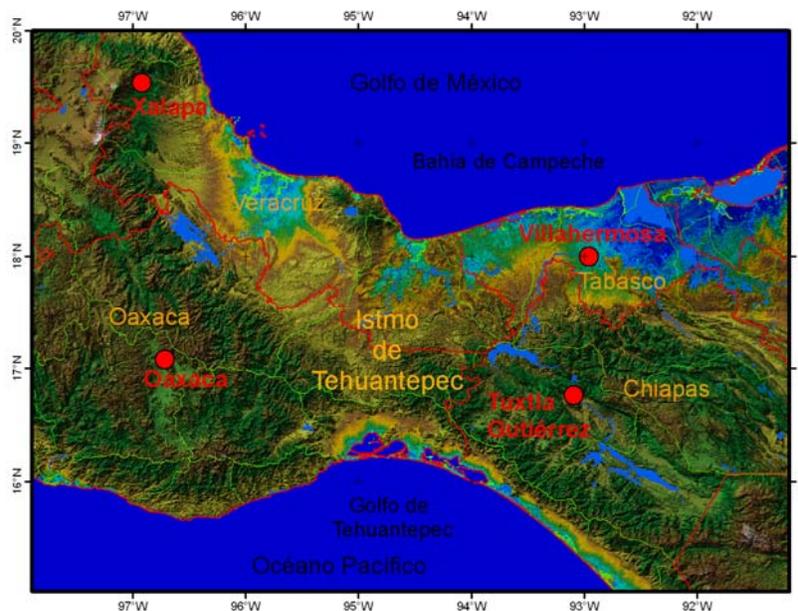


Figura 1.9. Istmo de Tehuantepec.

La climatología del Istmo está determinada por los sistemas meteorológicos de gran escala de invierno y verano, y aunque los sistemas de alta presión no son los únicos factores que regulan la climatología de la región, si tienen influencia en la variabilidad anual de la temperatura y de la precipitación.

De octubre a abril la región está influenciada por el paso constante de los sistemas de alta presión provenientes de E.U., los cuales causan un descenso en la temperatura media a partir de los meses de septiembre y octubre debido a que están asociados con masas de aire fro (Fig. 1.10). Para el mes de marzo la temperatura media empieza a ascender, justo cuando el número de sistemas fríos de latitudes medias que entran a la región disminuye y las condiciones meteorológicas predominantes son de sistemas de latitudes tropicales.

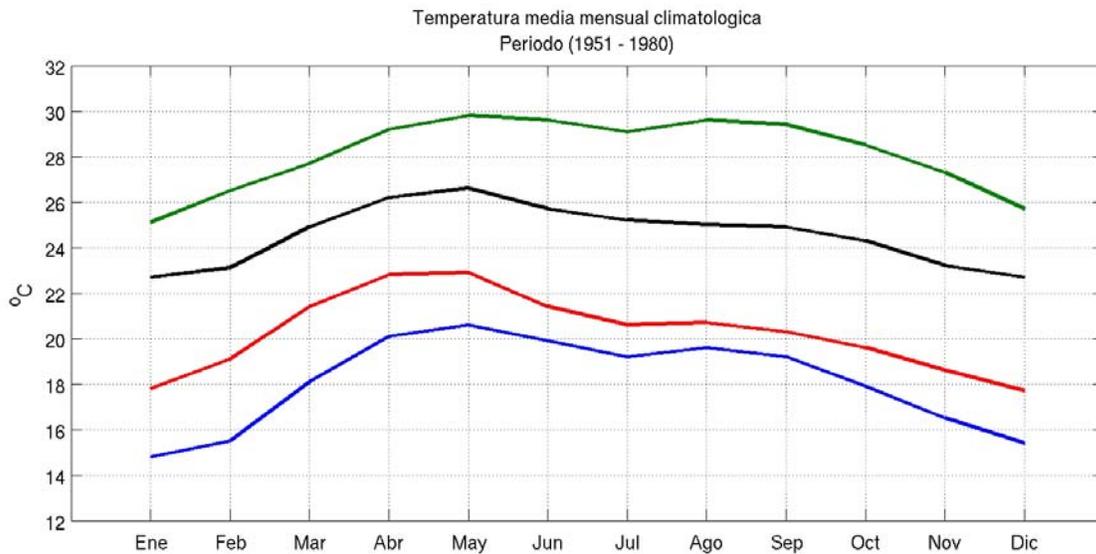


Figura 1.10. Normales climatológicas mensuales de la temperatura media (1951-1980) para las ciudades de: Xalapa, Ver. (azul), Oaxaca, Oax. (rojo), Tuxtla Gutiérrez, Chis. (negro) y Villahermosa, Tab. (verde).

La influencia de las condiciones meteorológicas asociadas con los sistemas de alta presión también es clara en la precipitación pues la lámina mensual acumulada en el sureste del país muestra una tendencia a disminuir en los meses de invierno (Fig. 1.11). Posteriormente, los promedios mensuales aumentan a partir de mayo por la influencia de sistemas como ondas tropicales o huracanes. Estas condiciones predominan hasta octubre, cuando empieza a incrementar el número de sistemas de alta presión que llegan a la región. En la figura 1.11 se aprecia también que los promedios mensuales de

precipitación acumulada más grandes para el mes de octubre, corresponden a los estados de Tabasco y Chiapas, con un valor de 346 mm y 230 mm, respectivamente. Dichos promedios son también los más grandes en todo el país.

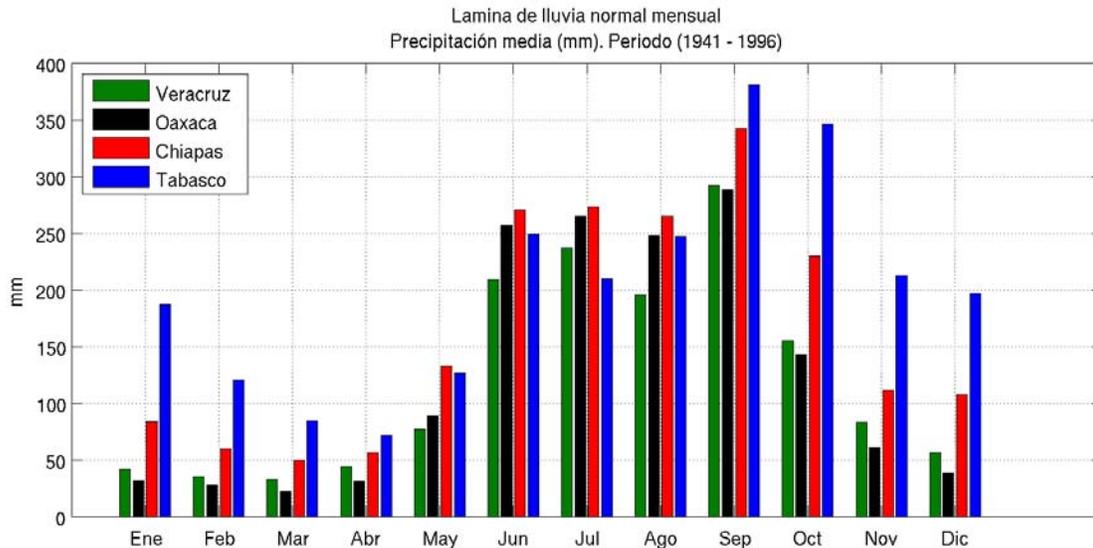


Figura 1.11. Normales climatológicas de la lámina mensual de precipitación acumulada (1941-1996) para los estados de Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Tabasco. Fuente: SMN

Aunque está bien definida la influencia de las condiciones meteorológicas que predominan en la zona durante invierno y verano, es importante notar que en el mes de octubre existe la influencia de ambos patrones, por lo que podría considerarse como un intervalo de transición entre la influencia de los sistemas tropicales y los de latitudes medias. La formación del huracán Noel y la ocurrencia del frente frío número 4 en octubre del 2007, mostrados en el análisis sinóptico de la sección anterior, son un claro ejemplo de esta situación.

De acuerdo con las normales climatológicas del SMN para el periodo 1971-2000, la precipitación mensual acumulada en la ciudad de Villahermosa para el mes de octubre es de 324 mm; la máxima mensual para ese mes es de 943 mm, registrada en 1980; y la máxima diaria es de 340 mm, registrada el 30 de octubre del mismo año. Para el caso de Ocoatepec, Chiapas, el promedio de precipitación mensual es de 577 mm; la máxima mensual para octubre es de 1,034 mm, registrada en 1999; y la máxima diaria es de 262 mm registrada el 27 de octubre pero de 1997. Los datos climatológicos de la ciudad de Villahermosa, lugar en donde ocurrió la inundación, y de Ocoatepec, lugar que registró las máximas precipitaciones acumuladas, demuestran que en los últimos 30 años

han ocurrido precipitaciones de una magnitud similar a las registradas a finales de octubre y principios de noviembre del 2007. Esto sugiere que las precipitaciones extremas no son producto del cambio climático sino de las condiciones meteorológicas que, excluyendo las características particulares de cada uno de los sistemas que interaccionaron, pueden ocurrir cualquier año.

CAPÍTULO 2

DATOS Y METODOLOGÍA

En el capítulo anterior se hizo un análisis de las condiciones meteorológicas que causaron los fuertes vientos en el Golfo de México y las precipitaciones en el sureste de la República Mexicana, proporcionando una idea preliminar acerca de la complejidad del evento. Para llevar a cabo un análisis detallado es necesario revisar toda la información meteorológica relacionada con las condiciones prevalecientes, con el propósito de explicar sus causas y la probabilidad de que ocurra un evento similar. Si bien en el trabajo se utiliza como herramienta principal de análisis el modelo numérico WRF, es necesario contar con información que respalde o deseche de manera sólida las conclusiones que se obtengan con los resultados numéricos. Para tal propósito se recolectó una gran cantidad de información de distintas fuentes, la cual se describe en este capítulo. Otra parte importante del desarrollo de este trabajo se concentra en los procedimientos utilizados para abordar el problema y la manera en que se utiliza la información recopilada, pues a través de ellos se trata de llegar al entendimiento de aspectos del tema de estudio, que no pueden ser identificados en primera instancia. Por ello, en este capítulo también se describen las técnicas utilizadas para resolver los objetivos planteados.

2.1 Modelo WRF

El modelo numérico atmosférico *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) es un sistema de predicción numérica del tiempo diseñado para la investigación y para aplicaciones operativas. Es administrado por la comunidad universitaria, científica y operacional, con el fin de dirigir su desarrollo en beneficio de esta comunidad. Diversas instituciones apoyan en proyecto con el objetivo de construir un modelo de pronóstico numérico de mesoescala de siguiente generación

(modelos como el MM5 pertenecen a la generación anterior), para lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y la predicción del tiempo (Skamarock, 2008). Las principales instituciones encargadas de su desarrollo son: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Earth System Research Laboratory* (ESRL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory* (NRL), *Center for Analysis and Prediction Storms* (CAPS) y *Federal Aviation Administration* (FAA).

El código del modelo es abierto a la comunidad y ha sido optimizado de manera que puede ser adaptado, tanto en supercomputadoras que trabajan en paralelo, como en computadoras portátiles de reciente generación. Debido a la diversidad de la comunidad que lo desarrolló y que lo utiliza, el modelo tiene una gran diversidad de aplicaciones, por ejemplo, simulaciones ideales, simulaciones reales (predicción numérica en tiempo real), modelación de la calidad del aire y estudios de interacción océano-atmósfera mediante el acoplamiento con modelos oceánicos. En este trabajo se utiliza la versión 3.0, la cual fue liberada por primera vez en abril del 2008.

Los principales componentes del modelo se muestran en la figura 2.1. El *WRF Software Infrastructure* (WSI) contiene los programas que resuelven las ecuaciones de la física del modelo (*dynamic solvers*) y los programas que hacen la interfase con la iniciación del modelo, la asimilación de datos y la utilización de algunas opciones relacionadas con la química atmosférica. Fuera del WSI se encuentra la parte de pre-procesamiento y post-procesamiento de las simulaciones numéricas. El modelo cuenta con dos núcleos que resuelven la física del modelo, el *Advanced Research WRF* (ARW) y el *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM), en este trabajo se ha utilizado el núcleo ARW por lo que a continuación se describe brevemente.

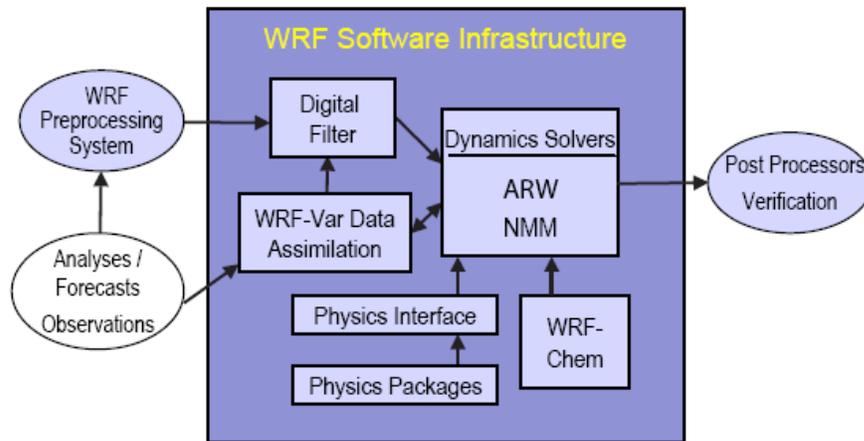


Figura 2.1. Principales componentes del modelo WRF 3.0. Tomada de Skamarock et al. (2008).

2.1.1 Descripción del núcleo ARW

Las características del núcleo ARW, utilizado para resolver los procesos atmosféricos, son las siguientes:

- **Ecuaciones:** Consideran un fluido totalmente compresible, no-hidrostático y basado en flujo Euleriano. Cuenta con una opción hidrostática.
- **Coordenada vertical:** Coordenada que sigue el terreno y que permite un estiramiento en los niveles verticales. El tope del modelo es una superficie de presión constante.
- **Malla horizontal:** Malla escalonada tipo Arakawa C.
- **Integración en tiempo:** Runge-Kutta de 2do y 3er orden con paso de tiempo menor para ondas acústicas y de gravedad.
- **Discretización espacial:** Opcional de 2do y 6to orden en la horizontal y vertical.
- **Condiciones de frontera laterales:** Periódicas, abiertas y simétricas.
- **Condiciones de frontera en superficie:** Física o *free-slip*.
- **Anidamientos:** Interactivos en un sentido, interactivos en dos sentidos y móviles, estos últimos pueden usarse a través de movimientos especificados por el usuario o con un algoritmo que sigue el movimiento de un vórtice.
- **Malla global:** Cuenta con capacidad para realizar simulaciones globales.
- **Microfísica:** Esquemas simplificados para simulaciones idealizadas y esquemas complejos

que resuelven explícitamente procesos de precipitación, vapor de agua y nubes.

- **Parametrizaciones de cúmulos:** Diversos esquemas para modelos de mesoescala modificados y adaptados para el modelo.
- **Capa límite planetaria:** Esquema de energía cinética turbulenta y esquemas no locales.

La figura 2.2 muestra el diagrama de flujo del modelo WRF, en donde se puede observar que existen 4 pasos necesarios para obtener una simulación numérica con el modelo.

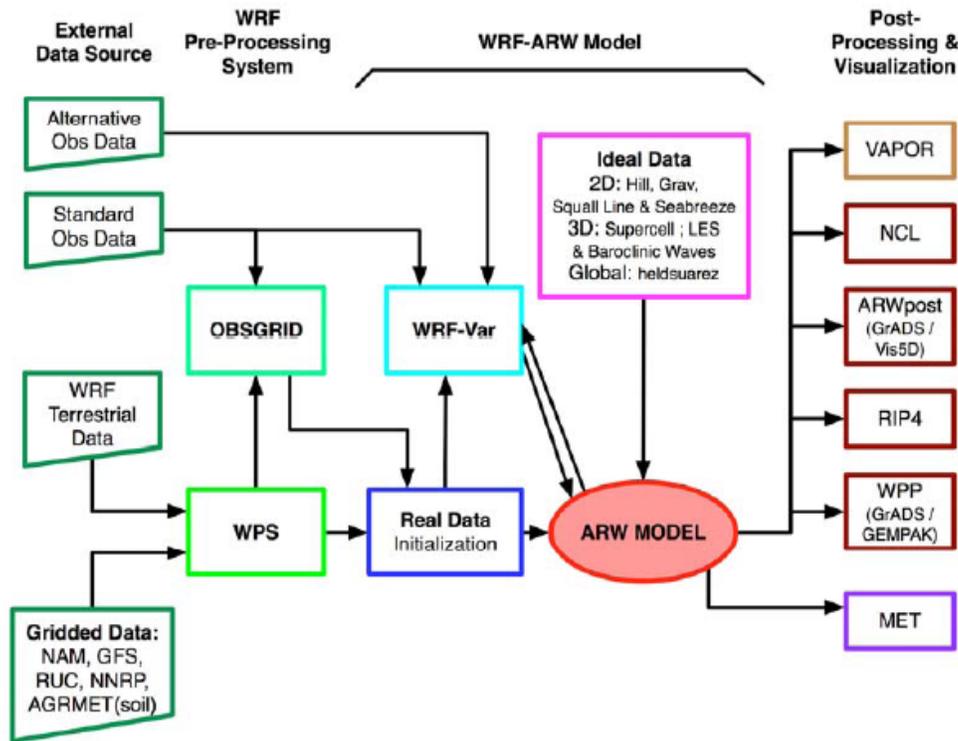


Figura 2.2. Diagrama de flujo del modelo WRF 3.0. Tomada de Skamarock et al. (2008).

WRF Preprocessing System (WPS). Esta componente del modelo es utilizada para simulaciones reales; aquí el usuario puede definir los dominios de la simulación, interpolar los datos terrestres a los dominios (por ejemplo, topografía, tipo de suelo, uso de suelo, etc.), así como decodificar e interpolar los datos meteorológicos que alimentan al modelo.

WRF-Var. Este programa es opcional, se encarga de introducir observaciones a los análisis interpolados que fueron creados con el WPS (por ejemplo, datos de superficie, radiosondeos, datos de radar, etc.), generando así una actualización en las condiciones iniciales que utilizará el modelo.

ARW. Este es el principal componente del modelo, aquí se realiza la iniciación del modelo para cualquiera de los casos de simulación, ideal o real, y se hace la integración numérica del dominio principal y de los anidamientos, si es el caso.

Post-procesamiento y visualización. Esta componente es independiente de los códigos del modelo y queda a consideración del usuario. Existe una gran cantidad de herramientas gráficas que pueden ser utilizadas para visualizar las simulaciones numéricas. Algunas de estas opciones son: *NCAR Command Language* (NCL), *Read/Interpolate/Plot* (RIP4), *Grid Analysis and Display System* (GrADS), *Vis5D*, *Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers* (VAPOR), *General Equilibrium Modelling Software* (GEMPAK) y *MATrix LABoratory* (MATLAB).

2.1.2 Configuración del modelo

El modelo tiene implementadas un gran número de opciones para realizar las simulaciones numéricas en función de las necesidades del usuario, estas opciones permiten seleccionar desde el tipo de proyección a utilizar hasta la manera en que se resuelven los procesos físicos. La configuración usada en este estudio se planeó de manera que pudiera ser utilizada para un pronóstico de tipo operativo para la República Mexicana, por lo que los resultados que se obtienen, además de servir para explicar el caso de estudio, funcionan como una referencia de la aplicación de este modelo en México.

Las simulaciones numéricas que se realizaron para los análisis en este trabajo son producto de la versión 3.0 del modelo con el núcleo ARW. Es importante mencionar que para las fechas en que ocurrió el evento, la versión del modelo que se tenía implementada era la 2.2, la cual fue liberada en diciembre del 2006. De esta manera, las corridas obtenidas para el mes de octubre del 2007 ya estaban generadas con la versión 2.2, sin embargo, con la liberación de la versión 3.0 en abril del 2008, se decidió trabajar con ella por las capacidades que se le agregaron al modelo (Ver UCAR, 2008b). Por lo tanto, las simulaciones numéricas que se analizan corresponden a la versión 3.0 pero con la misma configuración que se usó en la versión 2.2. La malla del modelo consta de un solo dominio centrado en 22.5 °N y 98.5 °W, la dimensión en la dirección este-oeste es de 248 puntos de malla y en la dirección norte- sur es de 162 puntos con una resolución de 20 km (Fig. 2.3).

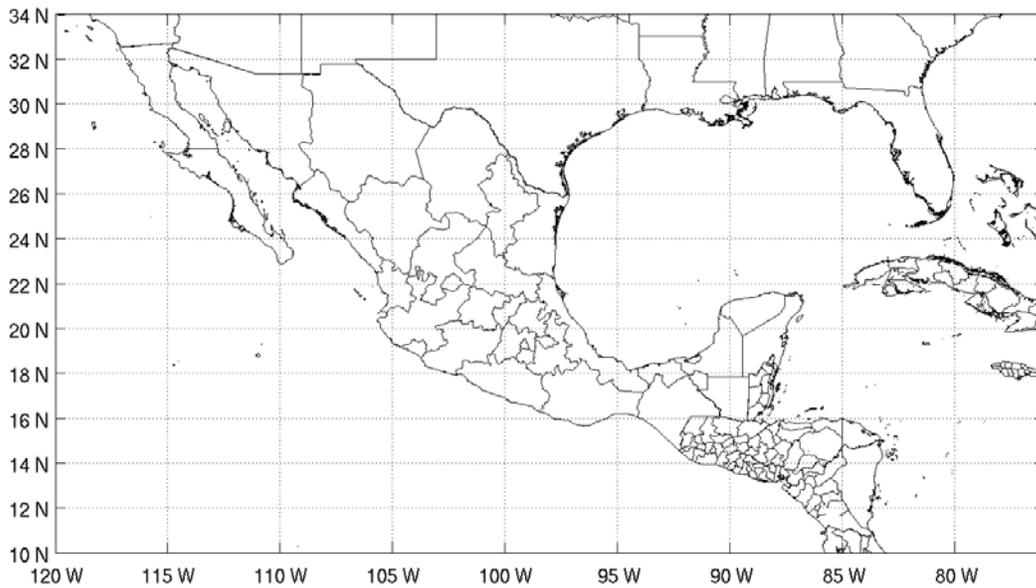


Figura 2.3. Dominio utilizado para las simulaciones numéricas con el modelo WRF-3.0.

Se utiliza una proyección Mercator, la coordenada vertical utilizada es sigma (siguiendo el terreno) y tiene 27 niveles; una vez que se obtienen las salidas numéricas estas son interpoladas a niveles verticales de presión. Los esquemas utilizados en la física del modelo son: Kain-Fritsch para la parametrización de cúmulus; Noah LSM (*Land Surface Model*) para el suelo; RRTM para la radiación de onda larga; Dudhia para la radiación de onda corta y el esquema *Yonsei University* (YSU) para la capa límite. Estas parametrizaciones son descritas detalladamente en Skamarock et al. (2008).

Las condiciones iniciales y de frontera se tomaron del modelo global GFS, específicamente los datos de las 12Z, que están disponibles operativamente (GFS, 2008). Los análisis finales del NCEP (descritos en el siguiente capítulo) también son comúnmente utilizados como condiciones iniciales en el modelo ya que contienen un número mayor de observaciones con respecto a los que están disponibles en tiempo real, sin embargo, estos no se utilizan para iniciar el modelo debido a que se pretende evaluar el comportamiento de éste realizando simulaciones numéricas con la información que está disponible en tiempo real. No se realiza asimilación de datos además de los del GFS y las condiciones de frontera son impuestas cada 6 horas. La integración en tiempo de cada simulación numérica se hace hasta 72 horas iniciando el modelo a las 12Z en todas las simulaciones con un paso de integración de 120 segundos.

El equipo de cómputo en que está implementado el modelo consta de cuatro procesadores de doble núcleo AMD Opteron y para su instalación se ha utilizado el compilador de fortran PGI 7.2 (PGI, 2008). Con estas características el pronóstico numérico a 72 horas necesita un tiempo aproximado de 90 minutos, aunque el tiempo de procesamiento puede reducirse hasta en un 30% con equipos de cómputo que tienen el mismo número de núcleos pero de reciente generación.

El periodo de las simulaciones numéricas elegido para el análisis de este trabajo comprende del 1 de octubre al 5 de noviembre, considerando que el evento a analizar ocurrió dentro de ese intervalo y que las observaciones de precipitación, descritas en la siguiente sección, están restringidas a ese periodo de tiempo.

2.2 Bases de datos

Para este trabajo se utilizaron diversas fuentes de datos que se consideraron adecuadas para realizar el proceso de validación y el análisis del evento. El conjunto de datos incluye las *Estaciones Meteorológicas Automáticas* (EMAS) del SMN, boyas del *National Data Buoy Center* (NDBC), estaciones hidrometeorológicas de la *Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos* (GASIR), análisis finales y reanálisis administrados por el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y datos de precipitación estimada por medio de satélite bajo el proyecto *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). A continuación se describe cada una de las bases de datos.

2.2.1 Estaciones del SMN

El SMN administra la red de EMAS que pertenece a la *Comisión Nacional del Agua* (CNA). Actualmente, la red está conformada por 133 estaciones y la información meteorológica reciente de las estaciones está disponible a cualquier usuario en su sitio electrónico (SMN, 2008). Para este trabajo se recolectó la información meteorológica de 105 estaciones que contienen la información meteorológica del año 2007. Después de hacer una revisión de cada una de las estaciones con el fin de desechar aquellas que no contaran con información suficiente para el periodo de interés, el conjunto final fue de 72 estaciones. La lista de las estaciones seleccionadas se muestra en la Tabla 2.1 y su ubicación se muestra en la figura 2.4. Las variables medidas por estas estaciones son: dirección e intensidad del viento sostenido, dirección e intensidad de la ráfaga del viento,

temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, precipitación y radiación solar. El intervalo de muestreo es de 10 minutos. Los datos de temperatura son utilizados en la validación del modelo, usando datos horarios puntuales sin promediar.

Tabla 2.1. Lista de las estaciones meteorológicas del SMN y de las boyas del NDBC incluyendo la entidad, coordenadas y elevación.

FUENTE	ENTIDAD	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
SMN	AGUASCALIENTES	CALVILLO	21	50	58	102	42	44	1618
SMN	BAJA CALIFORNIA	PRESA ABELARDO	32	26	50	116	54	30	156
SMN	BAJA CALIFORNIA	PRESA EMILIO	31	53	29	116	36	12	32
SMN	BAJA CALIFORNIA	MEXICALI	32	40	1	115	17	27	50
SMN	BAJA CALIFORNIA	SAN QUINTÍN	30	31	54	115	50	15	32
SMN	BAJA CALIFORNIA	BAHÍA DE LOS ÁNGELES	28	53	47	113	33	37	10
SMN	BAJA CALIFORNIA	CATAVIÑA	29	43	38	114	43	9	514
SMN	BAJA CALIFORNIA	LA RUMOROSA	32	16	20	116	12	20	1262
SMN	BAJA CALIFORNIA SUR	CD. CONSTITUCIÓN	25	0	35	111	39	48	28
SMN	BAJA CALIFORNIA SUR	GUSTAVO DÍAZ ORDAZ	27	38	34	113	27	27	37
SMN	CAMPECHE	CD. DEL CARMEN	18	38	53	91	49	21	8
SMN	CAMPECHE	CAMPECHE	19	50	10	90	30	26	11
SMN	CAMPECHE	CALAKMUL	18	21	54	89	53	33	28
SMN	CAMPECHE	ESCÁRCEGA	18	36	30	90	45	14	60
SMN	CHIAPAS	PALENQUE	17	31	33	91	59	25	52
SMN	CHIHUAHUA	GUACHOCHI	26	48	49	107	4	23	2390
SMN	CHIHUAHUA	URIQUE	27	12	56	107	55	1	577
SMN	CHIHUAHUA	MAGUARICHI	27	51	30	107	59	40	1663
SMN	CHIHUAHUA	CD. DELICIAS	28	10	12	105	30	0	1188
SMN	CHIHUAHUA	JIMÉNEZ	27	6	39	104	54	23	1360
SMN	COAHUILA	NUEVA ROSITA	27	55	12	101	19	48	366
SMN	COAHUILA	SANTA CECILIA	28	23	58	101	12	47	595
SMN	DISTRITO FEDERAL	ENCB	19	27	13	99	10	16	2389
SMN	DISTRITO FEDERAL	TEZÓNTLE	19	23	7	99	5	59	2358
SMN	DURANGO	LAS VEGAS	24	11	9	105	27	58	2398
SMN	DURANGO	AGUSTÍN MELGAR	25	15	48	104	3	58	1226
SMN	GUANAJUATO	PRESA ALLENDE	20	50	54	100	49	29	1915
SMN	GUERRERO	ACAPULCO	16	45	48	99	44	56	7.5
SMN	GUERRERO	CD. ALTAMIRANO	18	21	2	100	39	30	251
SMN	GUERRERO	IGUALA	18	21	37	99	31	27	780

Continuación de la Tabla 2.1.

FUENTE	UBICACIÓN	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
SMN	HIDALGO	PACHUCA	20	5	49	98	42	51	2423
SMN	HIDALGO	HUICHAPAN	20	23	19	99	39	50	2080
SMN	JALISCO	CHAPALA	20	17	25	103	12	6	1493
SMN	JALISCO	TIZAPAN	20	10	10	103	2	38	1503
SMN	JALISCO	LOS COLOMOS	20	42	24	103	23	34	1571
SMN	JALISCO	RIO TOMATLÁN	19	59	55	105	8	1	141
SMN	MEXICO	CERRO CATEDRAL	19	32	31	99	31	9	3754
SMN	MEXICO	PRESA MADÍN	19	31	28	99	16	5	2364
SMN	MEXICO	ATLACOMULCO	19	47	30	99	52	11	2600
SMN	MEXICO	NEVADO DE TOLUCA	19	7	0	99	46	0	4139
SMN	MEXICO	CEMCAS	19	28	47	98	58	25	2176
SMN	MICHOACÁN	ANGAMACUTIRO	20	7	31	101	43	21	1730
SMN	MICHOACÁN	APATZINGÁN	19	4	58	102	22	18	282
SMN	MICHOACÁN	URUAPAN	19	22	51	102	1	44	1606
SMN	MORELOS	IMTA	18	52	56	99	9	25	1355
SMN	MORELOS	TEPOZTLÁN	18	57	3	99	4	44	1384
SMN	NAYARIT	ACAPONETA	22	27	59	105	23	7	29
SMN	NUEVO LEÓN	PRESA EL CUCHILLO	25	43	59	99	19	15	134
SMN	OAXACA	PINOTEPA NACIONAL	16	20	59	98	3	9	195
SMN	OAXACA	MATÍAS ROMERO	16	52	58	95	2	11	186
SMN	OAXACA	NOCHISTLAN	17	26	12	97	14	57	2040
SMN	PUEBLA	TEC TECAMACHALCO	18	51	59	97	43	18	2047
SMN	QUERÉTARO	HUIMILPAN	20	23	25	100	17	1	2280
SMN	QUINTANA ROO	SIAN KAAAN	20	7	40	87	27	56	8
SMN	SAN LUIS POTOSÍ	MATEHUALA	23	36	51	100	39	57	1627
SMN	SAN LUIS POTOSÍ	CD. VALLES	21	58	47	99	1	51	58
SMN	SINALOA	OBISPO	24	15	4	107	11	17	4
SMN	SONORA	ALAMOS	27	1	18	108	56	16	409
SMN	SONORA	YECORA	28	22	0	108	55	0	1531
SMN	TAMAULIPAS	ALTAMIRA	22	23	15	97	55	32	61

Continuación de la Tabla 2.1.

FUENTE	UBICACIÓN	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
SMN	TAMAULIPAS	MATAMOROS	25	53	9	97	31	7	4
SMN	TAMAULIPAS	SAN FERNANDO	24	50	34	98	9	27	45
SMN	TLAXCALA	HUAMANTLA	19	23	0	97	57	0	2222
SMN	VERACRUZ	ALVARADO	18	42	54	95	37	57	113
SMN	VERACRUZ	CD. ALEMAN	18	11	21	96	5	51	107
SMN	VERACRUZ	PRESA LA CANGREJERA	18	6	21	94	19	53	34
SMN	VERACRUZ	CITLALTEPEC	21	20	4	97	52	43	211
SMN	YUCATÁN	MÉRIDA	20	56	47	89	39	6	18
SMN	YUCATÁN	CELESTÚN	20	51	29	90	22	59	10
SMN	YUCATÁN	RÍO LAGARTOS	21	34	16	88	9	37	5
SMN	YUCATÁN	TANTAQUÏN	20	1	49	89	2	50	30
SMN	ZACATECAS	ZACATECAS	22	44	48	102	30	22	2270
NDBC	GOLFO DE MÉXICO	BOYA42001	25	54	0	89	40	0	0
NDBC	GOLFO DE MÉXICO	BOYA42002	25	47	24	93	39	58	0
NDBC	GOLFO DE MÉXICO	BOYA42055	22	1	2	94	2	45	0

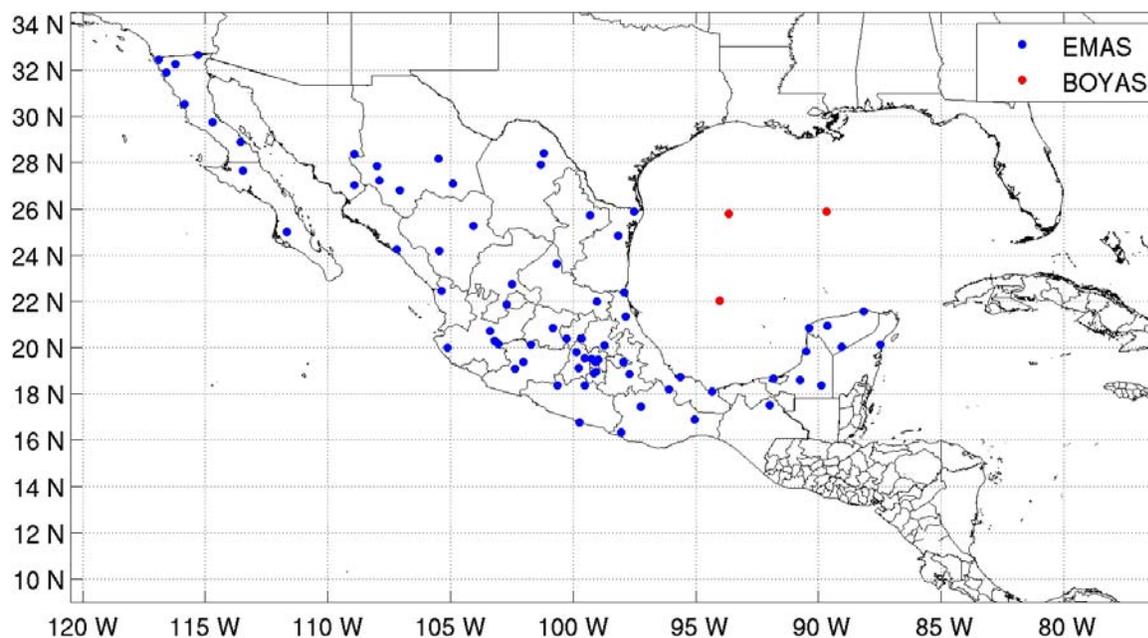


Figura 2.4. Ubicación geográfica de las 72 EMAS (azul) del SMN y de las tres boyas (rojo) del NDBC.

2.2.2 Boyas del NDBC

Los datos de las boyas fueron obtenidos del sitio electrónico del NDBC y para el análisis se utilizan los datos horarios correspondientes al año 2007. Se seleccionaron tres boyas que se encuentran en el Golfo de México con el objetivo de analizar los vientos en el mes de octubre y sobre todo los provocados por el frente frío número 4 en la región oceánica. Las coordenadas de estas boyas se muestran al final de la tabla 2.1 y su localización se muestra en la figura 2.4. Las boyas registran las siguientes variables: dirección e intensidad del viento a 10 m, dirección e intensidad de la ráfaga, altura de ola significativa, periodo dominante de ola, periodo promedio de ola, dirección promedio de ola, presión barométrica, temperatura del aire, temperatura superficial del mar, temperatura de punto de rocío, visibilidad y tendencia de la presión.

2.2.3 Estaciones de la GASIR

Las estaciones hidrometeorológicas de la GASIR utilizadas en este trabajo se muestran en la Tabla 2.2 y en la figura 2.5. Estas estaciones están colocadas en los márgenes de los ríos y registran las siguientes variables: nivel del río, precipitación, temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección del viento así como velocidad y dirección de la ráfaga. El intervalo de muestreo de estas estaciones es de 10 minutos. Se consiguieron los datos para el mes de octubre y los primeros días de noviembre del 2007, que cubren el periodo del evento a estudiar. Los datos son utilizados para hacer una evaluación de las precipitaciones que reproduce el modelo en los estados de Tabasco y Chiapas.

2.2.4 Datos de TRMM

Esta fuente de datos contiene estimaciones de la precipitación sobre las regiones tropicales obtenidas por medio de sensores colocados en un satélite. Existen varios productos que pueden ser obtenidos a través del sitio electrónico. Para este trabajo se utilizó el producto 3B42, el cual contiene la razón de precipitación estimada en un lapso de 3 horas, sobre una malla regular con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, con una extensión en latitud de 50° norte a 50° sur (TRMM, 2007). Los datos son utilizados para compararlos con la precipitación que el modelo reproduce sobre Veracruz, Chiapas y Tabasco.

Tabla 2.2. Lista de las estaciones meteorológicas de la GASIR incluyendo la entidad, coordenadas y elevación.

NUM	ENTIDAD	ESTACIÓN	LAT			LONG			MSNM
			Grados	Min.	Seg.	Grados	Min.	Seg.	
1	TABASCO	BOCA DEL CERRO	17	25	32	91	29	31	36
2	TABASCO	E. ZAPATA	17	51	26	91	47	7	33
3	TABASCO	GAVIOTAS	17	58	3	92	54	41	14
4	TABASCO	GONZÁLEZ	17	55	3	93	4	6	7.11
5	CHIAPAS	OCOTEPEC	17	13	21	93	10	28	1400
6	CHIAPAS	PLATANAR	17	36	39	93	23	2	34.6
7	TABASCO	PORVENIR	18	0	32	92	52	38	18.81
8	TABASCO	PUEBLO NUEVO	17	51	55	92	52	7	8.12
9	TABASCO	PUYACATENGO	17	32	47	92	55	50	62
10	TABASCO	REFORMA	17	52	58	93	21	22	28.79
11	TABASCO	SALTO DE AGUA	17	33	31	92	19	58	26
12	TABASCO	SAMARIA	17	59	49	93	16	32	20.16
13	CHIAPAS	SAN JOAQUIN	17	33	40	93	5	6	28.15
14	CHIAPAS	SAYULA	17	25	30	93	23	0	133
15	TABASCO	TAPIJULAPA	17	27	56	92	46	24	24.55
16	TABASCO	TEAPA	17	33	35	92	57	3	48.31

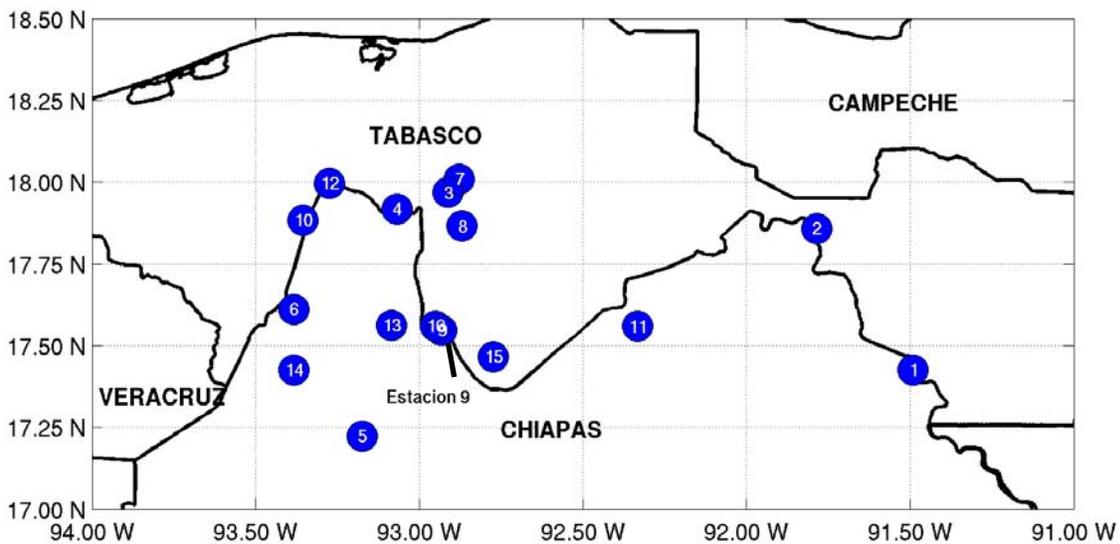


Figura 2.5. Ubicación geográfica de las estaciones de la GASIR.

2.2.5 Análisis finales del NCEP

Los análisis finales son generados por el *Global Data Assimilation System* (GDAS), el cual es utilizado por el NCEP de manera operacional 4 veces al día, por lo que la resolución temporal de estos productos es de 6 horas. Los análisis que se obtienen operacionalmente consideran todas las observaciones que han sido reportadas de manera global en tiempo real, mientras que los análisis finales reúnen las observaciones que no pudieron ser consideradas debido a retrasos, de esta manera su información acerca de las condiciones atmosféricas es mejor representada, pero no están disponibles en tiempo real. Existe un gran número de variables atmosféricas en esta base de datos y se encuentran distribuidos en niveles verticales sobre una malla regular global de $1^\circ \times 1^\circ$ (CISL, 2008). Estos datos son usados principalmente para comparar los campos de viento y humedad que genera el modelo para el caso de estudio.

2.2.6 Datos del reanálisis NCEPR2

Los llamados reanálisis son el resultado de modelos numéricos que utilizan observaciones de distintas fuentes para reconstruir las condiciones históricas del estado del tiempo en escala global. En este trabajo se utilizan datos del Reanálisis 2 del NCEP/*Department of Energy* para el *Atmospheric Model Intercomparison Project* (NCEP/DOE AMIP II) o NCEPR2 (Kanamitsu et al., 2002). Existe un gran número de variables atmosféricas en esta base de datos pero aquí sólo se utilizan los datos de viento para caracterizar la intensidad de los vientos en el caso de estudio. Cabe señalar que la resolución espacial del NCEPR2 es baja, de aproximadamente 2° , de manera que no se pueden analizar fenómenos que sucedan en una escala espacial de decenas de kilómetros. Sin embargo, recupera las condiciones de sistemas de mesoescala como los frentes fríos. Además, tiene la ventaja de proporcionar series de datos continuas durante periodos de tiempo relativamente largos con una resolución temporal de 6 horas (CISL, 2008).

2.2.7 Imágenes satelitales

Además de las bases de datos descritas anteriormente se utilizan imágenes infrarrojas y visibles del satélite GOES para ayudar a describir el evento meteorológico.

2.3 Metodología

Las bases de datos que fueron descritas anteriormente se usan en las distintas etapas de este trabajo de investigación. Para la validación del modelo se utilizaron técnicas estadísticas que han sido empleadas por diversos autores, entre ellos Willmott (1982), Stauffer and Seaman (1990), Brooks and Doswell (1996), Pielke (2001) y Wilks (2006). Los estadísticos utilizados son: el error cuadrático medio, error promedio absoluto, error promedio absoluto normalizado, sesgo y correlación compleja. A continuación se describe cada uno de ellos.

2.3.1 Estadísticos

Coefficiente de correlación lineal. Este parámetro proporciona el grado de relación lineal que existe entre dos variables Φ y Φ_{obs} , donde a cada valor de Φ le corresponde uno de Φ_{obs} . La expresión para calcularla es:

$$\text{Correlación} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_i - \bar{\Phi}) (\Phi_{i\text{obs}} - \bar{\Phi}_{\text{obs}})}{(N-1) S_{\Phi} S_{\Phi_{\text{obs}}}}$$

donde: Φ representa los valores pronosticados y Φ_{obs} los observados, $\bar{\Phi}$ es el promedio de los valores pronosticados, $\bar{\Phi}_{\text{obs}}$ el promedio de los valores observados, S_{Φ} y $S_{\Phi_{\text{obs}}}$ las desviaciones estándar y N el número total de datos. En los siguientes estadísticos Φ y Φ_{obs} tienen el mismo significado.

Error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE). Indica el grado de correspondencia promedio entre pares individuales de valores pronosticados y observados.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\Phi_i - \Phi_{i\text{obs}})^2}{N}}$$

Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error, MAE). Es una medida de la cercanía entre los valores pronosticados y los observados.

$$\text{MAE} = \sum_{i=1}^N \frac{|\Phi_i - \Phi_{\text{ioobs}}|}{N}$$

Error Absoluto Medio Normalizado (Normalized Mean Absolute Error, NMAE). Similar al MAE pero aquí se toma en cuenta el peso del error respecto al rango de variación de la variable medida.

$$\text{NMAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |\Phi_i - \Phi_{\text{ioobs}}| / |\Delta_{\Phi_{\text{obs}}}|}{N}$$

donde: $\Delta_{\Phi_{\text{obs}}} = |\max(\Phi_{\text{obs}}) - \min(\Phi_{\text{obs}})|$, representa el rango de variación de las temperaturas observadas, en este caso del ciclo diurno debido a que los estadísticos se calculan en periodos de 24 horas.

Sesgo (Mean Error o BIAS). Proporciona información sobre la tendencia que tiene el modelo al pronosticar una variable, es decir, sobrestimar o subestimar.

$$\text{BIAS} = \sum_{i=1}^N \frac{(\Phi_i - \Phi_{\text{ioobs}})}{N}$$

Los estadísticos anteriores funcionan para el caso de variables escalares, sin embargo el caso del viento merece especial atención por ser un vector. Kundu (1976) propone un método para correlacionar series bidimensionales que puede aplicarse al viento y Jorba et al. (2005) utilizan una variante del error cuadrático medio para la magnitud del viento (RMSEV), mientras que para describir los pronósticos de la dirección utiliza el RMSED y para el sesgo el BIASD. Para calcular el sesgo de la magnitud del viento se utiliza la expresión aplicada a los escalares.

Correlación compleja. De acuerdo con Kundu (1976), la correlación compleja es un método para obtener la relación entre el ángulo y la magnitud de dos vectores, en este caso los vientos observados y pronosticados. Las dos series de tiempo son representadas por la siguiente expresión:

$$\Phi(t) = u(t) + i v(t)$$

$$\Phi_{\text{obs}}(t) = u_{\text{obs}}(t) + i v_{\text{obs}}(t)$$

donde: u , v y u_{obs} , v_{obs} representan las componentes del viento pronosticado y observado, respectivamente.

El índice de correlación (ρ) está dado entonces por:

$$\rho = \frac{[\Phi^*(t) \Phi_{\text{obs}}(t)]}{[\Phi^*(t) \Phi(t)]^{1/2} [\Phi_{\text{obs}}^*(t) \Phi_{\text{obs}}(t)]^{1/2}}$$

donde: Φ^* indica el complejo conjugado de Φ .

Error cuadrático medio para la magnitud del viento (RMSEV).

$$\text{RMSEV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(u_i - u_{i\text{obs}})^2 + (v_i - v_{i\text{obs}})^2]}{N}}$$

Error cuadrático medio para la dirección del viento (RMSED).

$$\text{RMSED} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{D^2}{N}}$$

$$D = \min (|d_i - d_{i\text{obs}}| , |360 + (d_i - d_{i\text{obs}})|)$$

donde: d_i es la dirección del viento pronosticado y $d_{i\text{obs}}$ la dirección observada.

Sesgo para la dirección del viento (BIASD).

$$\text{BIASD} = \sum_{i=1}^N \frac{D}{N}$$

Si $d_i < d_{i\text{obs}}$:

$$D = d_i - d_{i\text{obs}} \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| < |360 + (d_i - d_{i\text{obs}})|$$

$$D = 360 + (d_i - d_{i\text{obs}}) \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| > |360 + (d_i - d_{i\text{obs}})|$$

Si $d_i > d_{i\text{obs}}$:

$$D = d_i - d_{i\text{obs}} \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| < |(d_i - d_{i\text{obs}}) - 360|$$

$$D = (d_i - d_{i\text{obs}}) - 360 \quad \text{si} \quad |d_i - d_{i\text{obs}}| > |(d_i - d_{i\text{obs}}) - 360|$$

Para este estadístico, el error está definido en función de la dirección del vector observado, de esta manera, un BIAS positivo indica que el vector pronosticado se encuentra a un número determinado de grados moviéndose en dirección de las manecillas del reloj y un BIAS negativo indica que el vector pronosticado se encuentra a un número determinado de grados moviéndose en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Para mayor simplicidad, en el capítulo referente a la validación, el primer caso (BIAS positivo) se referirá como un vector pronosticado a la derecha del observado y el segundo (BIAS negativo) como un vector pronosticado a la izquierda del observado.

CAPÍTULO 3

VALIDACIÓN DEL MODELO WRF

En el área de la meteorología, más precisamente en la rama de la predicción numérica del tiempo, existe un amplio número de modelos utilizados para entender el desarrollo de los fenómenos atmosféricos y su evolución en el tiempo. En los últimos años la utilización de estos modelos se ha incrementado, en parte por el mejor entendimiento que se ha tenido de los procesos físicos que ocurren en la atmósfera, y otro tanto por el avance computacional que ha permitido realizar, de manera más rápida, el gran número de operaciones necesarias para resolver las ecuaciones que constituyen a los modelos.

El desarrollo de un modelo numérico refleja un intento por conocer las condiciones que generará un evento en particular, en lugar de permanecer en un total desconocimiento acerca de su evolución. Sin embargo, el uso de los modelos requiere conocer cuáles son las habilidades que tiene para reproducir un fenómeno, cuáles sus desventajas y limitaciones, y cuál es el valor que se le puede adjudicar a los resultados obtenidos. A través de estas preguntas surge la idea de evaluar a los modelos, con el objetivo de saber si proporcionan información adecuada para las necesidades y decisiones de un usuario.

Jolliffe y Stjepenson (2003) mencionan que las primeras técnicas de verificación de pronósticos fueron realizadas por Finley (1884), quien dirigió su trabajo a evaluar el pronóstico de tornados de manera binaria, es decir, calificó la calidad de un pronóstico considerando el hecho de que un tornado haya ocurrido o no y si éste fue o no pronosticado. Desde entonces a la fecha se han seguido desarrollando técnicas de evaluación que consideran las diversas escalas espaciales y temporales de los fenómenos atmosféricos, y que han evolucionando a la par de los modelos numéricos, volviéndose tan complejas como los mismos modelos.

La evaluación del modelo se realiza siguiendo una metodología basada en técnicas estadísticas. Cabe aclarar que la validación o evaluación del modelo WRF que aquí se hace no pretende describir todas las ventajas y desventajas de un pronóstico realizado con el modelo, sin embargo, puede ser de gran utilidad para analizar el desempeño del modelo en un periodo de tiempo que incluye la ocurrencia de un evento característico de otoño-invierno que afecta frecuentemente a la República Mexicana.

3.1 Consideraciones generales

El proceso de validación de las simulaciones numéricas utilizadas en este trabajo consiste en calcular una serie de estadísticos (detallados en el capítulo anterior) que describen cuantitativamente los pronósticos de temperatura y viento del modelo WRF. Para ello, se utiliza un conjunto de 72 estaciones del SMN y 3 boyas del NDBC (ver Tabla 2.1 y Fig. 2.4). Para comparar ambos conjuntos de datos se interpolaron los datos del modelo a las coordenadas geográficas de las estaciones o boyas, según sea el caso. El periodo de análisis abarca del 1 de octubre al 5 de noviembre del 2007, que aunque es un periodo de tiempo relativamente corto, proporciona algunos resultados útiles acerca del desempeño del modelo al aplicarlo a la República Mexicana.

Para el análisis de temperatura se utilizan las estaciones meteorológicas del SMN y los estadísticos utilizados en este caso fueron: correlación lineal, RMSE, MAE, NMAE y BIAS. En el análisis de viento se utilizan los datos de las boyas del NDBC y los estadísticos utilizados fueron: correlación compleja, RMSEV, BIASV, RMSED y BIASD. Los cálculos se realizaron de manera que para cada estación se evaluó el desempeño del modelo durante todo el periodo de análisis. Posteriormente se promediaron los estadísticos de todos los sitios para evaluar los pronósticos en la República Mexicana.

El análisis de la precipitación no es incluido en la validación del modelo por dos razones. La primera tiene que ver con el hecho de que la precipitación es una de las variables más difíciles de pronosticar, tanto en cantidad como en distribución espacial; debido a que el modelo cuenta con una resolución de 20 km y la variabilidad espacial de la precipitación puede ser muy grande, realizar una interpolación sobre el campo de precipitación del modelo puede no ser representativa de los 20 km. La segunda razón tiene que ver con la disponibilidad de las observaciones, ya que el número de

estaciones de la GASIR y la dispersión de éstas en la región de interés, no permiten aplicar un esquema de verificación detallado a esta variable. A pesar de estas limitaciones, en el capítulo 4 se hace un análisis detallado comparando las precipitaciones del modelo con las estimadas por satélite y con las observaciones de las estaciones.

3.2 Temperatura a 2 metros: Casos particulares

Antes de discutir la verificación del modelo en el periodo de estudio, se presentan algunos casos particulares que permiten analizar detalles acerca del funcionamiento del modelo durante el paso del frente frío. Las figuras 3.1 y 3.2 muestran los datos observados de temperatura y los pronosticados por el modelo en las estaciones de Campeche, Camp. y Angamacutiuro, Mich., respectivamente. Para ambos casos se presenta el pronóstico a 72 horas a partir del día 22 de Octubre del 2007 a las 12Z, el cual reproduce la entrada del frente frío número 4. Se muestran las series de temperatura de los datos observados y pronosticados en intervalos de 24 horas, así como sus respectivos diagramas de dispersión. Los estadísticos correspondientes se muestran en la Tabla 3.1.

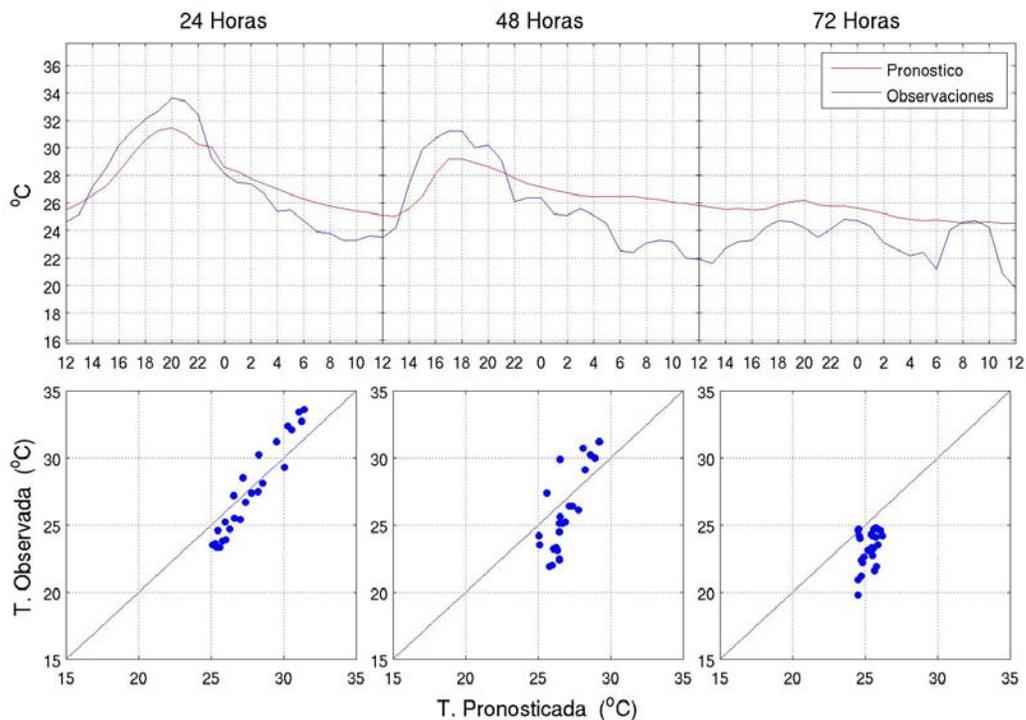


Figura 3.1. Pronóstico de temperatura a 72 horas en la estación de Campeche, Camp., iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Series de temperatura de los datos observados (azul) y pronosticados por el modelo (rojo) en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de las series de temperatura.

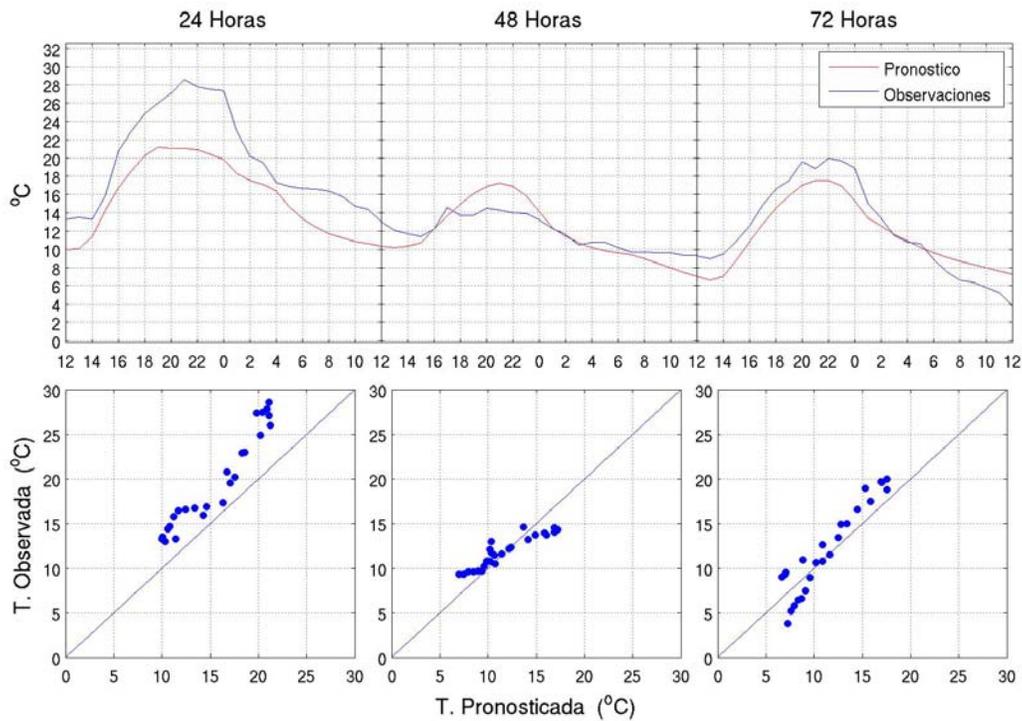


Figura 3.2. Similar a la figura 3.1 pero para la estación de Angamacutiro, Mich.

Tabla 3.1. Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z.

Estación	Pronóstico	Estadísticos			
		Corr. lineal	RMSE	MAE	BIAS
Campeche	24	0.97	1.6	1.4	0.2
	48	0.80	2.4	2.2	0.9
	72	0.38	2.4	2.0	2.0
Angamacutiro	24	0.96	4.5	4.1	-4.1
	48	0.92	1.6	1.3	-0.1
	72	0.94	2.0	1.9	-0.7

En la figura 3.1 se presenta el pronóstico en Campeche, que es una estación localizada muy cerca de la costa sur del Golfo de México. Los estadísticos de la Tabla 3.1 indican que para las primeras 48 horas de pronóstico la correlación es igual o superior a 0.80, lo cual significa que el modelo logra reproducir el ciclo diario y el descenso de temperatura ocasionado por la entrada del sistema de mesoescala. Sin embargo, el descenso de temperatura se muestra más suavizado de lo que indican

las observaciones y el valor de correlación disminuye a 0.38 para las últimas 24 horas. Esto puede ser debido a que la resolución del modelo es suficiente para reproducir los sistemas de mesoescala y su influencia en la temperatura, pero insuficiente para reproducir fenómenos atmosféricos de menor escala que influyen en tal variación. El RMSE, MAE y BIAS son menores en las primeras 24 horas y se incrementan conforme el alcance del pronóstico. El error más notable para este caso es que el modelo sobrestima la temperatura en las últimas 24 horas ya que el BIAS tiene un valor de 2°C , en otras palabras, significa que el modelo subestima el descenso de temperatura provocado por la masa de aire frío.

En la figura 3.2 se muestra el caso de la estación de Angamacutiro, la cual está ubicada a 1730 msnm al norte de Michoacán. La Tabla 3.1 muestra correlaciones superiores a 0.90 en todo el periodo pronosticado, indicando que el modelo reproduce con mayor precisión la variabilidad de la temperatura en este sitio. El error cuadrático es mayor en las primeras 24 horas con un valor de 4.5°C , debido a que el modelo no reproduce con precisión los máximos y mínimos observados; este error disminuye en las siguientes 24 horas a menos de 2°C . Los diagramas de dispersión muestran una buena relación entre ambos conjuntos de datos y el BIAS indica que la temperatura es subestimada en todo el periodo de pronóstico, sobre todo en las primeras 24 horas. Este ejemplo muestra el funcionamiento del modelo en puntos geográficos ubicados en el interior del país y rodeados por una topografía que influye en la dinámica atmosférica, aunque no se puede inferir que sea representativo de todos los sitios con esas características.

El breve análisis anterior muestra que el modelo reproduce bien los efectos del frente frío pues se muestran correlaciones superiores a 0.90 y errores, tanto de RMSE como de MAE, menores a 2°C en distintas etapas del pronóstico. En cuanto a las deficiencias del modelo se pueden rescatar dos aspectos importantes; primero, en el caso de Campeche el modelo no logra reproducir las variaciones de mayor frecuencia; segundo, en el caso de Angamacutiro el modelo muestra ciertas deficiencias para reproducir los máximos y mínimos de los datos observados.

Las figuras 3.3 y 3.4 presentan el desempeño del modelo del 1 de octubre al 5 de noviembre en las estaciones de Campeche y Angamacutiro. Para cada día se muestra el valor de los estadísticos para las próximas 24, 48 y 72 horas. Los huecos en las series son debidos a que no se pudo realizar la simulación numérica por problemas con la disposición de las condiciones iniciales. Los promedios de los estadísticos en todo el periodo de tiempo considerado se muestran en la Tabla 3.2.

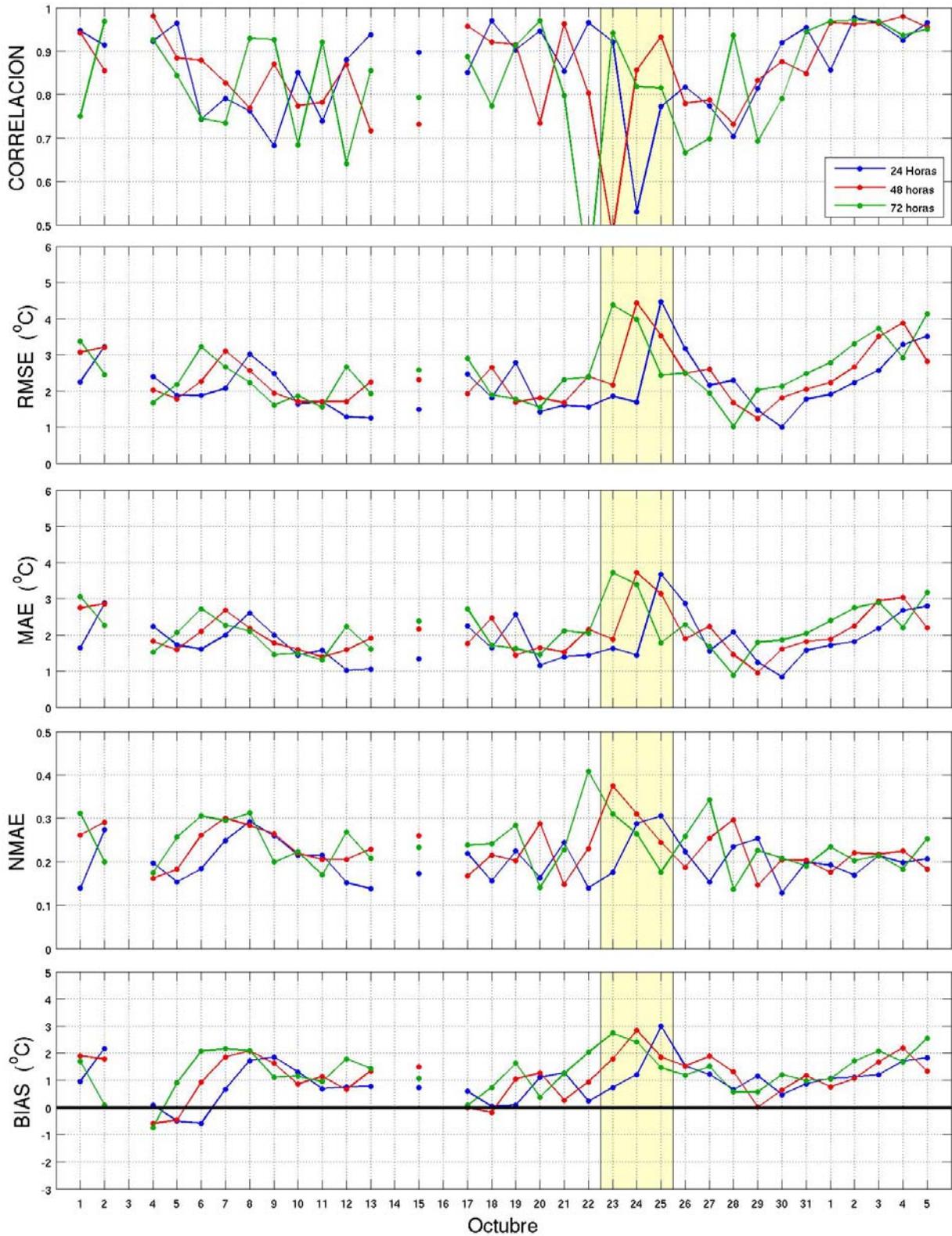


Figura 3.3. Estadísticos para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre con relación a las observaciones en la estación de Campeche, Camp. El área amarilla representa las 72 horas de pronóstico a partir del 22 de octubre a las 12Z.

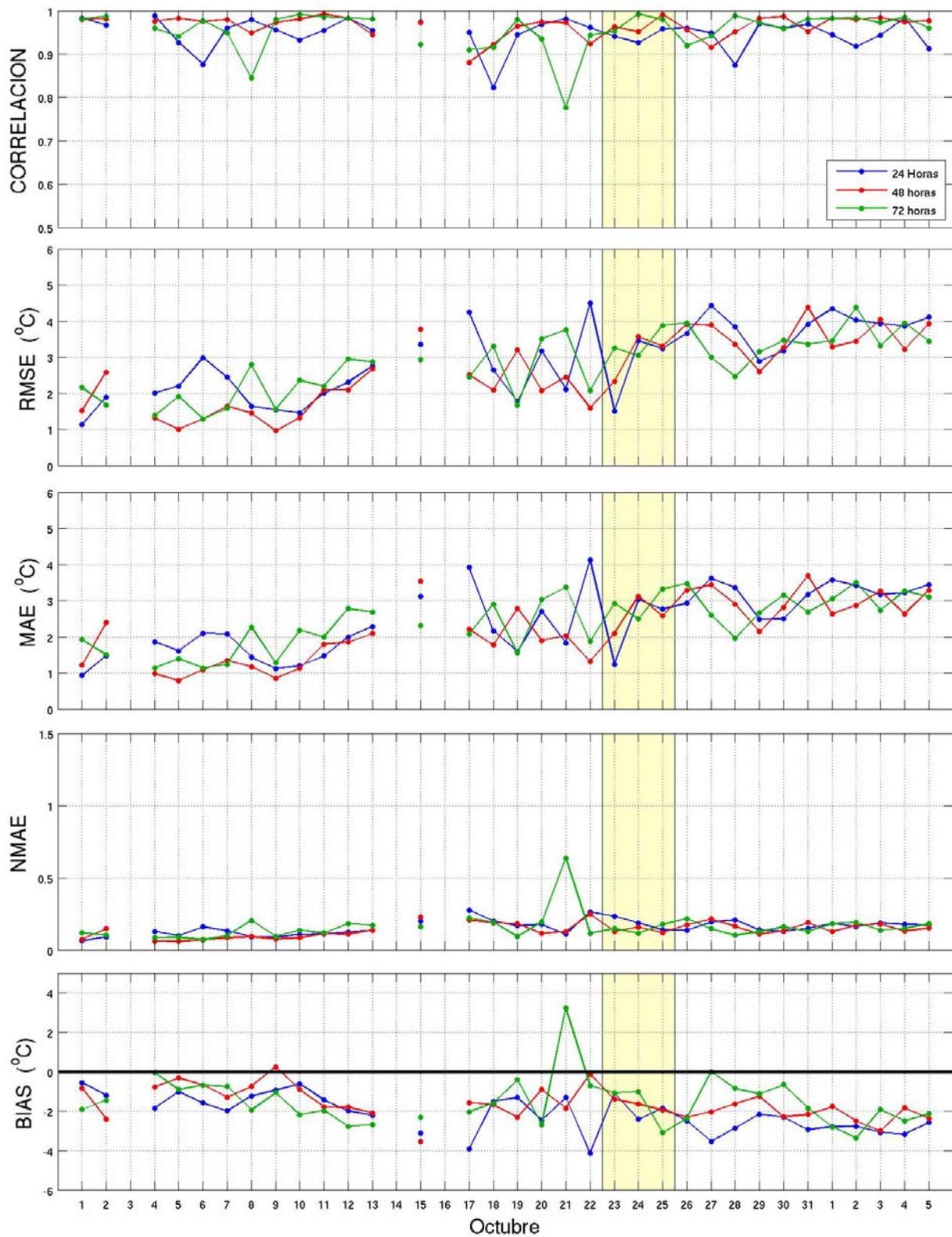


Figura 3.4. Similar a la figura 3.3 pero para la estación de Angamacutiro, Mich.

Tabla 3.2. Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las estaciones de Campeche y Angamacutiro.

Estación	Pronóstico	Estadísticos				
		Corr. lineal	RMSE	MAE	NMAE	BIAS
Campeche	24	0.86	2.2	1.9	0.20	1.0
	48	0.85	2.4	2.0	0.23	1.2
	72	0.83	2.5	2.1	0.24	1.3
Angamacutiro	24	0.95	2.9	2.5	0.16	-2.1
	48	0.97	2.6	2.2	0.14	-1.6
	72	0.95	2.8	2.4	0.16	-1.5

El aspecto más claro que se observa en las figuras 3.3 y 3.4 es que en ambas estaciones existe un incremento en los errores asociados a los pronósticos en las fechas de la entrada del frente frío; en algunos casos las correlaciones son menores a 0.6 y tanto el RMSE como el MAE alcanzan valores de hasta 4°C.

Los valores de la Tabla 3.2 para el caso de Campeche muestran que la correlación es, en promedio, superior a 0.80 para todos los pronósticos, mostrando que el modelo reproduce satisfactoriamente la variabilidad de la temperatura en todo el periodo. El error normalizado con respecto a la amplitud del ciclo diurno es muy estable durante las 72 horas de pronóstico, mostrando que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad diurna de la temperatura. El BIAS por su parte muestra que el modelo tiene una tendencia a sobrestimar ligeramente la temperatura. De manera general, se observa que en esta estación el modelo realiza un buen pronóstico, con errores pequeños en las primeras 24 horas que crecen con el alcance temporal del pronóstico, pero dentro de rangos de confiabilidad razonables.

Para el caso de Angamacutiro, se muestra que la variabilidad de la temperatura es representada con bastante precisión ya que la correlación es mayor a 0.95 en todos los pronósticos. Los errores se muestran ligeramente más grandes que en el caso anterior, el RMSE varía entre 2.6°C y 2.9°C, el MAE entre 2.2 y 2.5, mientras que el BIAS muestra una tendencia a subestimar la temperatura con valores promedio entre -1.5°C y -2.1°C. Contrario al caso anterior, el pronóstico a 24 horas es el que

tiene asociados los errores más grandes, sin embargo, las diferencias en los errores de los pronósticos son pequeñas.

Debido a que no se tienen antecedentes de la validación de los pronósticos en México con el modelo WRF, la magnitud de los errores puede compararse con la de los siguientes trabajos: Jorba et al. (2006) aplican el modelo WRF con distintas anidaciones para analizar la calidad del aire en el noreste de la Península Ibérica y los errores que encuentran al evaluar la temperatura varían de 2°C a 4°C para el RMSE y de -1°C a -3°C para el BIAS; Jorba et al. (2008) evalúan las simulaciones numéricas sobre Europa, con errores en el pronóstico de temperatura que varían entre 1.5°C y 2°C para el MAE; finalmente Zielonka et al. (2008) encuentran errores de 2°C a 3.0°C para el MAE y un BIAS que varía entre 1.5°C y 3°C al evaluar el modelo WRF sobre Estados Unidos. Estos antecedentes muestran que el modelo realiza pronósticos con la misma precisión mostrada en lugares geográficamente distintos y alejados de México.

El análisis de los casos particulares muestra que existen diferencias en los errores de los pronósticos dependiendo de la ubicación de la estación. Esto es debido a que un fenómeno meteorológico de mesoescala con un área de influencia de cientos de kilómetros, como el caso de los frentes fríos, puede causar diferentes variaciones en la temperatura dependiendo de la intensidad que tenga el fenómeno cuando afecta a la región en donde se ubica la estación. Otro factor es el hecho de que algunos procesos atmosféricos que se dan alrededor de las estaciones con una escala espacial y temporal pequeña son parametrizados y no reproducidos por la física del modelo con la resolución que se está utilizando. Sin embargo, estos errores podrían ser reducidos al aplicar anidamientos, siempre y cuando se incluyan explícitamente procesos físicos de menor escala.

3.3 Temperatura a 2 m: Desempeño general del modelo WRF

En la figura 3.5 se presentan los estadísticos asociados a los pronósticos de temperatura del modelo WRF a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre, obtenidos al considerar las 72 estaciones y en la figura 3.6 se muestran los promedios de éstos estadísticos con su respectiva desviación estándar.

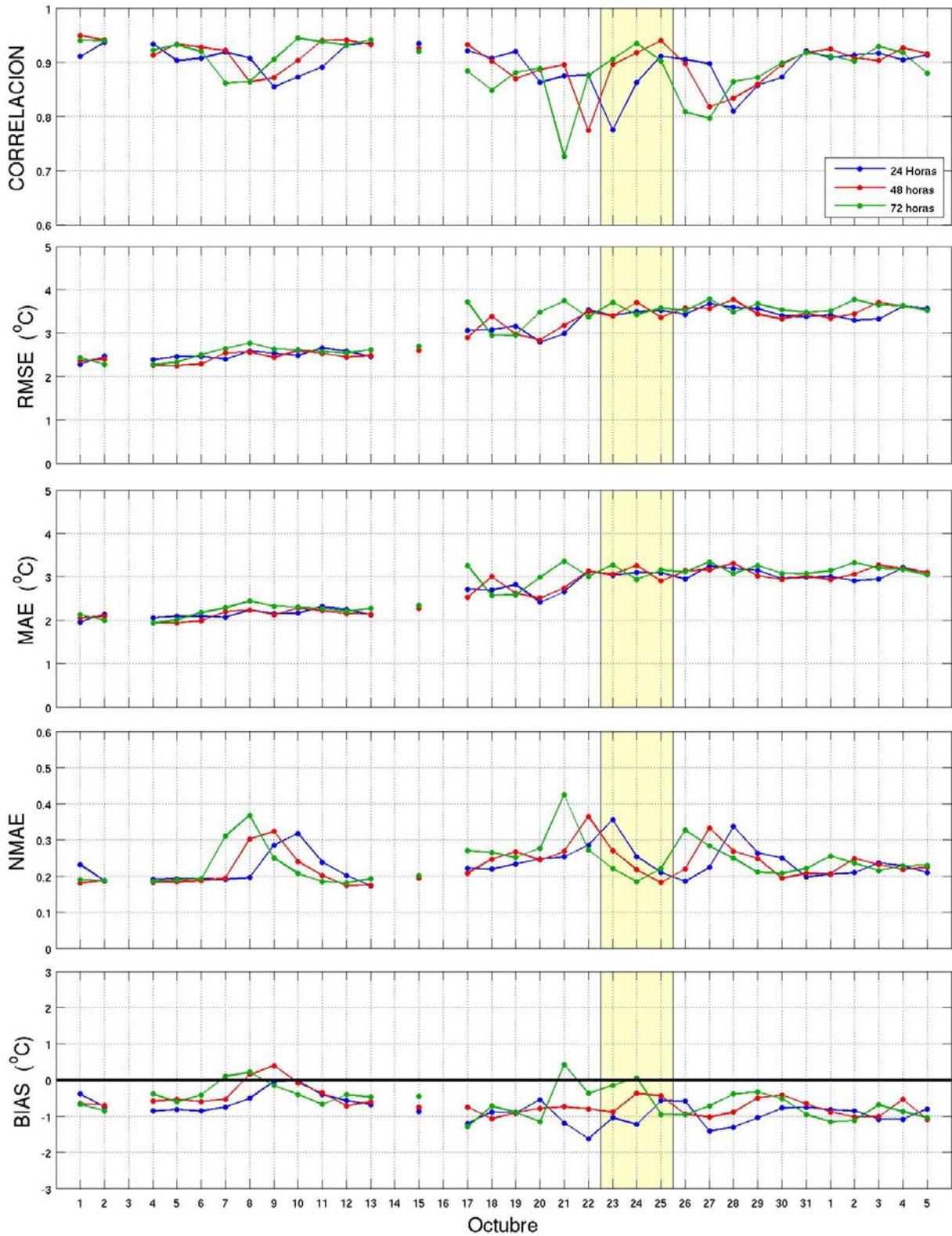


Figura 3.5. Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de temperatura a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre. El área amarilla representa las 72 horas del pronóstico a partir del 22 de octubre a las 12Z.

La variación de los estadísticos (Fig. 3.5) muestra que los valores de correlación más bajos en la serie, de aproximadamente 0.72, se obtienen antes de la entrada del frente frío. Estos mínimos son debidos a que el modelo no logra reproducir con exactitud el cambio drástico en la temperatura por efectos del frente, pero sí reproduce buena parte de la variabilidad. Después de estos valores mínimos las correlaciones son mayores a 0.85, debido a que después de que el modelo ha pronosticado el evento las condiciones iniciales para la simulación numérica del día siguiente ya contienen la información suficiente acerca del estado actual del fenómeno y por lo tanto se reduce el grado de incertidumbre en el modelo.

En cuanto a los errores, se observa que el RMSE tiene valores mayores al final del mes de octubre pero Joilliffe y Stephenson (2003) señalan que el RMSE es un estadístico más sensible a errores causados por malos datos o eventos extremos (como es el caso del evento que ocurre en el periodo de análisis), por lo que podría ser mejor evaluar el comportamiento del modelo con base al error promedio absoluto (MAE), sin embargo, este parámetro también muestra valores mayores al final del periodo. El comportamiento mostrado puede estar asociado a que hacia el final del mes el rango de variación de las temperaturas máximas y mínimas del ciclo diurno es mayor como consecuencia los sistemas frontales que empiezan a afectar a México. Shultz et al. (1997) mencionan que el descenso de temperatura provocado por los frentes puede ser de hasta 15°C en 24 horas, por lo que estos grandes cambios de temperatura modifican el ciclo diurno y provocan variaciones en un rango más amplio que el modelo reproduce parcialmente. Nuevamente, es importante mencionar que esta deficiencia en el modelo no significa que el modelo no reproduce los descensos de temperatura que provocan los frentes, pues ya se ha mostrado lo contrario, sino que el problema radica en los valores extremos de temperatura, los cuales no pueden ser pronosticados con exactitud por ningún modelo.

El error promedio normalizado con respecto al ciclo diurno (NMAE) de la figura 3.6 muestra el problema de la reproducción de los mínimos y máximos de temperatura en el pronóstico. Para el día 21 de octubre se aprecia que el error mayor del pronóstico ocurre a 72 horas, debido a que el efecto del frente es reproducido por el modelo en las últimas 24 horas. En el pronóstico del 22 de octubre el error se muestra en 48 horas y el día 23 en las primeras 24 horas, mostrando el mismo error con desfases de 24 horas.

En la figura 3.6 se observa que la correlación promedio para el periodo de estudio se mantiene constante para los tres casos de pronóstico con un valor de aproximadamente 0.90, lo cual indica

que el modelo es capaz de reproducir con bastante precisión la variabilidad de la temperatura en la República Mexicana en las 72 horas de pronóstico.

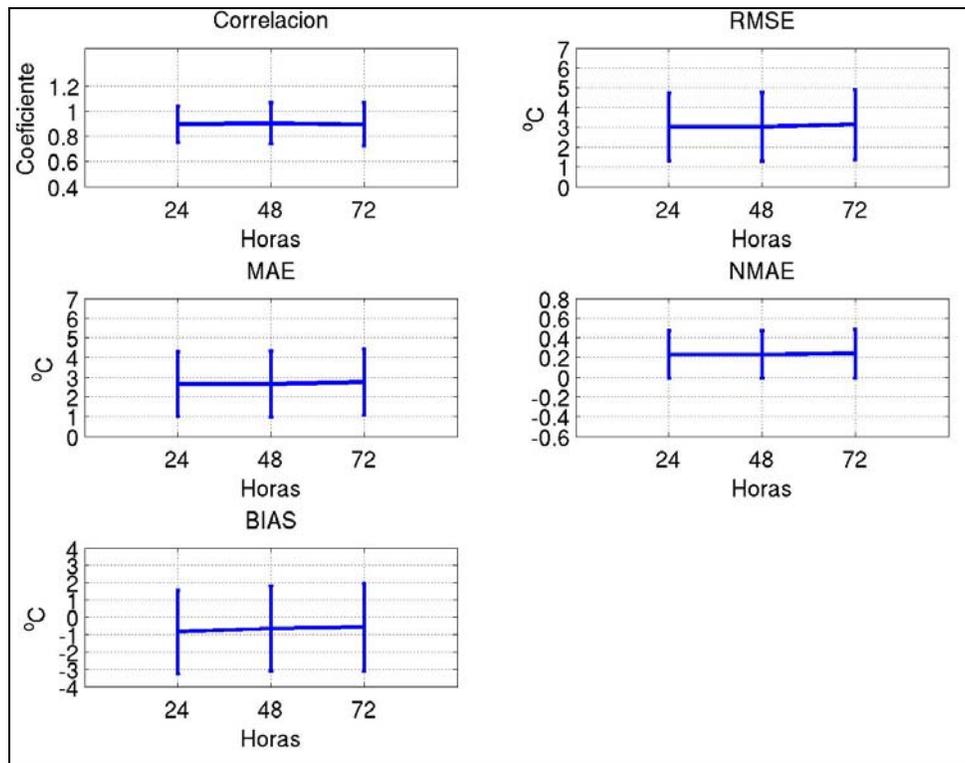


Figura 3.6. Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de temperatura a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF. Las barras verticales indican su desviación estándar.

Los promedios de RMSE y MAE muestran que el error del modelo es de 3°C y 2.6°C, respectivamente, con una desviación estándar alrededor de 1.7°C para el RMSE y 1.6°C para el MAE. En ambos estadísticos se observa un ligero incremento en el error, conforme el alcance del pronóstico; sin embargo es un incremento poco significativo, por lo que se puede considerar que los errores se mantienen prácticamente estables durante las 72 horas de pronóstico.

Finalmente, los valores del BIAS indican que el modelo subestima la temperatura en todo el periodo de estudio en menos de 1°C (Figs. 3.5 y 3.6), que es un resultado similar al de Jorba et al. (2006), quienes lo atribuyen al hecho de que el modelo muestra deficiencias al reproducir los máximos y mínimos de temperatura del ciclo diurno.

3.4 Viento a 10 metros: Casos particulares

Para la validación del viento a 10 m se calcularon los estadísticos tomando en cuenta tres boyas del NDBC ubicadas en el Golfo de México. De la misma manera que se hizo en el caso de la temperatura, se analizarán en primera instancia algunos aspectos particulares de los pronósticos en cada una de las boyas. Las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran el pronóstico a 72 horas de la magnitud y dirección del viento, comparado con los datos observados en las boyas 42002, 42001 y 42055, respectivamente. La simulación numérica corresponde al día 22 de octubre del 2007. Los estadísticos correspondientes de los pronósticos se muestran en la Tabla 3.3.

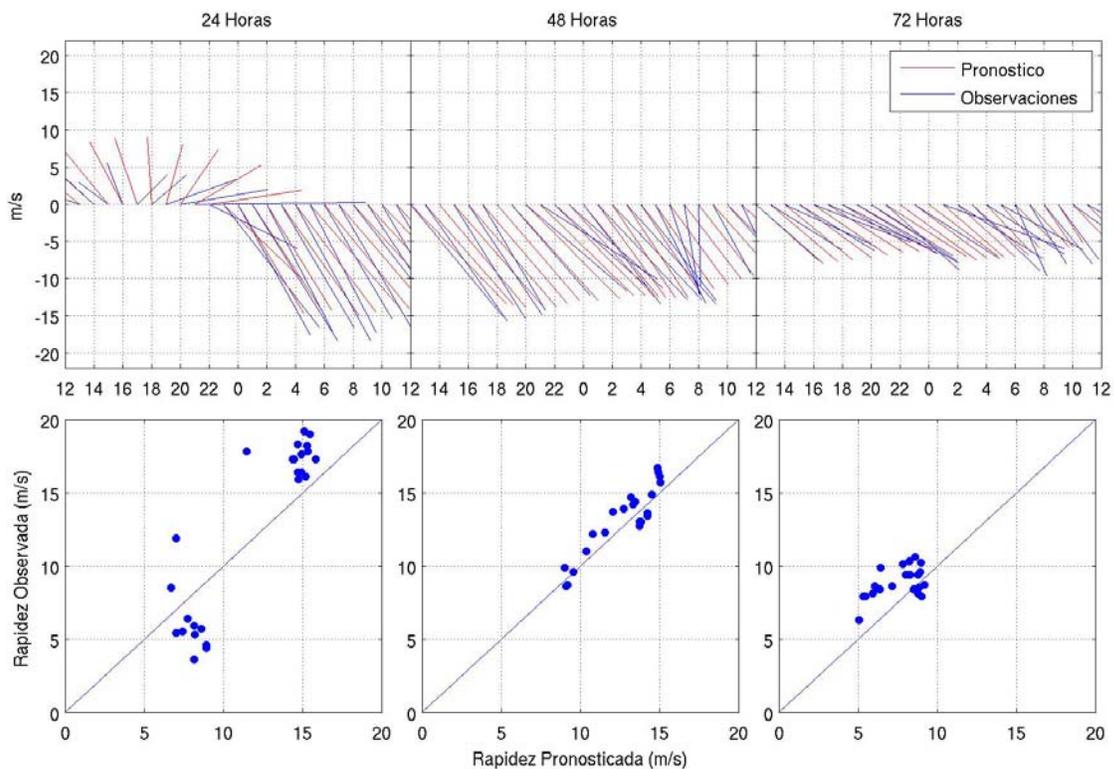


Figura 3.7. Pronóstico de viento a 72 horas en la boya 42002, iniciando el modelo el 22 de octubre. Panel superior: Vector de viento a 10 m observado (azul) y pronosticado por el modelo (rojo) en intervalos de 24 horas. Panel inferior: Diagramas de dispersión de la magnitud del vector de viento.

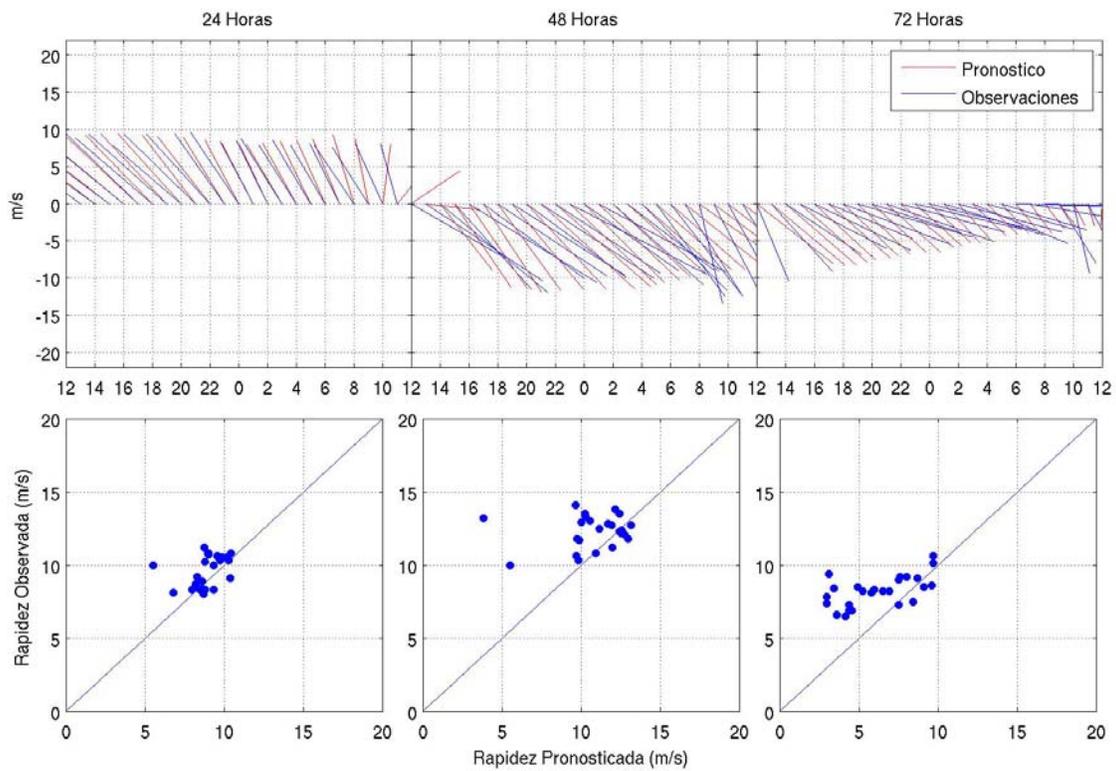


Figura 3.8. Similar a la figura 3.7 pero para la boya 42001.

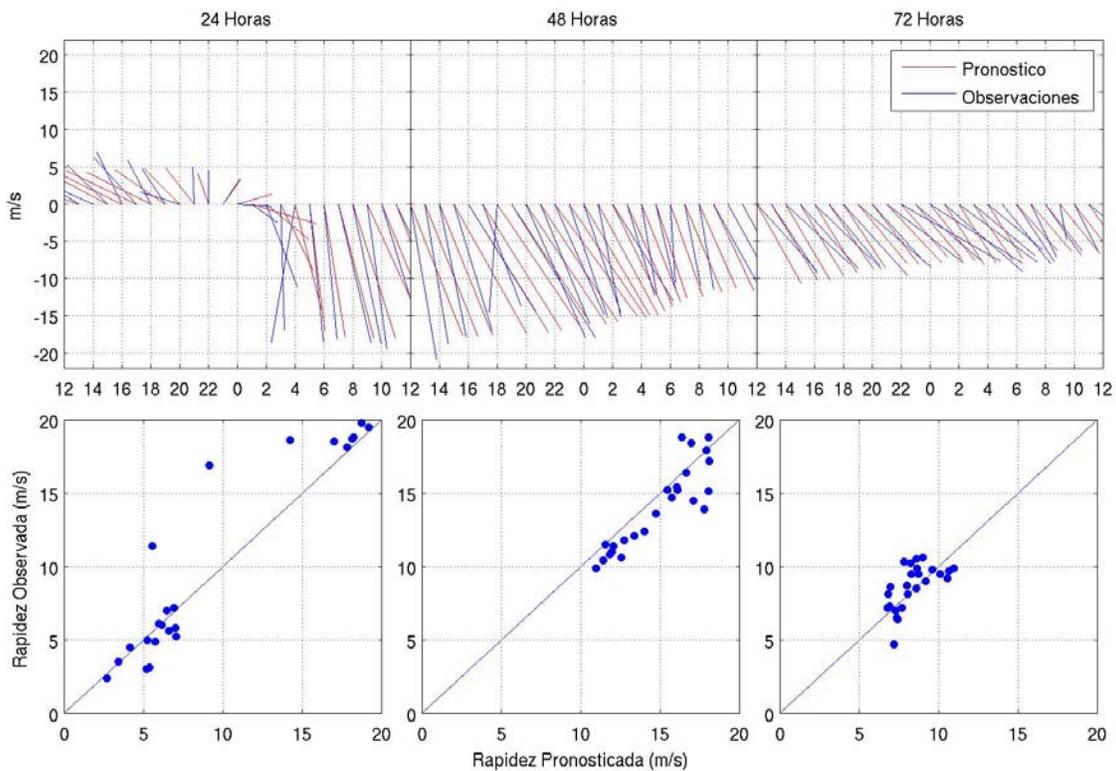


Figura 3.9. Similar a la figura 3.7 pero para la boya 42055.

Tabla 3.3. Estadísticos asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC. Pronóstico del 22 de octubre a las 12Z.

Boya	Pronóstico	Estadísticos				
		Corr. compleja	RMSEV (m/s)	BIASV (m/s)	RMSED (Grados)	BIASD (Grados)
42002	24	0.96	4.5	-0.7	24.3	13.0
	48	0.99	2.0	-0.5	8.1	-1.0
	72	0.98	2.4	-1.3	11.5	5.8
42001	24	0.95	2.9	-0.6	21.7	0.8
	48	0.93	4.7	-1.6	25.6	-5.0
	72	0.90	4.4	-2.0	31.4	23.9
42055	24	0.98	3.2	-0.8	71.8	-11.2
	48	0.99	2.6	0.7	68.0	-5.0
	72	0.98	2.0	-0.2	10.4	5.8

La figura 3.8 muestra el desempeño del modelo en el sitio de la boya 42002, los datos modelados presentan un patrón de variación similar al de las observaciones. La Tabla 3.3 muestra que la correlación entre el vector de viento pronosticado y el observado es superior a 0.95 en todo el periodo de pronóstico, indicando que el modelo reproduce satisfactoriamente el cambio en la magnitud de los vientos por la entrada del frente. Los errores más grandes se presentan durante las primeras 24 horas del pronóstico, cuando se registra la entrada del frente frío. En este periodo, el gráfico muestra que el modelo sobrestima la magnitud del viento antes de la entrada del frente y después la subestima, lo cual puede verse claramente en el diagrama de dispersión correspondiente. Aunque se muestra una doble tendencia, el promedio del pronóstico a 24 horas indica que el modelo subestima la magnitud del viento en menos de 1 m/s (BIASV) y tiene un error cuadrático de 4.5 m/s (RMSEV). Los errores en la dirección del viento indican que, en promedio, el modelo tiende a pronosticar el vector con una desviación de 13° a la izquierda del observado (BIASD) y con un error de cuadrático de 24.3° (RMSED).

Estos errores pueden ser comparados con los obtenidos por Jorba et al. (2006), quienes al evaluar el viento a 10 m sobre el noreste de la Península Ibérica para el año 2004, encuentra que el RMSEV varía entre 4 m/s y 2 m/s a lo largo del año con máximos que alcanzan hasta 8 m/s en condiciones

meteorológicas particulares, mientras que el BIASV varía entre 1 m/s a 2 m/s con máximos de hasta 7 m/s. Los errores que encuentran para la dirección del viento indican un RMSED entre 60° y 90° y un BIAS variable entre $\pm 20^\circ$.

Es claro que, a pesar de que el modelo presenta errores más grandes cuando existe un fenómeno que cambia súbitamente las condiciones atmosféricas, los resultados muestran que aún en estos casos se reproducen los vientos con bastante precisión, por lo menos en el caso de la boya 42002. Después de este cambio drástico el modelo tiene asociados errores menores. Para las últimas 48 horas de pronóstico el error cuadrático en la magnitud del viento varía entre 2.0 m/s y 2.4 m/s con una tendencia a subestimar ligeramente la magnitud, mientras que para la dirección el error cuadrático es pequeño y varía entre 8.1° y 11.5°, pronosticando el vector con una desviación aproximada de -1° (izquierda) a 5.8° (derecha) con respecto al vector observado. De manera general los estadísticos muestran una muy buena precisión para el pronóstico del viento en este sitio.

En el caso de la boya 42001 (Fig. 3.8) se observa que el modelo reproduce satisfactoriamente el cambio en la magnitud del vector de viento con una correlación igual o mayor a 0.90 para todo el periodo de pronóstico. La Tabla 3.3 muestra que en las 72 horas de pronóstico el RMSEV se encuentra entre 2.9 m/s y 4.7 m/s siendo mayor cuando se registra la entrada del frente (entre 24 y 48 horas debido a que esta boya se ubica al este de la 42002). También se observa que el modelo subestima ligeramente la magnitud del vector, con valores del BIASV entre -0.6 m/s y -2.0 m/s. El error cuadrático más grande en la dirección (RMSED) es de 31.4° para el pronóstico a 72 horas, lo cual puede asociarse a que el modelo tiene problemas para pronosticar el regreso a condiciones atmosféricas más estables. La tendencia del modelo en los pronósticos de la dirección del vector de viento varía a lo largo del periodo: en las primeras 24 horas muestra una ligera tendencia a pronosticar el vector con una desviación menor de 1° hacia la derecha del vector observado, en 48 horas muestra una desviación a la izquierda por 5° y a 72 horas el modelo tiende a pronosticar el vector con una desviación de 23.9° a la derecha, siendo este periodo el que tiene los errores más grandes. Aunque los errores son más variables que en el caso de la boya 42002, el modelo muestra una buena reproducción de la intensidad y dirección del viento en este sitio.

En el caso de la boya 42055 (figura 3.9) los resultados son similares a los obtenidos con los datos de la boya 42002 debido a que estas dos boyas están ubicadas casi a la misma longitud y registran la entrada del frente con poca diferencia de tiempo entre ellas. La correlación para todo el periodo de

72 horas es superior a 0.95 y muestra que el cambio en la magnitud del viento es bien reproducido por el modelo. Nuevamente los errores más grandes se encuentran en las primeras 24 horas al registrar la entrada del frente: en este intervalo del pronóstico el RMSEV es de 3.2 m/s y el modelo muestra una tendencia a subestimar el viento en -0.8 m/s. Sin embargo, los errores en la dirección son considerables, con un error cuadrático de 71.8° y una tendencia a que el vector pronosticado tenga una desviación de 11.2° a la izquierda del observado; a pesar de esto los errores son menores a los encontrados por Jorba et al. (2006). De la misma manera que en la boya 42002 los errores disminuyen en las últimas 48 horas de pronóstico, con valores del RMSEV que varían entre 2 m/s y 2.6 m/s. El BIASV indica que el modelo sobrestima el viento a 48 horas y lo subestima a 72 horas con valores menores a 1 m/s en ambos casos. En cuanto a la dirección del viento se observa que el error cuadrático varía entre 10.4° y 68° . La dirección del viento pronosticado es variable pues en 24 horas y 48 horas es hacia la izquierda y en 72 horas a la derecha, en los tres casos el BIASD es menor a 12° .

El análisis anterior muestra que, en general, el modelo reproduce bien el vector de viento. Aunque la magnitud de los errores aumenta cuando entra el frente frío, estos son pequeños al compararlos con la magnitud de los cambios en la dirección e intensidad del viento y con los resultados obtenidos por otros autores, por lo que se puede decir que el modelo reproduce satisfactoriamente las condiciones de viento observado.

En las figuras 3.10, 3.11 y 3.12 se presentan los estadísticos obtenidos de la comparación entre los pronósticos diarios de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones de las boyas para el periodo del 1 de octubre al 5 de noviembre. Asimismo, se muestra el gráfico de la rapidez del viento medido en la boya correspondiente, aquí los sombreados azules indican intervalos temporales en los cuales la rapidez observada es menor a 5 m/s. Aunque existen varios eventos con estas características se muestran los que abarcan un periodo temporal más grande, pues aquellos que ocurren en un periodo de tiempo muy corto (alta frecuencia) no pueden ser reproducidos por ningún modelo numérico. En la Tabla 3.4 se muestran los promedios de los estadísticos para todo el periodo.

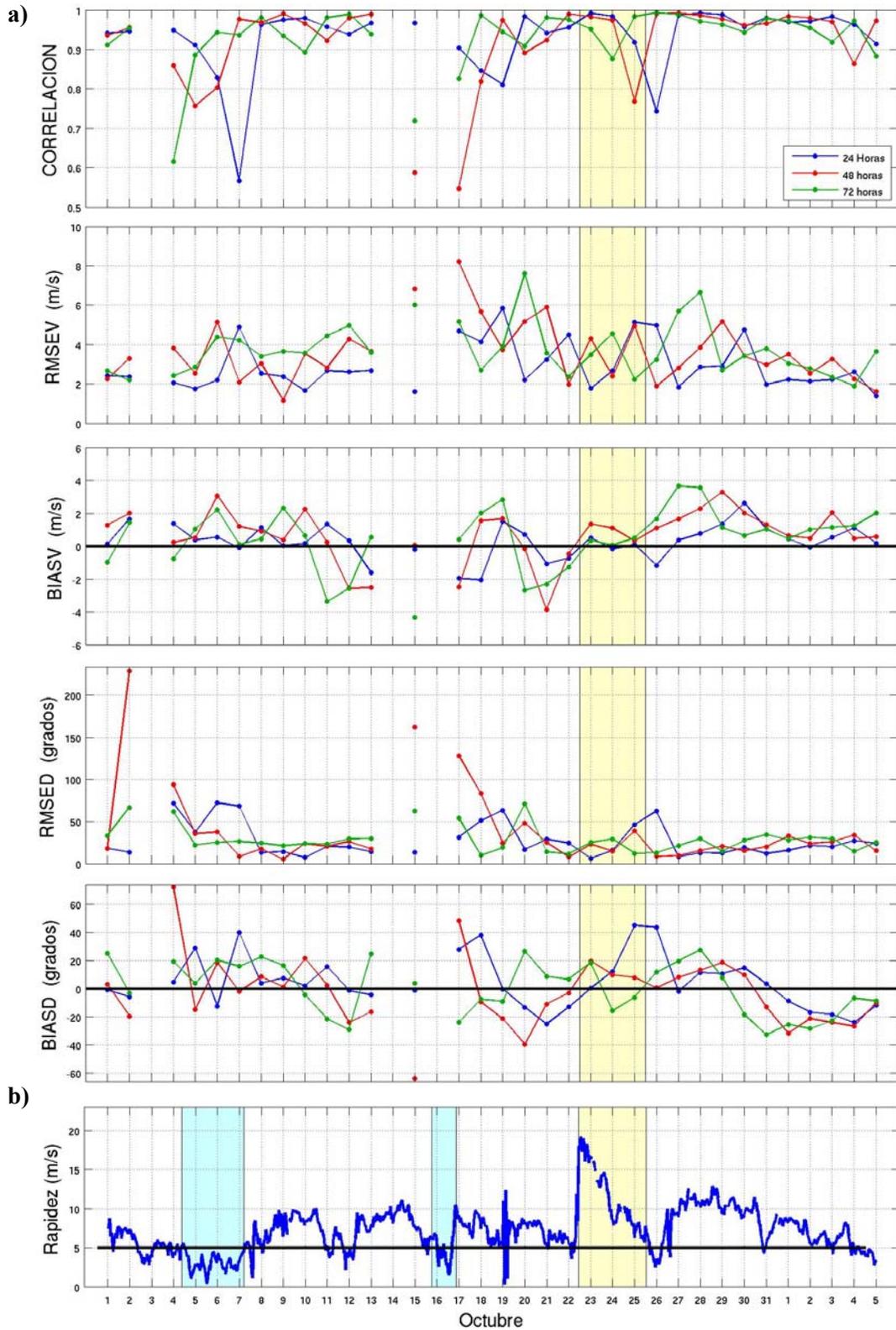


Figura 3.10. a) Estadísticos diarios a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre en la boya 42002. b) Rapidez del viento medido en la boya. Los sombreados azules indican periodos con intensidades de viento menores a 5 m/s.

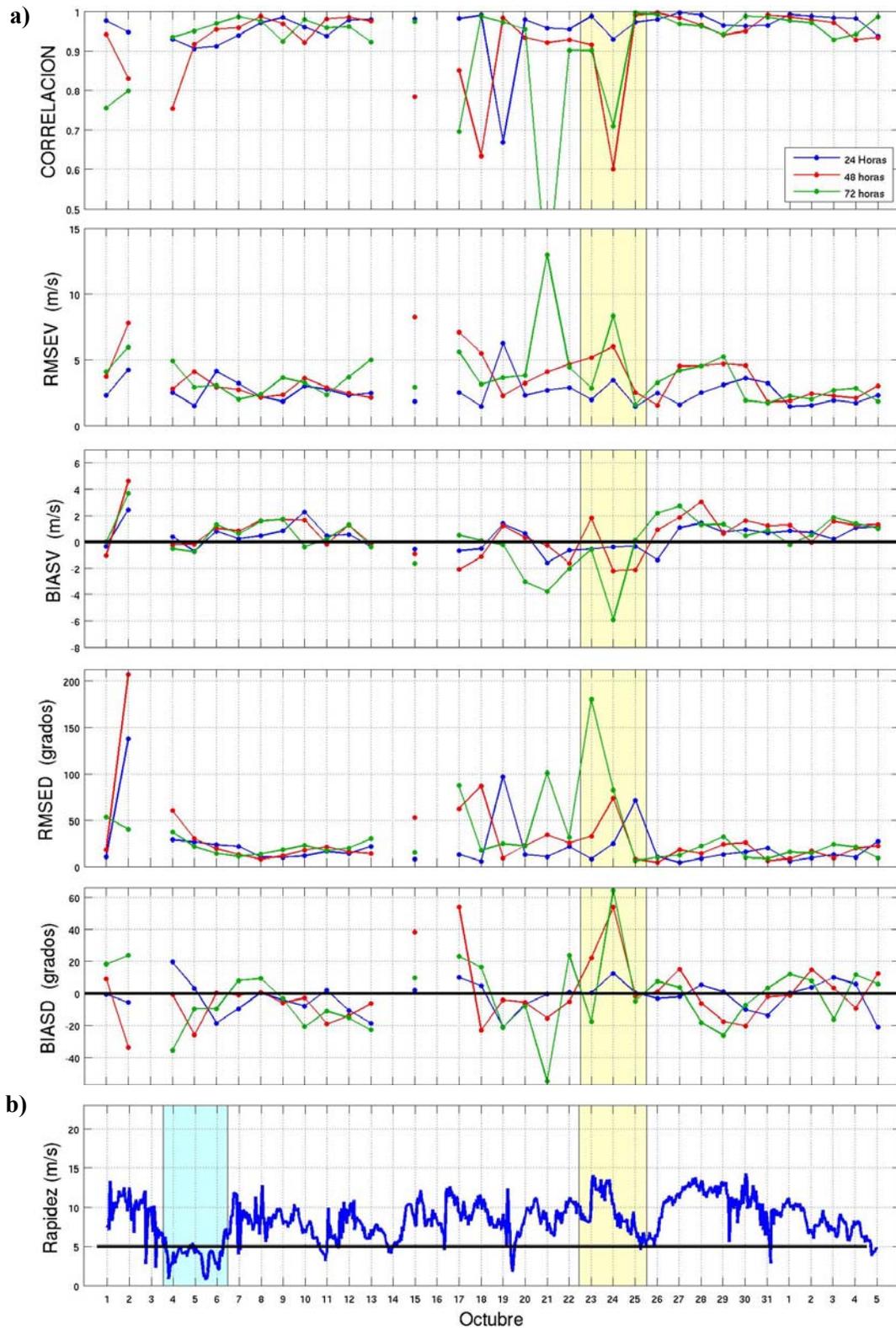


Figura 3.11. Similar a la figura 3.10 pero para la boya 42001.

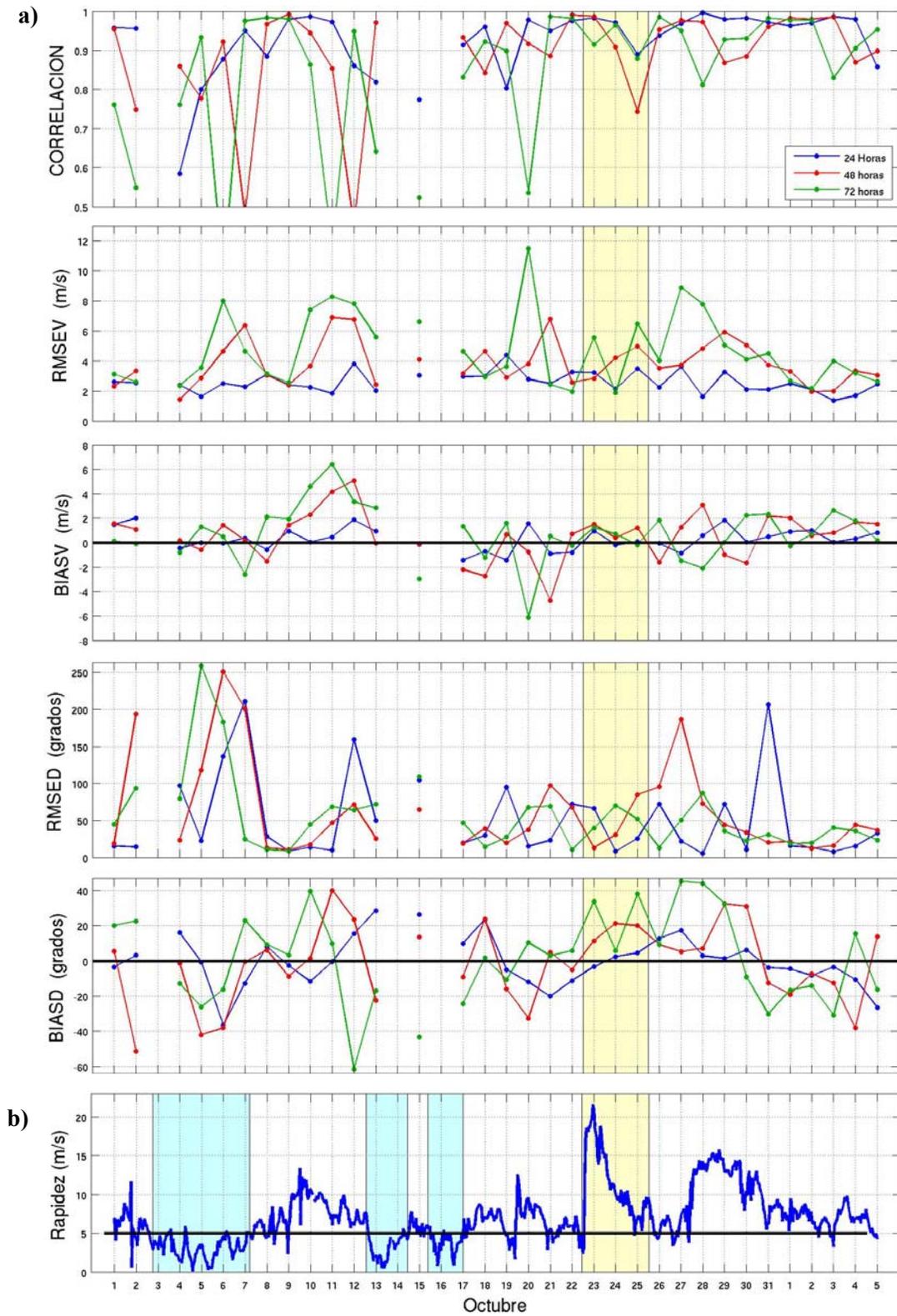


Figura 3.12. Similar a la figura 3.10 pero para la boya 42055.

Tabla 3.4. Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre, asociados a la comparación entre los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas y las observaciones en las boyas del NDBC.

Boya	Pronóstico	Estadísticos				
		Corr. compleja	RMSEV (m/s)	BIASV (m/s)	RMSED (Grados)	BIASD (Grados)
42002	24	0.93	2.9	0.28	27.5	4.7
	48	0.92	3.6	0.67	39.8	-2.6
	72	0.93	3.7	0.42	29.3	0.5
42001	24	0.96	2.6	0.34	22.6	-2.2
	48	0.92	3.7	0.56	30.7	0.1
	72	0.91	3.8	0.16	31.7	-1.6
42055	24	0.92	2.8	0.27	51.5	0.04
	48	0.87	3.8	0.56	62.0	-1.4
	72	0.84	4.7	0.68	55.6	1.3

Los promedios de la Tabla 3.4 para el caso de la boya 42002 indican que la correlación es mayor a 0.90 en el periodo de análisis pero en la figura 3.10a se muestra claramente que existen dos casos en los que el pronóstico tiene asociadas correlaciones relativamente bajas, el primero puede verse entre el 5 y 7 de octubre y el segundo el día 16 de octubre. Para analizar la fuente de error se ha graficado en 3.10b la rapidez del viento observado en la boya, en donde se muestra con sombreados azules periodos de tiempo en los cuales la rapidez del viento es menor a 5 m/s. Los gráficos muestran que los dos casos representados en la figura 3.10a están relacionados con valores bajos de correlación debido a las intensidades de viento relativamente pequeñas. Sin embargo, los promedios de los estadísticos muestran que la correlación es superior a 0.92, indicando que el modelo realiza satisfactoriamente la variabilidad de la magnitud del viento. El RMSEV varía entre 2.9 m/s y 3.7m/s, el BIASV es menor a 1 m/s, el RMSED es mayor a 27.5° y el BIASD es de ± 5 grados, sin preferencia a mostrar una desviación a la derecha o izquierda respecto al vector observado.

Para el caso de la boya 42001 los promedios de la Tabla 3.4 indican que el modelo también reproduce satisfactoriamente la variabilidad en la magnitud del viento en este sitio. De la misma

manera que en el caso anterior, en la figura 3.11a se observan un periodo de tiempo en el cual el pronóstico tiene asociadas bajas correlaciones, dicho periodo se encuentra entre el 4 y 6 de octubre, y es asociado también a los registros de intensidades de viento menores a 5 m/s. Otro detalle importante es el hecho de que el incremento en los errores sucede antes del periodo con registros de intensidades de viento pequeñas, debido a que los errores surgen cuando el modelo debe pronosticar en las próximas 24, 48 y 72 horas un viento menor a 5 m/s, por lo tanto, el incremento en los errores para los pronósticos de los días 4 y 5 de octubre están asociados con las intensidad de viento de los días 6 y 7 de octubre. Con el análisis anterior se encuentra que las intensidades de viento pequeñas provocan que los errores aumenten, en el caso del RMSEV el error alcanza los 10 m/s y subestima ± 4 m/s (BIASV). Para la dirección el RMSED alcanza 150° y se pronostica hasta 60° de separación con respecto al vector observado (BIASD). Sin embargo, los promedios indican que el RMSEV varía de 2.6 m/s a 3.8 m/s y el BIASV es menor a 0.6 m/s durante las 72 horas de pronóstico, la dirección muestra errores menores entre 22° y 32° en el RMSED y un BIASD menor a 5° grados, ya sea a la izquierda o a la derecha. Los promedios de los estadísticos indican que aún considerando las intensidades de viento pequeñas y el cambio drástico en esta variable por causa del frente frío el modelo logra reproducir con buena precisión el vector de viento. Por ultimo cabe mencionar que los promedios indican que los pronósticos son mejores a 24 horas.

En la figura 3.13 se representan los resultados para el caso de la boya 42055, aunque los registros de viento son diferentes a las boyas anteriores también se presentan periodos con pequeñas intensidades de viento, en este caso se encuentran entre el 1 y 17 de octubre.

La deficiencia que se ha encontrado en el modelo en muchos casos es mejorada con la aplicación de anidamientos que permiten recuperar procesos de menor escala (Jorba et al., 2006; Jorba et al., 2008; Zielonka et al., 2008). Sin embargo, varios de los casos mostrados que registran vientos observados menores a 5 m/s ocurren en un intervalo de tiempo muy corto, que difícilmente sería recuperado aún con anidamientos. Además, el tiempo necesario para hacer simulaciones numéricas con anidamientos no es factible para un pronóstico operativo.

3.5 Viento a 10 m: Desempeño general del modelo WRF

Los estadísticos que describen el desempeño de los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas se muestran en la figura 3.13, estos son obtenidos como un promedio de las tres boyas analizadas que,

a pesar de ser pocas, tienen una buena calidad de datos. Los promedios de los estadísticos considerando el periodo de tiempo del 1 de octubre al 5 de noviembre se presentan en la figura 3.14 indicando sus respectivas desviaciones estándar.

Las series de correlación de la figura 3.13 muestran que los valores más bajos se ubican en la primera mitad del periodo de análisis y, como ya se ha comentado, son debidos a los registros con débil intensidad de viento en las tres boyas, a pesar de ello la correlación muestra que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad en la rapidez del viento pues estos valores se encuentran alrededor de 0.80. Los errores más grandes en el RMSEV y BIASV tienen un valor de 7.6 m/s y -4 m/s respectivamente, y se observan cuando el modelo pronostica la entrada del frente frío. Para el caso de la dirección se observa que el RMSED es muy variable, con grandes errores en la primera semana asociados a las intensidades menores de 5 m/s.

Los promedios de la figura 3.14 muestran que la correlación es superior a 0.90 para los pronósticos a 24, 48 y 72 horas, indicando que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad en la rapidez del viento. En cuanto al RMSED se observa que se incrementa conforme el alcance del pronóstico de 2.7 m/s a 4 m/s, con el valor más pequeño en el pronóstico a 24 horas; el BIAS indica que el modelo subestima ligeramente la magnitud del viento, sus valores son menores a 1 m/s en cualquier etapa del pronóstico. Los promedios de estos estadísticos demuestran mejores resultados que los encontrados por Caballero (2005), quien obtiene correlaciones por debajo de 0.60 y errores entre 17m/s y 22 m/s aplicando diferentes configuraciones del modelo MM5. Los errores en la dirección del viento indican que el RMSED varía entre 30° y 50° y el BIASD varía en un rango de $\pm 25^\circ$, sin mostrar una tendencia a que el vector de viento pronosticado se encuentre a la derecha o izquierda del observado. Finalmente, se observa que el pronóstico a 24 horas es mejor que a 48 y 72 horas pues tiene asociados errores más pequeños en casi todo el periodo de estudio aunque las desviaciones estándar se incrementan cuando es mayor el alcance del pronóstico.

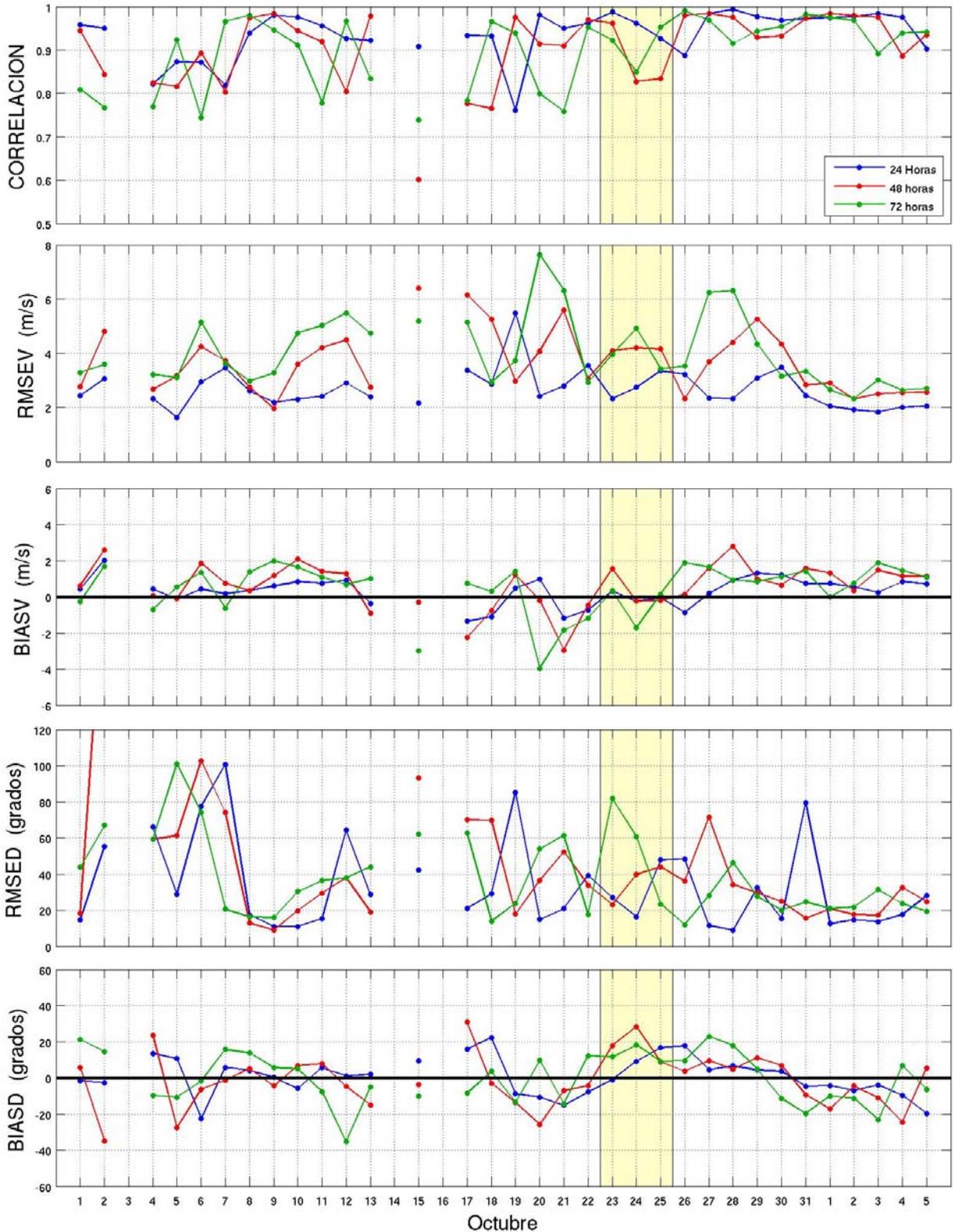


Figura 3.13. Estadísticos del modelo WRF para los pronósticos diarios de viento a 24, 48 y 72 horas del 1 de octubre al 5 de noviembre. El área amarilla representa las 72 horas del pronóstico a partir del 22 de octubre a las 12Z.

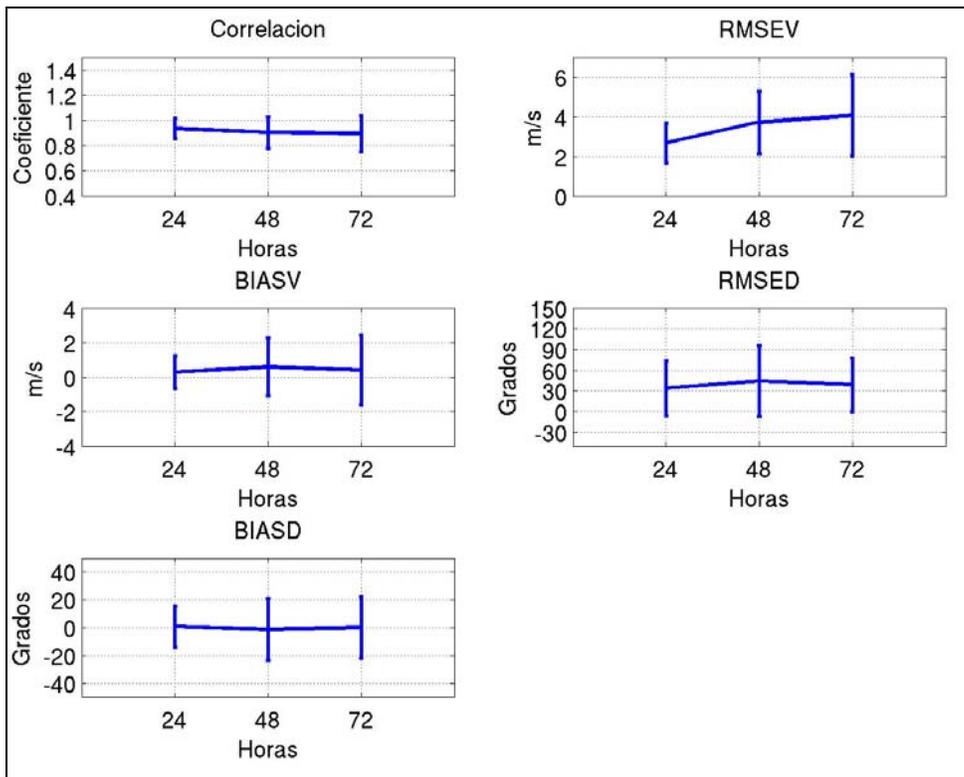


Figura 3.14. Estadísticos promediados del 1 de octubre al 5 de noviembre para los pronósticos de viento a 24, 48 y 72 horas del modelo WRF. Las barras verticales indican su desviación estándar.

3.6 Consideraciones para un trabajo futuro

El trabajo de validación realizado proporciona resultados importantes acerca de la habilidad del modelo WRF para pronosticar las condiciones meteorológicas asociadas a un frente frío que, de acuerdo con los resultados que se presentan en el capítulo siguiente, puede considerarse como un evento extremo. Se han obtenido buenos resultados tanto para el pronóstico de temperatura como de viento, sin embargo, es necesario enfatizar algunos puntos que pueden ser importantes para un trabajo posterior y que permitirán analizar con más detalle la confiabilidad del modelo.

En el caso de la temperatura, el modelo parece tener un comportamiento distinto para los sitios que se encuentran cercanos a la costa, muy probablemente debido a que estos puntos están influenciados por fenómenos más locales, por lo que se podría realizar la evaluación del modelo considerando a

estos puntos por separado. Otro aspecto importante es que el proceso de validación debe extenderse a un periodo de tiempo más largo, por ejemplo un año, para conocer el desempeño del modelo en distintas condiciones meteorológicas y tener estadísticos más robustos. En cuanto al viento estimado por el modelo también es deseable analizar un periodo de tiempo más largo, por ejemplo una temporada completa de nortes, además de considerar un número mayor de observaciones con el fin de corroborar el buen desempeño del modelo aún en condiciones meteorológicas extremas.

Un aspecto que podría mejorar los resultados sería implementar la asimilación de datos para mejorar las condiciones iniciales que utiliza el modelo y que podrían disminuir los errores asociados a cambios rápidos en las condiciones atmosféricas. Finalmente, es importante mencionar algunas consideraciones referentes a la metodología, por ejemplo Stenger (2000) encontró que utilizando el método de verificación celda-punto (sin hacer interpolaciones) y aumentando la resolución del modelo a través de anidaciones mejora la habilidad en los pronósticos. Sin embargo, los costos computacionales siempre se deben tener en cuenta, sobre todo si la evaluación está enfocada a un sistema de pronóstico que funcione de manera operativa, como fue planteada en este caso.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó al principio de este trabajo, uno de los objetivos planteados es caracterizar los sucesos meteorológicos ocurridos entre el 22 de octubre y el 2 de noviembre del 2007 utilizando las simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF. Aunque el estudio de procesos atmosféricos utilizando modelos numéricos tiene un constante desarrollo, siempre existen factores que agregan un grado de incertidumbre a los resultados y, en muchos casos, limitan la interpretación de éstos. Para dar una idea objetiva de los alcances y limitaciones del modelo, en el capítulo anterior se realizó el proceso de validación, cuyos resultados indican que el modelo reproduce de manera satisfactoria las condiciones de viento y temperatura asociadas al frente frío número 4. Una vez que se ha analizado el desempeño del modelo, es posible analizar los procesos relacionados con el fenómeno de interés, pues se cuenta con una idea cuantitativa del grado de confianza que existe para interpretar los resultados.

Por otro lado, para utilizar modelos numéricos siempre se requiere de una buena base de datos para comparar los resultados numéricos. Es deseable que la base de datos cubra un gran intervalo temporal, que contenga datos de calidad, que tenga una adecuada distribución espacial en la zona de estudio, etc., con el fin de sustentar de la mejor manera los resultados numéricos. Sin embargo, en muchas ocasiones no es posible contar con todos los requisitos, por lo que es necesario manejar con mucho cuidado las pocas mediciones que estén disponibles. En este estudio se ha recurrido a diversas fuentes de datos (descritos en la sección 2.2), necesarios para complementar la información meteorológica y que funcionan como parámetros para determinar el desempeño del modelo al simular las condiciones meteorológicas que motivan este trabajo.

La estructura de este capítulo es de la siguiente manera: En primera instancia se caracteriza la intensidad de los vientos asociados al evento con el fin de describirlo de manera objetiva, posteriormente se analizan detalladamente las variables que, de acuerdo con los registros de pérdidas humanas y materiales, causaron daños importantes debido a su magnitud, es decir, el viento y la precipitación. Para ambas variables se comparan los valores obtenidos numéricamente con mediciones in situ o con alguna otra base de datos. Para el caso del viento, la mayor parte del análisis se realiza utilizando técnicas estadísticas y en cuanto a la precipitación, se analizan las condiciones meteorológicas que propiciaron las intensas precipitaciones en los dos periodos con registros máximos y se calculan algunos estadísticos. Al final del capítulo se hace un análisis de las diferencias en las condiciones meteorológicas que provocaron las precipitaciones de cada periodo, destacando algunos puntos importantes acerca de los alcances que tiene el modelo para reproducir este tipo de eventos.

4.1 Definición de *Evento extremo*

Considerando los daños ocasionados en las plataformas petroleras ubicadas en el Golfo de México por los fuertes vientos y la inundación en el estado de Tabasco como consecuencia de las intensas precipitaciones, el evento que aquí se analiza podría ser catalogado, subjetivamente, como un evento extremo, y aún más, resultante del cambio climático. Por lo anterior, el primer análisis tiene por objetivo cuantificar la magnitud del evento y determinar qué tan frecuente puede ser un evento con estas características.

Para cuantificar la magnitud del evento es esencial aclarar el concepto de *evento extremo*. De acuerdo con la literatura existente y tomando como referencia el reporte IPCC WG1 AR4 (IPCC, 2007), la definición de *evento extremo* es la siguiente:

“Un evento meteorológico extremo es un evento que es *raro* en un lugar y tiempo determinado del año. Las definiciones de raro varían, pero un evento meteorológico extremo sería normalmente tan raro como o más raro que el 10mo o 90vo percentil de la función de densidad de probabilidad. Por definición, las características de un evento meteorológico extremo podrían variar de un lugar a otro en un sentido absoluto. Un solo evento extremo no puede ser simple y directamente atribuido al cambio climático antropogénico, pues siempre hay una posibilidad finita de que el evento en

cuestión haya ocurrido naturalmente. Cuando un patrón de eventos extremos persiste por algún tiempo, por ejemplo una estación del año, este podría ser clasificado como un evento climático extremo, especialmente si alcanza un promedio o total que es por si mismo extremo (por ejemplo, sequía o precipitación intensa en una estación).”

Considerando la definición anterior, el análisis de los vientos asociados al frente frío número 4 se realiza tomando en cuenta las intensidades que se alcanzaron en regiones oceánicas, ya que los datos utilizados para validar los vientos son los de las boyas del NDBC, aunque cabe aclarar que las velocidades de los vientos registrados en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche no son menos importantes. Adicionalmente, se tiene el hecho de que la intensidad de los vientos en la Bahía de Campeche jugó un papel importante en los daños ocasionados en las plataformas petroleras, de manera que las conclusiones del trabajo pueden servir como parámetros a considerar en eventos futuros de este tipo.

4.2 Análisis del viento

Como fue descrito en el análisis sinóptico (sección 1.1), el sistema de alta presión asociado al frente frío número 4 entró al Golfo de México el día 23 de octubre ocasionando vientos de gran intensidad. Las salidas numéricas del modelo WRF mostraron estas condiciones meteorológicas por lo menos 48 horas antes de que ocurrieran como se aprecia en la figura 4.1, correspondiente al pronóstico a 57 horas del viento a 10 m iniciando el modelo el día 21 de octubre a las 12Z (por simplicidad, en las figuras a lo largo del capítulo se referirá como WRF-21-10-2007-12Z). En la figura se observan intensidades del viento en el rango de 70 a 80 km/h (19.4 a 22.2 m/s) sobre el suroeste del Golfo de México, el Istmo de Tehuantepec y el Golfo de Tehuantepec (ver acercamiento), con una dirección predominante del norte.

En la simulación numérica del siguiente día, iniciada el 22 de octubre a las 12Z (Fig. 4.2), se observan los vientos sobre el Golfo de México con 24 horas de anticipación, mostrando vientos más intensos que los pronosticados el día 21 (Fig. 4.1), con valores en un rango de 90 a 100 km/h (25 a 27.7 m/s) sobre el extremo sur del Golfo de México.

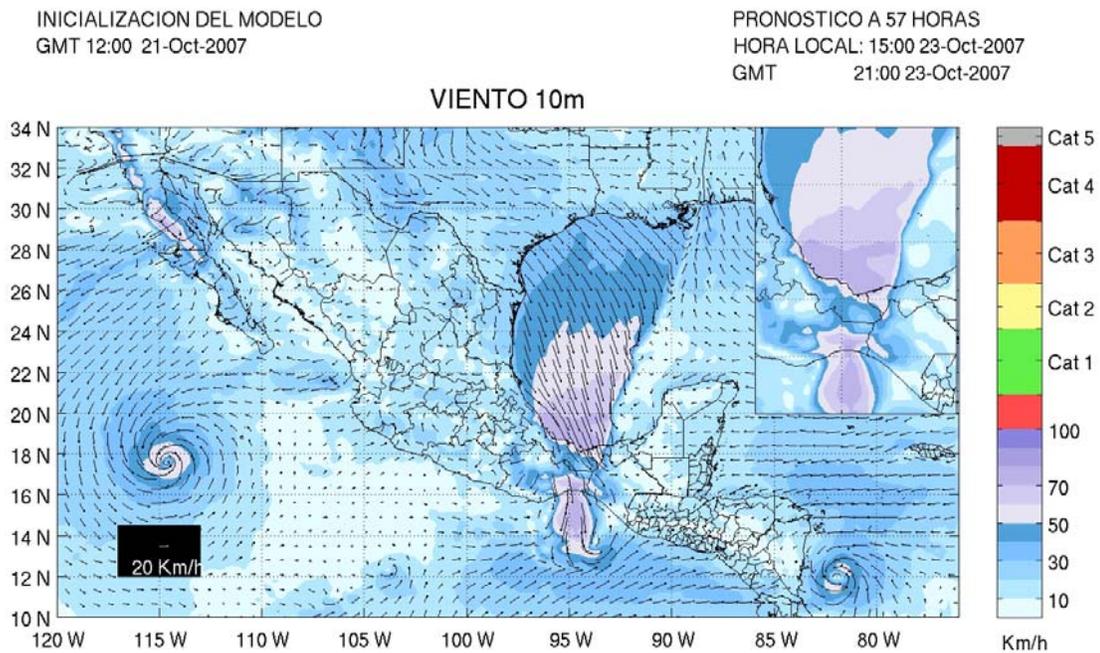


Figura 4.1. Pronóstico a 57 horas de la rapidez y dirección del viento a 10 m con el modelo WRF (WRF-21-10-2007-12Z).

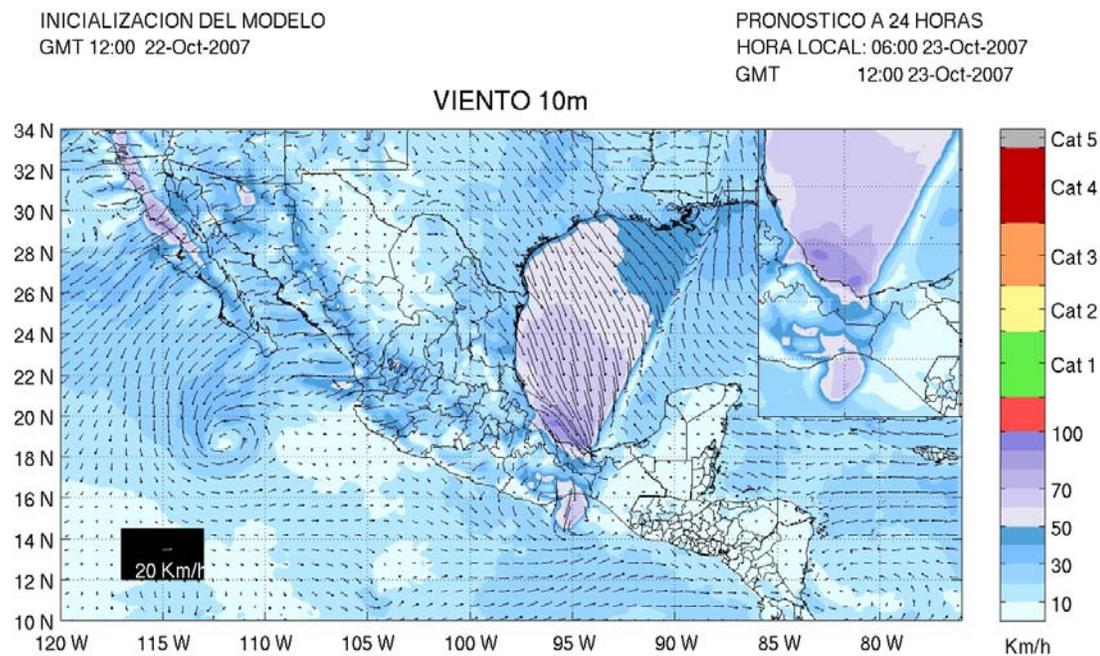


Figura 4.2. Pronóstico a 24 horas de la rapidez y dirección del viento a 10 m con el modelo WRF (WRF-22-10-2007-12Z).

Siguiendo el objetivo de catalogar la magnitud del evento, es importante citar la literatura referente a estos fenómenos atmosféricos. La intrusión de los sistemas de alta presión en el Golfo de México, cuyos vientos asociados se conocen comúnmente como *nortes*, ha sido estudiada desde hace tiempo. De acuerdo con DiMego et al. (1976) y Schultz et al. (1997), los sistemas de alta presión que atraviesan el Golfo de México se caracterizan por provocar un marcado descenso de temperatura, aumento en la PRNM y fuertes vientos provenientes del norte. Es claro entonces que, para catalogar la intensidad de los vientos asociados al sistema de alta presión en cuestión, es necesaria una base de datos que, además de rescatar las características esenciales de estos fenómenos, cubra un periodo de tiempo amplio que permita identificar la frecuencia de los nortes y la de eventos similares en ese intervalo de tiempo. Considerando las razones anteriores, se decidió utilizar la base de datos del NCEPR2 (descrita en la sección 2.2), la cual cubre el periodo 1979-2007 de manera continua y cuenta con una resolución espacial y temporal que permite rescatar las condiciones meteorológicas de mesoescala asociadas a estos sistemas atmosféricos. Para acotar el fenómeno de estudio y hacer uso de los reanálisis, se definió un *norte* como aquél evento caracterizado por tener una presión reducida al nivel del mar (PRNM) mayor a 1020 hPa en el punto con coordenadas 30°N y 100°W, que simultáneamente tenga vientos asociados con una magnitud superior a 12 m/s en el punto 20°N y 93.75°W, y que ocurra entre los meses de Septiembre a Abril (ver figura 4.3). La selección de estos puntos geográficos (que coinciden con puntos de la malla NCEPR2) está sustentada en las siguientes razones: el primer punto, localizado al noroeste del Golfo de México sobre la región continental de E.U., está ubicado sobre la trayectoria que comúnmente siguen los centros de los sistemas de alta presión provenientes de altas latitudes y que afectan al Golfo de México; el segundo, está localizado en la parte sur del Golfo de México, lugar que se ve afectado generalmente por los vientos intensos asociados a los sistemas de alta presión que penetran hacia latitudes bajas.

En la figura 4.4 se muestra la rapidez del viento a 10 m de los datos del NCEPR2 cada 6 horas para el periodo 1979-2007, en el punto de coordenadas 20°N y 93.75°W. La ocurrencia de nortes de acuerdo con la definición que aquí se ha utilizado se indica con puntos rojos en la figura y las líneas horizontales acotan los eventos de *norte* que tuvieron una intensidad de vientos entre 12 y 20 m/s. Cabe mencionar que la rapidez máxima registrada para el evento de estudio en esta base de datos fue de 21.6 m/s. Cabe señalar que la rapidez máxima registrada en las boyas fue de 21.6 m/s (boya 42055), pero no se utilizó este valor como referencia debido a que la clasificación del *norte* está en función de la magnitud que los datos del NCEPR2 asocian al evento en las coordenadas del punto

arriba mencionado.

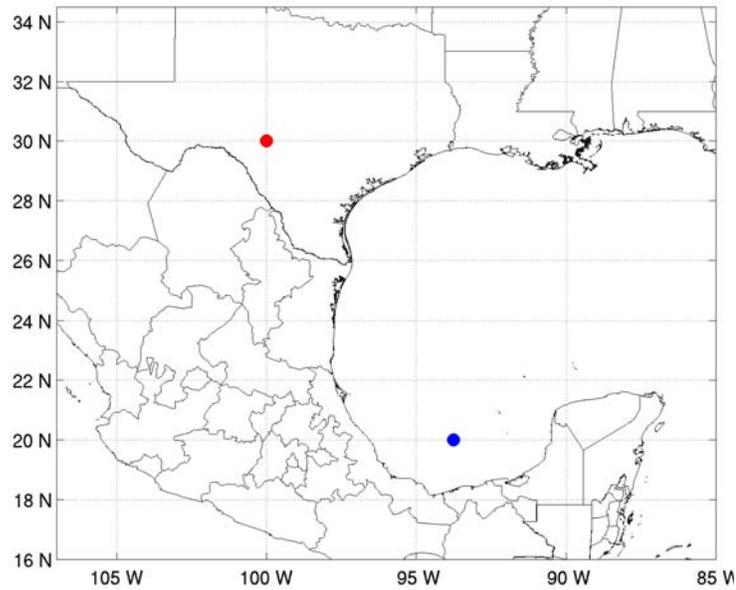


Figura 4.3. Puntos tomados como referencia para definir un *norte* (ver texto principal).

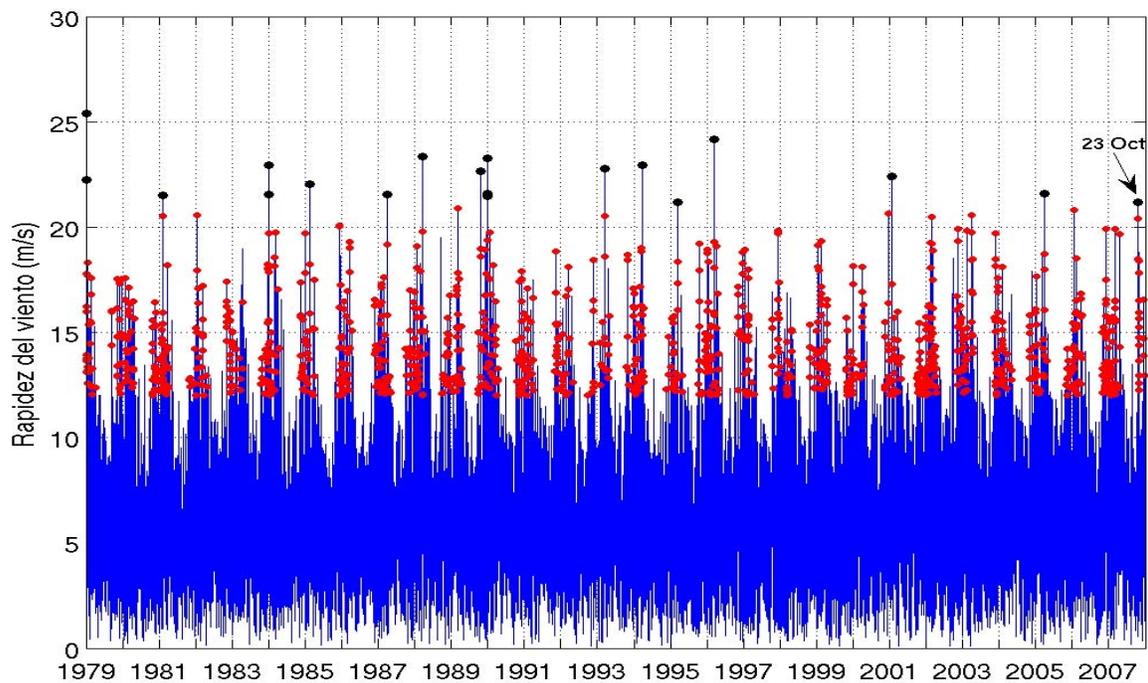


Figura 4.4. Rapidez del viento a 10 m cada 6 horas de los datos del NCEPR2 en el punto 20°N, 93.75°W para el periodo 1979-2007. Los puntos rojos indican la ocurrencia de eventos de *norte* de acuerdo con la definición utilizada en este trabajo y los puntos negros eventos con una intensidad similar a la del día 23 de octubre. Las líneas horizontales indican intensidades de viento entre 12 y 20 m/s.

Claramente se observa que existe un gran número de eventos de norte todos los años (puntos rojos), pero son pocos los eventos que alcanzan una rapidez similar al caso de estudio, el cual está señalado en la parte superior derecha de la gráfica. En la figura 4.5 se muestra el histograma de frecuencias correspondiente a los datos de la figura 4.4. De acuerdo con las clases en las que se dividió la rapidez del viento, se encontró que la magnitud de los nortes que ocurren con mayor frecuencia, alrededor del 36% de ellos, se encuentra en el intervalo de 13 a 15 m/s, mientras que aquellos eventos con una intensidad superior a los 21.2 m/s, como el ocurrido el 23 de Octubre del 2007, representan aproximadamente el 1.5% del total. Se encontró además que el evento de norte más intenso en la serie alcanzó una magnitud de 25.4 m/s y ocurrió a principios de enero de 1979.

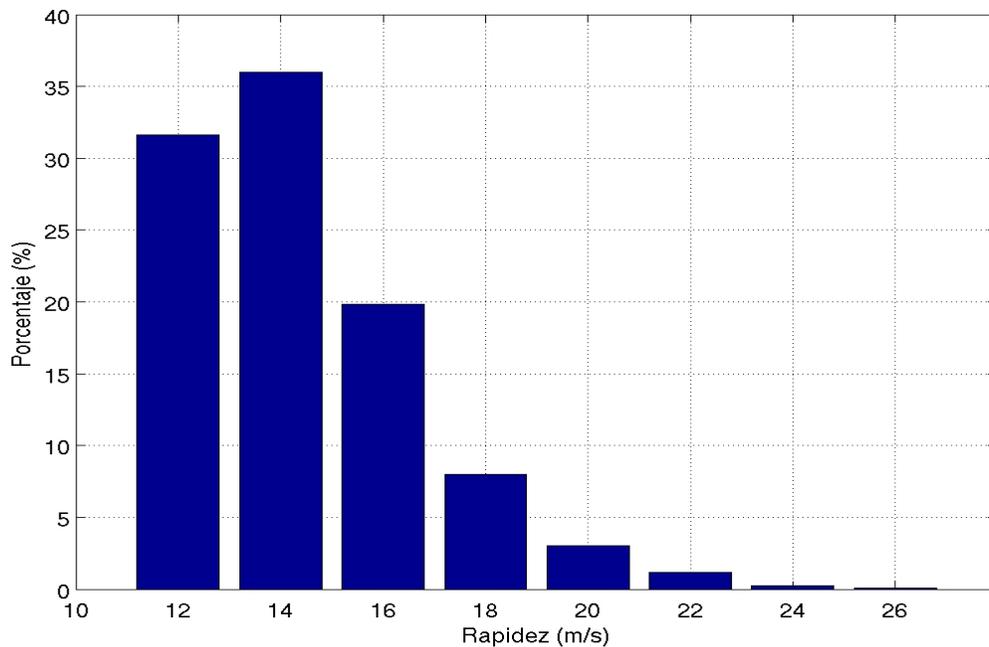


Figura 4.5. Distribución de frecuencias, como porcentaje de ocurrencia, de la rapidez del viento en los eventos de norte para el periodo 1979-2007 a partir de los datos del NCEPR2.

Considerando estos resultados y la definición que adopta el IPCC, el caso de estudio puede ser catalogado como un *evento extremo*, debido a que la magnitud de los vientos se encuentra dentro del 10% de los nortes más intensos dentro del periodo 1979-2007. Finalmente, es importante mencionar que el evento no está necesariamente ligado al cambio climático de origen antropogénico, ya que para llegar a tal conclusión son necesarios más estudios.

Una vez caracterizada la magnitud del evento, a continuación se describe la manera en que el modelo reproduce la dirección e intensidad de los vientos, comparándolos con las observaciones de las boyas del NDBC.

Los datos de la rapidez del viento de las boyas del NDBC en el Golfo de México (Fig. 4.6) muestran que la entrada del frente frío se registró en las últimas horas del día 22 y primeras horas del día 23 de octubre en las boyas 42002 y 42055, las cuales se localizan en la parte oeste del Golfo (ver figura 2.4). En la boya 42001 la entrada del frente se registró aproximadamente 12 horas después debido a que se ubica más al este con respecto a las otras boyas.

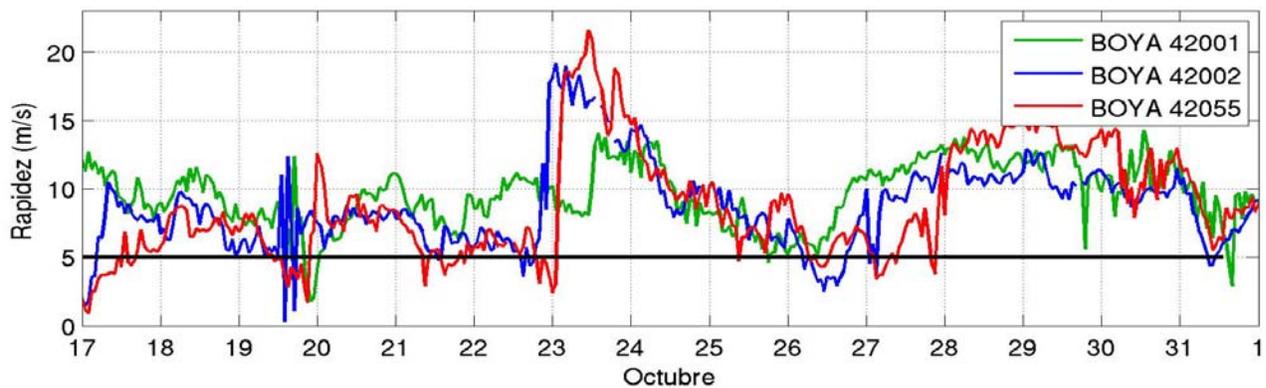


Figura 4.6. Observaciones horarias de la rapidez del viento a 10 m en las boyas del NDBC del 17 al 31 de octubre del 2007.

En la figura 4.7 se comparan los vectores del viento a 10 m obtenidos con el modelo con las observaciones de las boyas del 17 al 31 de octubre. Para los vientos modelados se seleccionaron las primeras 24 horas de cada simulación numérica. La figura muestra que la magnitud del viento es bien reproducida por el modelo, para complementar la estimación la Tabla 4.1 reúne los valores de correlación compleja (definida en la sección 2.3.1), en donde se observa que para las tres boyas la correlación es superior a 0.90 y sus ángulos de fase son menores a 5° , sustentando la idea de que el modelo logra una buena estimación de la dirección y magnitud del vector de viento a 10 m.

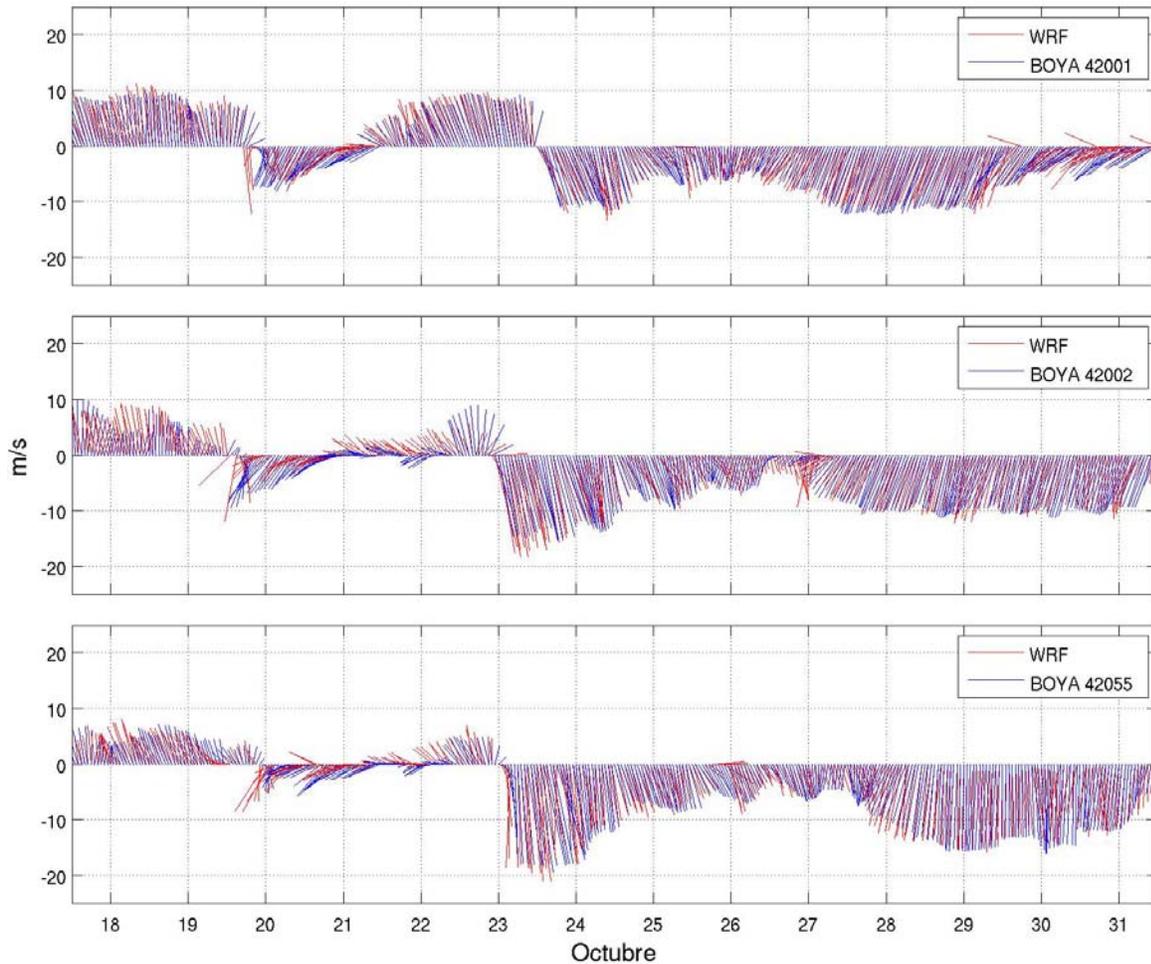


Figura 4.7. Comparación entre los vectores de viento a 10 m obtenidos con el modelo WRF en los puntos interpolados en las coordenadas de las boyas (rojo) y las observaciones en las boyas del NDBC ubicadas en el Golfo de México (azul), del 17 al 31 de octubre del 2007.

Tablas 4.1. Correlación compleja entre el vector de viento observado a 10 m de las boyas del NDBC y el estimado con el modelo WRF.

WRF vs	Coficiente de correlación (ρ)	Magnitud de ρ	Ángulo de fase (grados)
42001	$0.958-0.016 i$	0.96	0.96
42002	$0.917-0.082 i$	0.92	4.72
42055	$0.955+0.019 i$	0.96	1.08

Además del análisis del vector de viento, se obtuvo la correlación lineal para la rapidez entre ambas series de datos (Fig. 4.8). Los resultados muestran correlaciones de 0.79, 0.75 y 0.90 para las boyas 42001, 42002 y 42055 respectivamente, mostrando que las series obtenidas con el modelo recuperan el patrón general de la variabilidad que se observa en los registros de las boyas.

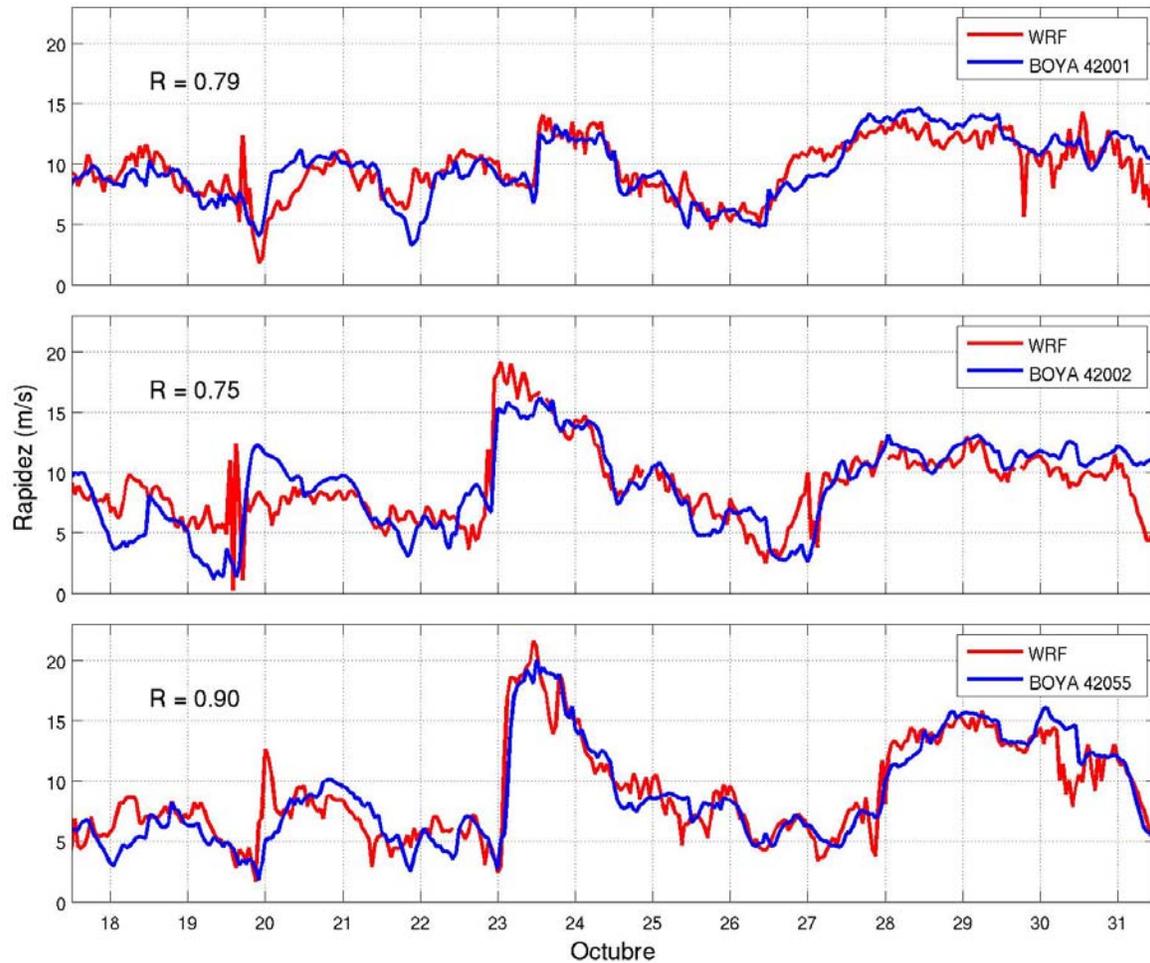


Figura 4.8. Correlación lineal entre los datos horarios de la rapidez del viento observado a 10 m en las boyas del NDBC y los obtenidos con el modelo del 17 al 31 de octubre. Los datos de las boyas se ilustran en color azul y en rojo los del modelo.

Los resultados mostrados en esta sección indican que las simulaciones con el modelo WRF reprodujeron, con un alto grado de precisión, la dirección e intensidad de los vientos extremos ocurridos los días 22 y 23 de octubre sobre el Golfo de México.

4.3 Análisis de la precipitación

En la actualidad uno de los temas de investigación de gran interés y dificultad es el relacionado con la simulación de la precipitación utilizando modelos numéricos atmosféricos, siendo aún más complicado tratar de simular los eventos extremos. La dificultad radica en representar los procesos de microescala que dan origen a la precipitación, es por ello que existen grupos dentro de la comunidad científica dedicados, exclusivamente, a desarrollar esquemas de parametrización cada

vez más eficientes para ser utilizados en los modelos. Sin profundizar en la estructura de un esquema de parametrización en particular, la búsqueda de una mejor representación de esta variable y el continuo desarrollo de estos esquemas va acompañado de una constante evaluación para mostrar los avances y las deficiencias de estas parametrizaciones. Es importante mencionar que el modelo que aquí se utiliza contempla varios esquemas de parametrización que dan distintos tratamientos a los procesos físicos que originan la precipitación, dejando al usuario la decisión de elegir el más adecuado para su propósito. En este trabajo se ha empleado el esquema Kain Fritsch, el cual ha tenido numerosas modificaciones en la última década como resultado de la retroalimentación entre los usuarios, tanto de modeladores numéricos como pronosticadores operativos (Kain, 2004), además de que ha sido evaluado en varios casos de estudio (Kusaka et al., 2005). Por último, cabe recordar que la elección de este esquema, junto con la configuración general especificada para el WRF, se hizo con el objetivo de que pudiera funcionar como un sistema de pronóstico numérico operativo para México, ya que no implica grandes costos computacionales, lo cual agrega valor a los resultados que se muestran al final del análisis.

A continuación se analizan las bondades y limitaciones del modelo para reproducir las intensas precipitaciones del 22 de octubre al 2 de noviembre, complementando la información, como en el caso de los vientos, con diversas fuentes de datos que sustentan los resultados.

4.3.1 Registros in situ

La figura 4.9 muestra la precipitación acumulada cada 24 horas de las estaciones de la GASIR, del 20 de octubre al 5 de noviembre. Los acumulados han sido agrupados de manera que el acumulado de un día comprende las precipitaciones del día en cuestión a partir de las 12Z hasta el siguiente día a la misma hora, con el fin de que correspondan en tiempo con las salidas del modelo, el cual es iniciado a las 12Z en todas las simulaciones numéricas. Se observa que los días 20 y 21 de octubre varias de las estaciones registraron precipitaciones menores a 30 mm que estuvieron asociadas a inestabilidades atmosféricas provocadas por una vaguada que se extendía paralela a la costa del Golfo de México desde Veracruz hasta Tabasco. En los registros de los días siguientes se aprecian dos periodos de precipitación intensa.

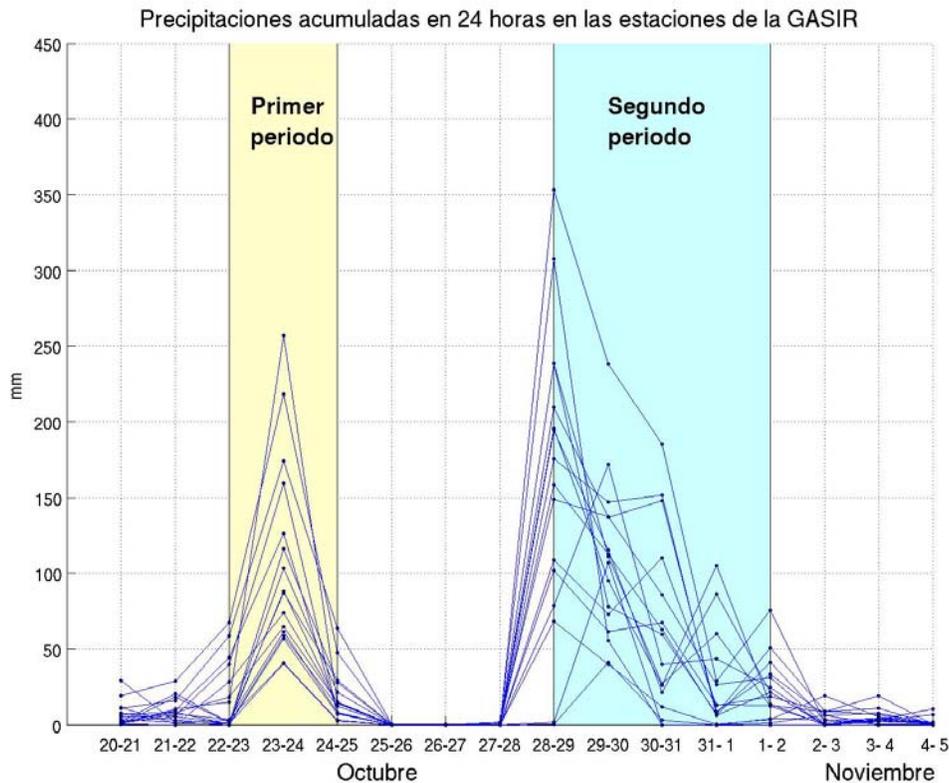


Figura 4.9. Precipitaciones diarias acumuladas en las estaciones de la GASIR del 20 de octubre al 5 de noviembre del 2007. Se observan dos periodos de precipitación intensa, el primero del 22 al 25 de octubre y el segundo del 28 de octubre al 2 de noviembre.

Como se mencionó anteriormente, los datos observados se adaptaron a los tiempos de las simulaciones numéricas, de esta manera para el primer periodo de precipitación intensa se consideró el acumulado de los días 22 de octubre a las 12Z al 25 de octubre a las 12Z. De acuerdo con los datos de la Tabla 4.2, en este periodo las precipitaciones más intensas se registraron en tres estaciones ubicadas en el estado de Chiapas: 333.7 mm en Sayula, 296.7 mm en Ocoatepec y 286.2mm en San Joaquín. Para el segundo periodo, la tabla muestra el acumulado de los días 28 de octubre a las 12Z al 2 de noviembre a la misma hora. En este caso, las precipitaciones máximas alcanzaron una lámina de 881 mm en Ocoatepec, Chis., 535.8 mm en Teapa, Tab., y 521.2 mm en Puyacatengo, Tab. El valor de precipitación acumulada en Ocoatepec difiere del reportado por el SMN (ver sección 1.1) debido a que el periodo de tiempo considerado para calcular la precipitación acumulada por el SMN es del 26 al 31 de octubre, y en este trabajo se calcula para el periodo del 28 al 2 de noviembre. De acuerdo con la climatología de la zona de estudio descrita en la sección 1.3, la máxima lámina de precipitación acumulada para el mes de octubre corresponde al estado de Tabasco, con un valor de 346 mm, mientras que para el estado de Chiapas, segunda más grande

después de Tabasco, tiene un valor de 230 mm. Es interesante mencionarlas por el hecho de que en el primer periodo de lluvias hay dos estaciones con registros que rebasan la lámina mensual de Chiapas (Sayula y Ocoatepec), mientras que para el segundo caso 11 de las 16 estaciones sobrepasan la de Tabasco, dando una idea de lo extremas que fueron las precipitaciones.

Tabla 4.2. Precipitaciones acumuladas (mm) en las estaciones de la GASIR para los dos periodos de precipitación intensa y el total de ambos eventos. Los valores en rojo indican que se sobrepasó la máxima lámina acumulada mensual para el mes de octubre (346 mm).

No	Estación	1er periodo	2do periodo	Total	No	Estación	1er periodo	2do periodo	Total
1	Boca del Cerro	144.40	48.30	192.70	9	Puyacatengo	177.80	521.20	699.00
2	E. Zapata	116.90	110.10	227.00	10	Reforma	126.20	439.00	565.20
3	Gaviotas	72.60	323.00	395.60	11	Salto de Agua	47.20	123.40	170.60
4	González	43.40	358.60	402.00	12	Samaria	71.80	449.20	521.00
5	Ocoatepec	296.70	881.00	1177.70	13	San Joaquín	286.20	429.40	715.60
6	Platanar	118.00	435.20	553.20	14	Sayula	333.70	363.10	696.80
7	Porvenir	63.80	256.80	320.60	15	Tapijulapa	97.80	434.00	531.80
8	Pueblo Nuevo	102.40	361.00	463.40	16	Teapa	206.40	535.80	742.20

En las siguientes secciones se analizan estos periodos de precipitación por separado. Primeramente se utilizan los análisis finales del NCEP (denotados como FNL en las figuras), para evaluar la manera en que el modelo reproduce las condiciones meteorológicas que originaron las precipitaciones, y posteriormente se realiza una descripción cuantitativa de cada uno de los periodos.

4.3.2 Análisis del primer periodo de lluvias

Para el caso del primer periodo de precipitaciones intensas, la simulación numérica del día 22 de octubre a las 12Z es el principal punto de comparación contra los análisis finales del NCEP. En el análisis final correspondiente al día 23 de octubre a las 12Z (Fig. 4.10a), se aprecia que en el nivel de 850 hPa persiste un gran contenido de humedad a lo largo de la línea frontal que cruza el Golfo de México de noreste a suroeste, notándose que los vientos del norte y noroeste asociados a este sistema están dirigidos hacia los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas.

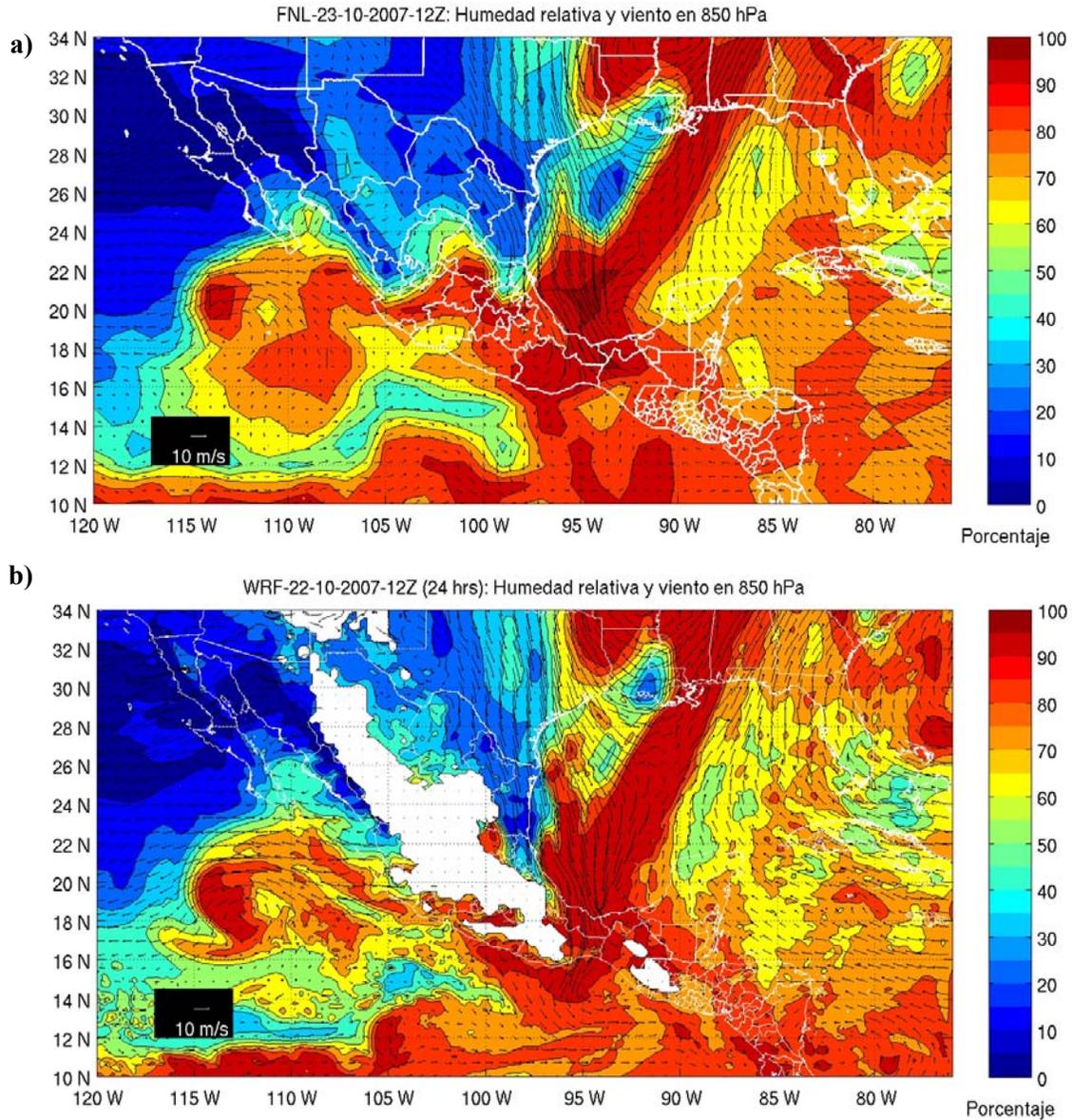


Figura 4.10. Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-23-10-2007-12Z. (b) WRF-22-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas.

En cuanto al modelo, el pronóstico a 24 horas (Fig. 4.10b), reproduce el área de máxima humedad relativa sobre la línea frontal y el flujo de vientos del norte y noreste sobre el Golfo de México. La figura 4.10a muestra también una pequeña circulación ciclónica en el sur del Golfo, localizada alrededor de 93°W y 20°N, que está asociada a una baja presión y a una zona de vorticidad positiva máxima (Fig. 4.11). Por su parte, el modelo no reproduce esta circulación por lo que subestima los procesos de convección asociados con en ese sistema.

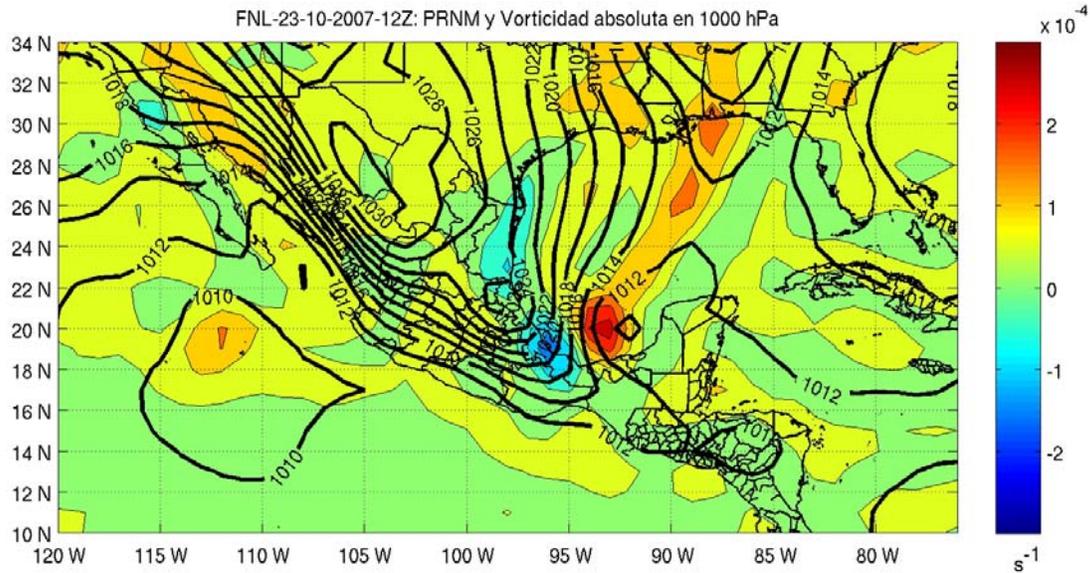


Figura 4.11. Presión reducida al nivel del mar (hPa) y vorticidad absoluta (s^{-1}) en 1000 hPa. FNL-23-10-2007-12Z.

De manera general, las condiciones meteorológicas muestran que el choque entre las masas de distinta densidad provocó una zona de fuerte convección que puede observarse en la imagen satelital infrarroja de la figura 4.12. Aunque el modelo no reproduce la circulación ciclónica observada en el sur del Golfo, se observa que el modelo representa bien las zonas con gran contenido de humedad tanto en las áreas oceánicas como en las terrestres.

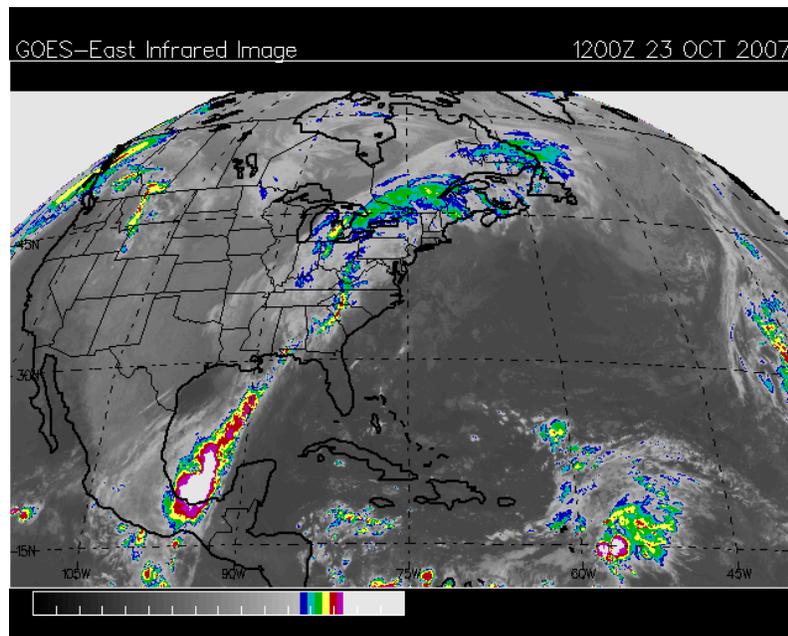


Figura 4.12. Imagen satelital infrarroja del 23-10-2007-12Z. Se observa un área de fuerte convección sobre la Bahía de Campeche debido a la interacción entre el sistema de alta presión y el pequeño sistema de baja presión en la zona.

De acuerdo con la secuencia de los análisis del NCEP, el movimiento de la masa de aire frío hacia el este predominó sobre la circulación ciclónica, de manera que la zona de convección y el alto contenido de humedad localizado en la zona frontal se desplazaron sobre los estados de Tabasco y Chiapas (Fig. 4.13a), propiciando las lluvias extremas del primer periodo. En su pronóstico a 48 horas el modelo muestra que toda el área del Istmo tiene un gran contenido de humedad, factor determinante para el origen de la precipitación en esa área (Fig. 4.13b).

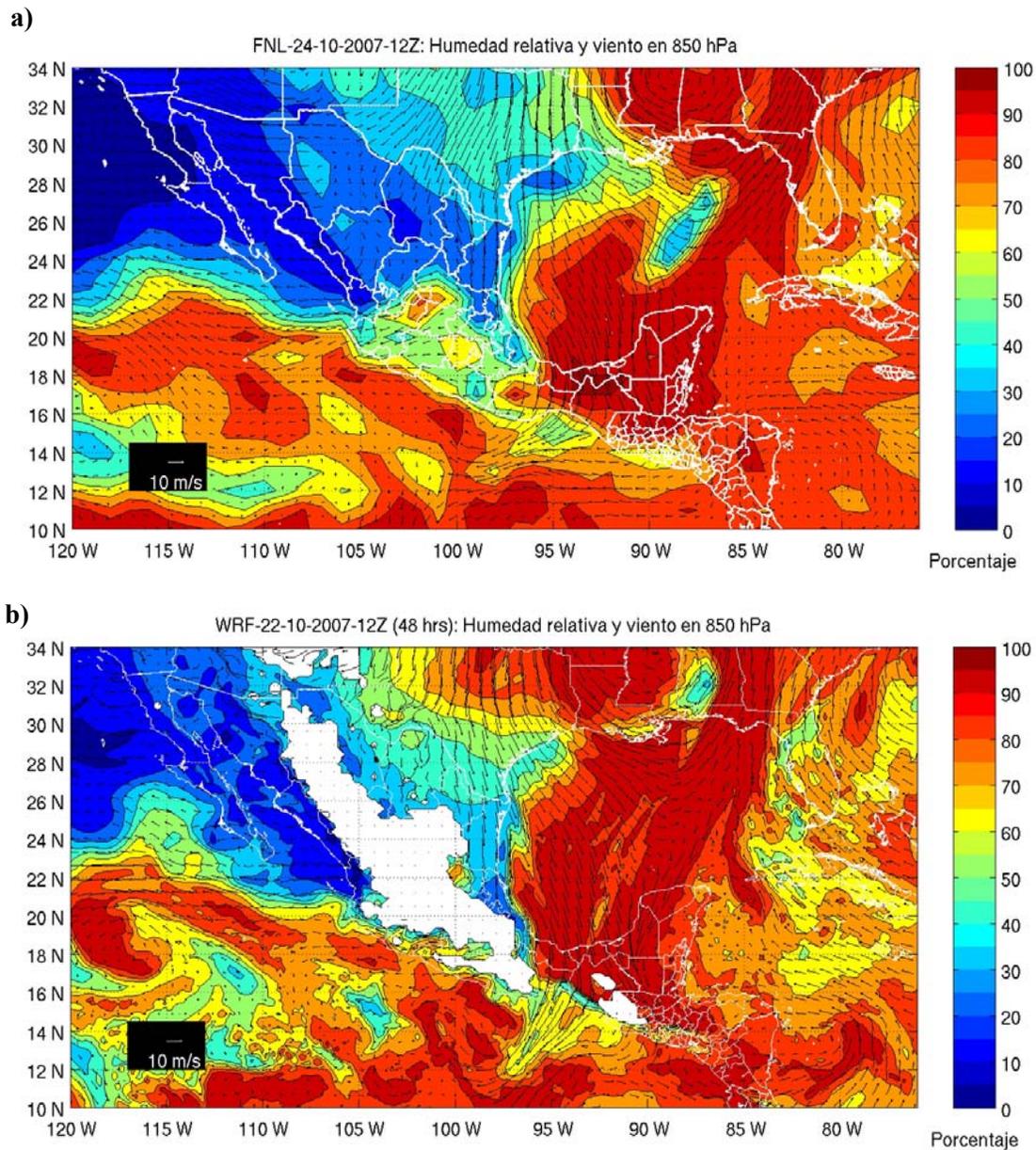


Figura 4.13. Humedad relativa y viento en 850 hPa. a) FNL-24-10-2007-12Z. b) WRF: 22-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas.

Para analizar la estructura vertical de la atmósfera, se realizó un corte zonal de humedad relativa en 17.43°N, que es la latitud a la cual se ubica Sayula, Chis., en donde se registró la máxima precipitación acumulada en el primer periodo. En la figura 4.14 se compara el análisis del NCEP correspondiente al día 22 de octubre a las 12Z (Fig. 4.14a), con las condiciones iniciales del modelo para la misma fecha (Fig. 4.14b). Dado que los análisis finales del NCEP contienen un número mayor de observaciones en comparación con los análisis disponibles en tiempo real, los primeros representan mejor las condiciones atmosféricas.

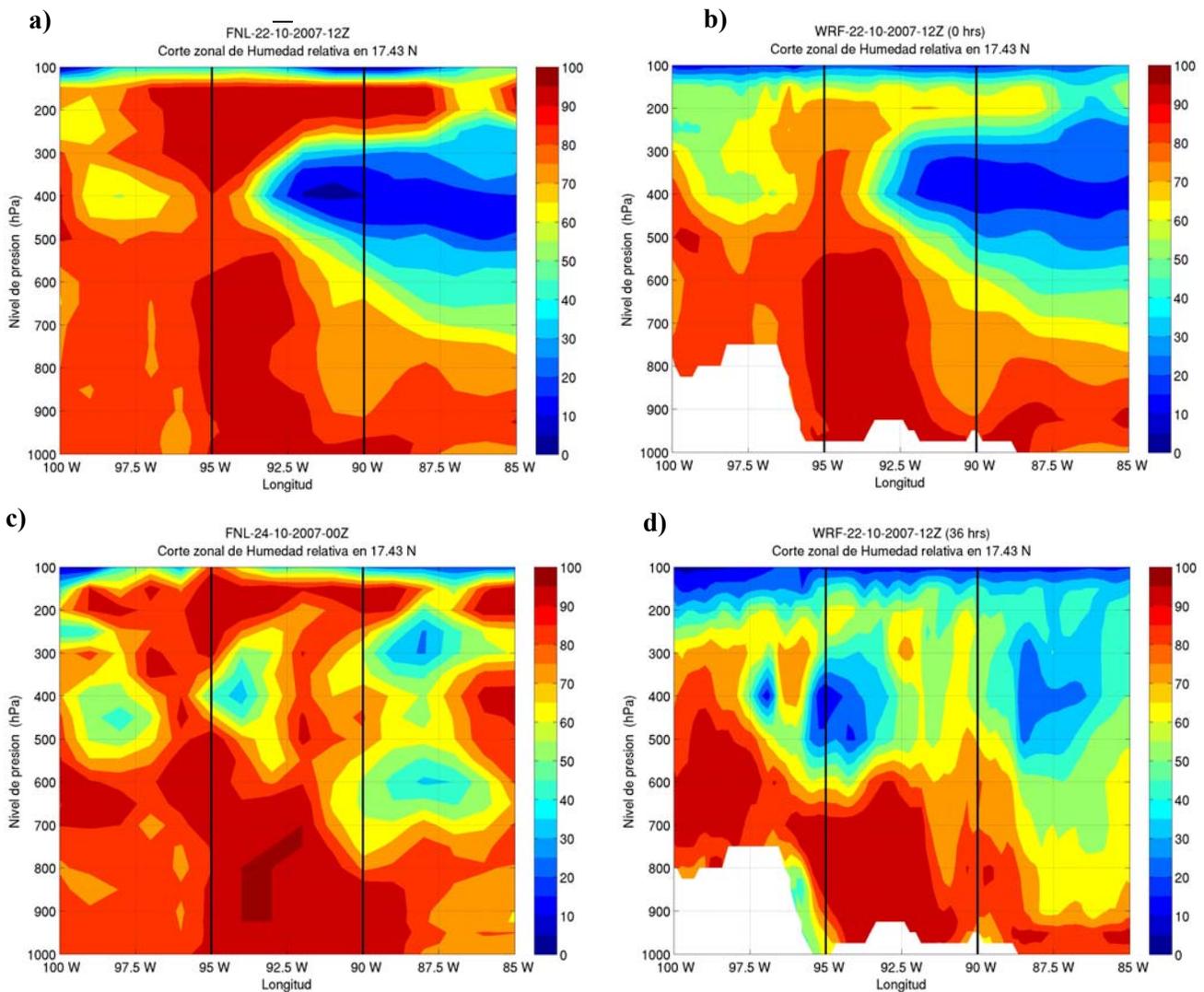


Figura 4.14. Cortes zonales de humedad relativa en 17.43 °N (latitud de Sayula, Chiapas). a) FNL-22-10-2007-12Z; b) WRF-22-10-2007-12Z, condiciones iniciales; c) FNL-24-10-2007-00Z; d) WRF 23-10-2007-12Z, pronóstico a 36 horas. Las líneas negras indican el rango de longitud en donde se localizan las estaciones de la GASIR.

En el rango de longitudes en donde se ubican las estaciones de la GASIR (limitado por las líneas negras verticales en la figura 4.14), se observa que las condiciones iniciales del modelo coinciden con el alto contenido de humedad por debajo de los 500 hPa, en donde se aprecia una reducción en el contenido de humedad. Sin embargo, por arriba de los 300 hPa el modelo subestima el contenido de humedad, lo cual puede deberse a que los datos agregados en los análisis finales contemplan más observaciones en la altura y complementan la estructura vertical. De acuerdo con el desplazamiento de la zona con máxima humedad discutido anteriormente, el análisis del NCEP del día 24 de octubre a las 00Z (Fig. 4.14c) muestra el máximo contenido de humedad hacia el oeste, coincidiendo con la región donde se ubican los máximos registros de precipitación acumulada, mientras que el pronóstico a 36 horas del modelo (Fig. 4.14d), equivalente a la fecha del análisis del NCEP, reproduce de manera satisfactoria la humedad hasta los 600 hPa.

El análisis de vientos de la sección 4.2 y las comparaciones anteriores, indican que el modelo reproduce bien el paso del frente frío por el Golfo de México así el campo de humedad asociada a la presencia de este sistema, rescatando los elementos más significativos para determinar el origen de las precipitaciones en el primer periodo, por lo que ahora se examinarán los efectos de esta dinámica en la precipitación. Como en el caso de los vientos, intentar evaluar la precipitación de los modelos numéricos requiere de una base de datos lo suficientemente robusta como para describir la variabilidad espacial y temporal de este parámetro. Desafortunadamente, los datos de precipitación que se han recolectado son pocos y dispersos como para utilizar un sistema complejo de verificación del modelo, no obstante, las observaciones registradas pueden adquirir gran importancia si son utilizadas de manera cautelosa, reconociendo las limitaciones al inferir conclusiones con la metodología utilizada. Para el caso de estudio, el análisis está basado principalmente en comparar la precipitación simulada con el modelo y la estimada por el satélite TRMM contra las observaciones, incluyendo algunos estadísticos al final de la sección.

En la figura 4.15a se muestra la precipitación acumulada en 72 horas, el pronóstico muestra lluvias importantes sobre la región oceánica, más precisamente en el sur del Golfo de México, mientras que en las zonas terrestres se observan valores grandes de precipitación acumulada sobre la parte norte del Istmo de Tehuantepec, con dos zonas de máxima precipitación: una en la parte norte del estado de Chiapas y otra al oeste de Tabasco. Estos máximos indican precipitaciones acumuladas mayores a 100 mm. En la figura 4.15b se muestra el campo de precipitación estimada por el TRMM considerando el mismo intervalo de tiempo. Con una distribución similar a la del modelo, se observa

un área con altos valores de precipitación acumulada sobre la parte oceánica; sin embargo, en la parte continental se registra un máximo en el noreste de Chiapas de aproximadamente 50 mm, lo cual muestra que el modelo duplica la precipitación estimada por el satélite.

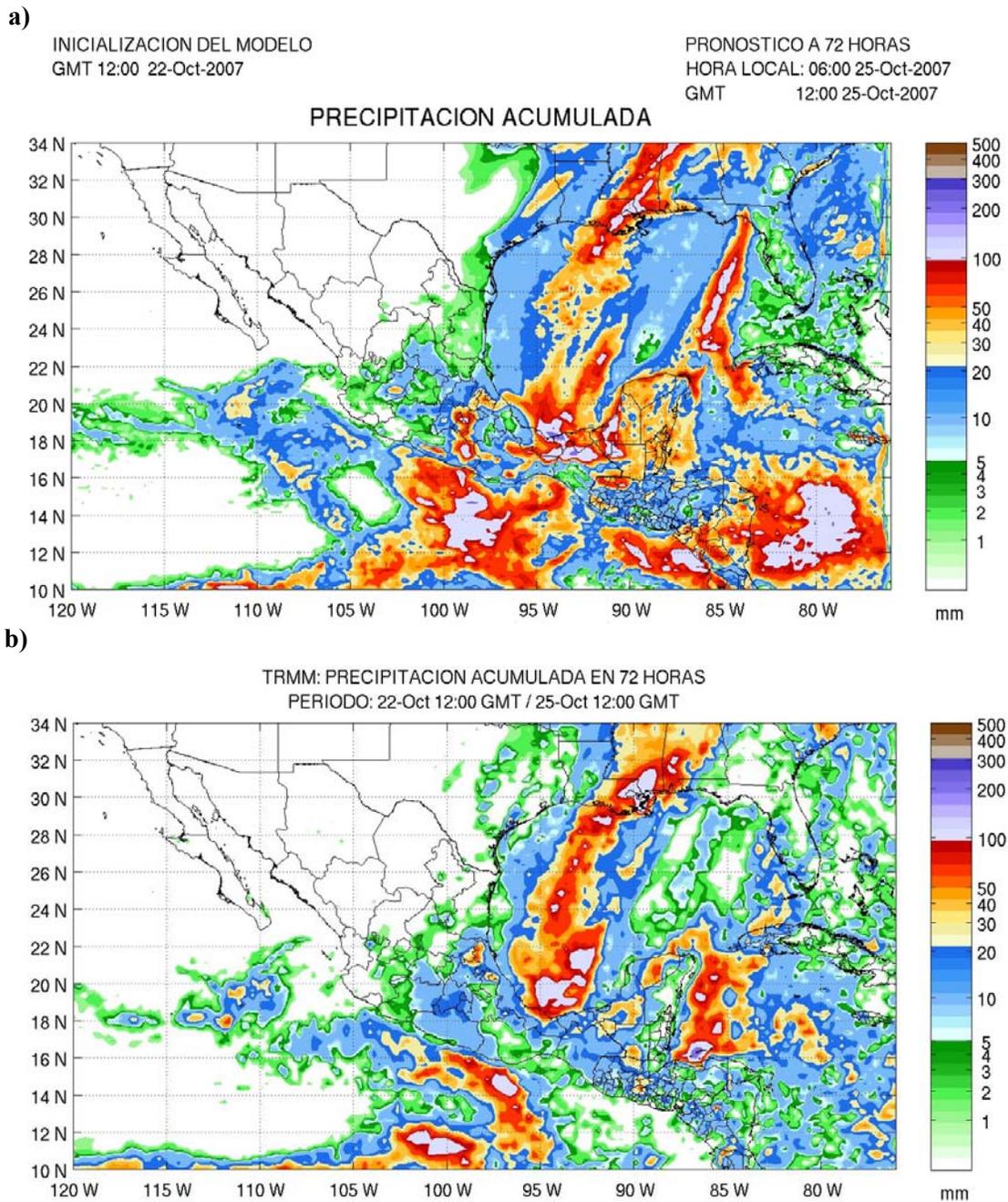


Figura 4.15. a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir de 22-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z.

En la figura 4.16 se muestra un acercamiento a la región de estudio, se ha graficado la precipitación acumulada de cada una de las estaciones así como la que corresponde a cada elemento de la malla del modelo WRF (Fig. 4.16a) y del TRMM (Fig. 4.16b) sobre la zona de estudio, además se ha superpuesto la topografía (Cabe aclarar que las precipitaciones de las estaciones 10, 6, 16, 14, 13, 5, 1 y 2 están en el rango de 100 mm a 300 mm, por la impresión puede confundirse con el rango que va de 5 a 20 mm).

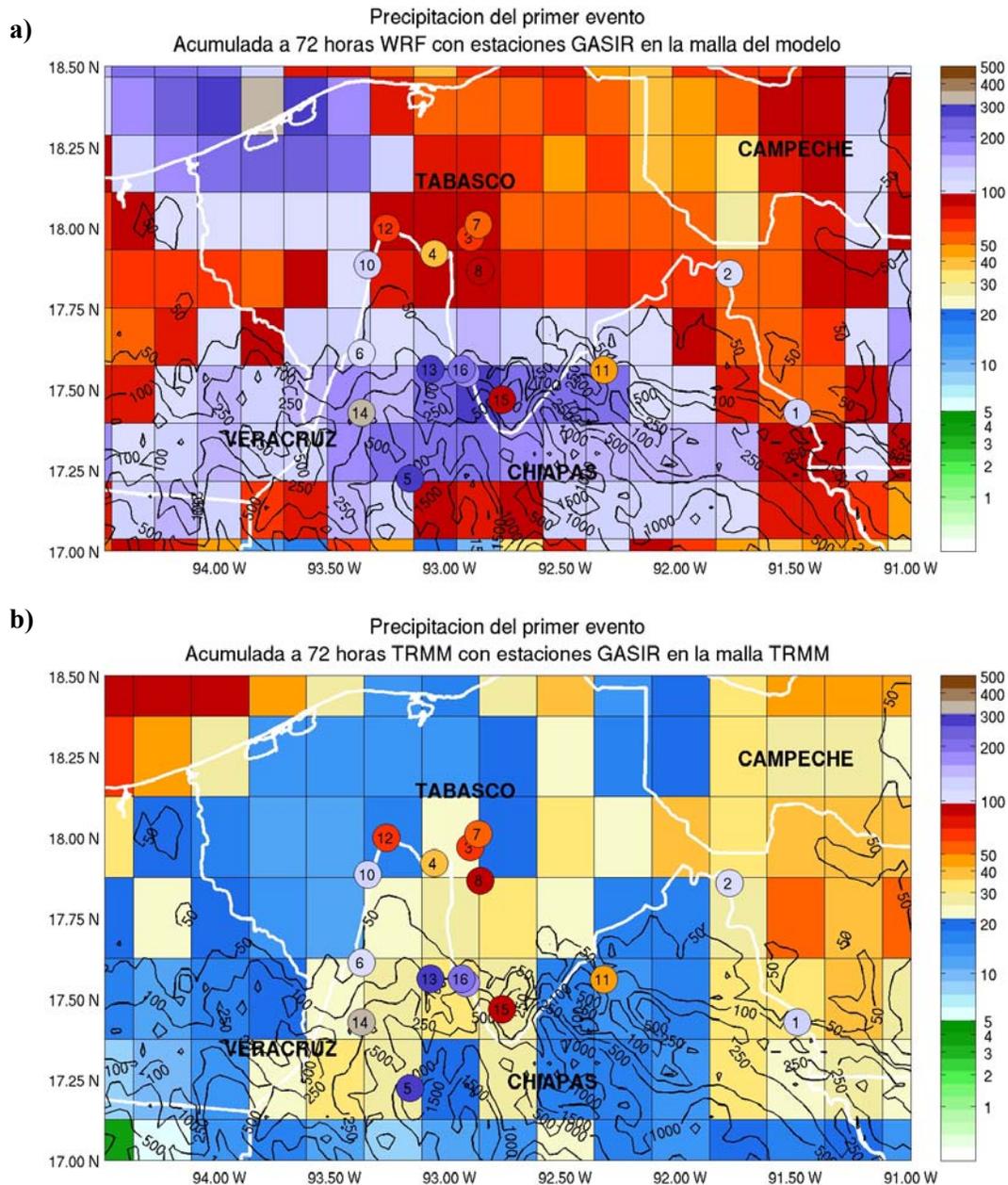


Figura 4.16. a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir del 22-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z. En ambos casos se muestran las observaciones registradas identificando las estaciones de acuerdo con la Tabla 2.2.

Se observa que los datos TRMM (Fig. 4.16b) indican valores de precipitación acumulada menores a 50 mm en toda el área de Chiapas y Tabasco, existiendo un máximo alrededor de los 18.5°N sobre la región oceánica. En la parte continental, considerando las zonas que cuentan con registros de estaciones, se nota un área con máxima precipitación que va de 92.50°W a 93.50°W y de 17.25°N a 18.00°N, con una precipitación acumulada menor a 50 mm (como se mencionó anteriormente), este resultado difiere de los registros de las estaciones ya que 10 de ellas superan los 100 mm (Tabla 4.2). De acuerdo con los datos de la ubicación de las estaciones, el rango de altitud en que se encuentran estas va de 7 a 62 msnm, con excepción de Sayula (estación 14) que tiene una altitud de 133 msnm y Ocoatepec (estación 5) que se sitúa a 1400 msnm (de aquí en adelante estas dos estaciones son referidas como altas). Coincide entonces que la precipitación es mayor en los puntos mas altos, lo cual es debido a que la humedad contenida en la zona frontal, trasladada hacia esa zona por el avance del frente, tiene un gran potencial de producir precipitación al condensarse mientras asciende por las laderas montañosas. El análisis anterior permite observar que el TRMM subestimó la precipitación acumulada en la mayoría de las estaciones, en aproximadamente un 50% y hasta en un 100% en las estaciones altas.

Para el caso de los resultados sobre la malla del modelo WRF (Fig. 4.16a), es claro que la precipitación acumulada es mayor que la estimada por el TRMM. De manera general se aprecia que en toda el área la precipitación acumulada es mayor a los 50 mm que estimó el TRMM, con un máximo en la zona oceánica que se extiende en forma diagonal hacia la región oeste de Tabasco y norte de Chiapas. El área de máxima precipitación en la región que cuenta con registros de estaciones está limitada de 92.00°W a 93.75°W y de 17.25°N a 17.75°N, indicando valores de hasta 300 mm sobre el área de las estaciones más altas, similares a las mediciones in situ y mostrando que el modelo reprodujo una buena distribución espacial de la precipitación durante este periodo. Los acumulados para el grupo de estaciones que se encuentran en las zonas a menor altitud sobre el nivel del mar (10, 12, 4, 3, 7 y 8) muestran registros cercanos a los 100 mm, mientras que el modelo indica acumulados con una magnitud similar. También es interesante el hecho de que la estación ubicada más al oeste de ese grupo registra más de 100 mm (estación 10), sobresaliendo de las que están a hacia el este, mientras que el correspondiente punto de malla el modelo indica un valor muy similar, mostrando nuevamente, que el modelo obtuvo una buena distribución espacial de la precipitación, por lo menos para este caso de estudio.

Como conclusión preliminar, se encuentra que la precipitación que reprodujo el modelo tiene un mayor grado de aproximación que la estimada por el TRMM, para detallar aún más las diferencias entre ambos resultados se ha calculado el error cuadrático medio (RMSE) y el error promedio (BIAS), utilizando las diferencias entre el valor observado en la estación y el valor de la celda sobre la cual se encuentran las coordenadas de la estación, este procedimiento se aplica tanto a la malla del TRMM como a la del WRF.

Los estadísticos calculados para el primer evento se muestran en la tabla 4.3, recordando que las estaciones por abajo de 100 msnm se consideran como bajas y altas las que están por arriba de ese nivel. Se ha encontrado que tanto en las estaciones bajas como en las altas, el RMSE del TRMM es mayor que el del WRF (casi del doble). El BIAS indica que ambas estimaciones subestiman la precipitación acumulada, pero de la misma manera que sucede con el RMSE, es mucho mayor para las estimaciones del TRMM. Para el caso de las estaciones altas (estaciones con los máximos registros de precipitación), el RMSE y BIAS del TRMM tienen un valor de 291.5mm y -291.27mm respectivamente, y son equivalentes a una lámina mensual de precipitación para el mes de Octubre en Chiapas, dejando claro que para el primer periodo de lluvias el modelo ha hecho una buena reproducción de la precipitación, resultando mejor que la estimación del TRMM.

Tabla 4.3. Estadísticos asociados a la comparación de las precipitaciones estimadas por el TRMM y el WRF contra los registros de las estaciones de la GASIR durante el primer periodo de precipitaciones.

Estaciones	Estadísticos	TRMM	WRF
BAJAS	RMSE	112.57	72.60
	BIAS	-94.87	-20.35
ALTAS	RMSE	291.55	139.51
	BIAS	-291.27	-132.92

4.3.3 Análisis del segundo periodo de lluvias

De acuerdo con los datos mostrados en la figura 4.9, el segundo periodo de precipitaciones intensas comprende los registros del 28 de octubre al 2 de noviembre. Las mediciones indican que las precipitaciones fueron muy intensas en las primeras 24 horas de este periodo que disminuyeron en

los siguientes días, pero mostrando aún precipitaciones acumuladas superiores a 100 mm en 24 horas en algunas estaciones los días 31 de octubre y 1 de noviembre. Debido a que las simulaciones numéricas solo cubren un periodo de 72 horas, la precipitación acumulada para el análisis del segundo evento de precipitación estará acotada a las precipitaciones registradas del 28 al 31 de octubre (de aquí en adelante referidas como segundo periodo de precipitación), con el fin de que coincida el intervalo temporal de las mediciones y la simulación numérica. De esta manera, la simulación numérica que representa este intervalo de tiempo es la del día 28 de octubre. La Tabla 4.4 muestra el valor de precipitación acumulada de cada estación que será utilizado para el análisis del segundo periodo, así como el acumulado total y la diferencia entre ambos. Las diferencias son variables y en algunos casos superiores a 100 mm, pero se observa que son más grandes para los registros con mayor precipitación acumulada y más pequeñas para los registros con menor precipitación. Debido a que son pequeñas las diferencias entre los valores de precipitación acumulada del 28 al 31 de octubre y del 28 de octubre al 2 de noviembre, el valor de precipitación acumulada considerado para el análisis, es representativo de la precipitación del segundo periodo.

Tabla 4.4. Precipitaciones acumuladas en las estaciones de la GASIR del 28 al 31 de octubre, considerado como el segundo periodo para este análisis; y del 28 de octubre al 2 de noviembre, consideradas como el total del segundo evento de precipitación. Los valores en rojo indican que se sobrepasó la máxima lámina acumulada mensual del país para el mes de octubre (>346 mm).

No	Estación	2do periodo (Análisis)	2do Periodo (Total)	Dif.	No	Estación	2do periodo (Análisis)	2do Periodo (Total)	Dif.
1	Boca del Cerro	44.50	48.30	3.80	9	Puyacatengo	474.20	521.20	47.00
2	E. Zapata	109.00	110.10	1.10	10	Reforma	331.40	439.00	107.60
3	Gaviotas	291.90	323.00	31.10	11	Salto de Agua	119.80	123.40	3.60
4	González	290.20	358.60	68.40	12	Samaria	376.60	449.20	72.60
5	Ocoatepec	776.60	881.00	104.40	13	San Joaquín	371.80	429.40	57.60
6	Platanar	316.60	435.20	118.60	14	Sayula	363.10	363.10	0
7	Porvenir	230.80	256.80	26.00	15	Tapijulapa	376.00	434.00	58.00
8	Pueblo Nuevo	333.80	361.00	27.20	16	Teapa	494.20	535.80	41.60

Siguiendo la metodología utilizada en el análisis del primer periodo de lluvias, primeramente se analizarán las condiciones meteorológicas que dieron origen a las precipitaciones utilizando los análisis finales del NCEP y la simulación numérica. En la figura 4.17a se muestra el campo de vientos y de humedad relativa en 850 hPa del análisis final del día 25 de octubre a las 12Z, lo cual significa que son las condiciones meteorológicas previas al segundo periodo de precipitación.

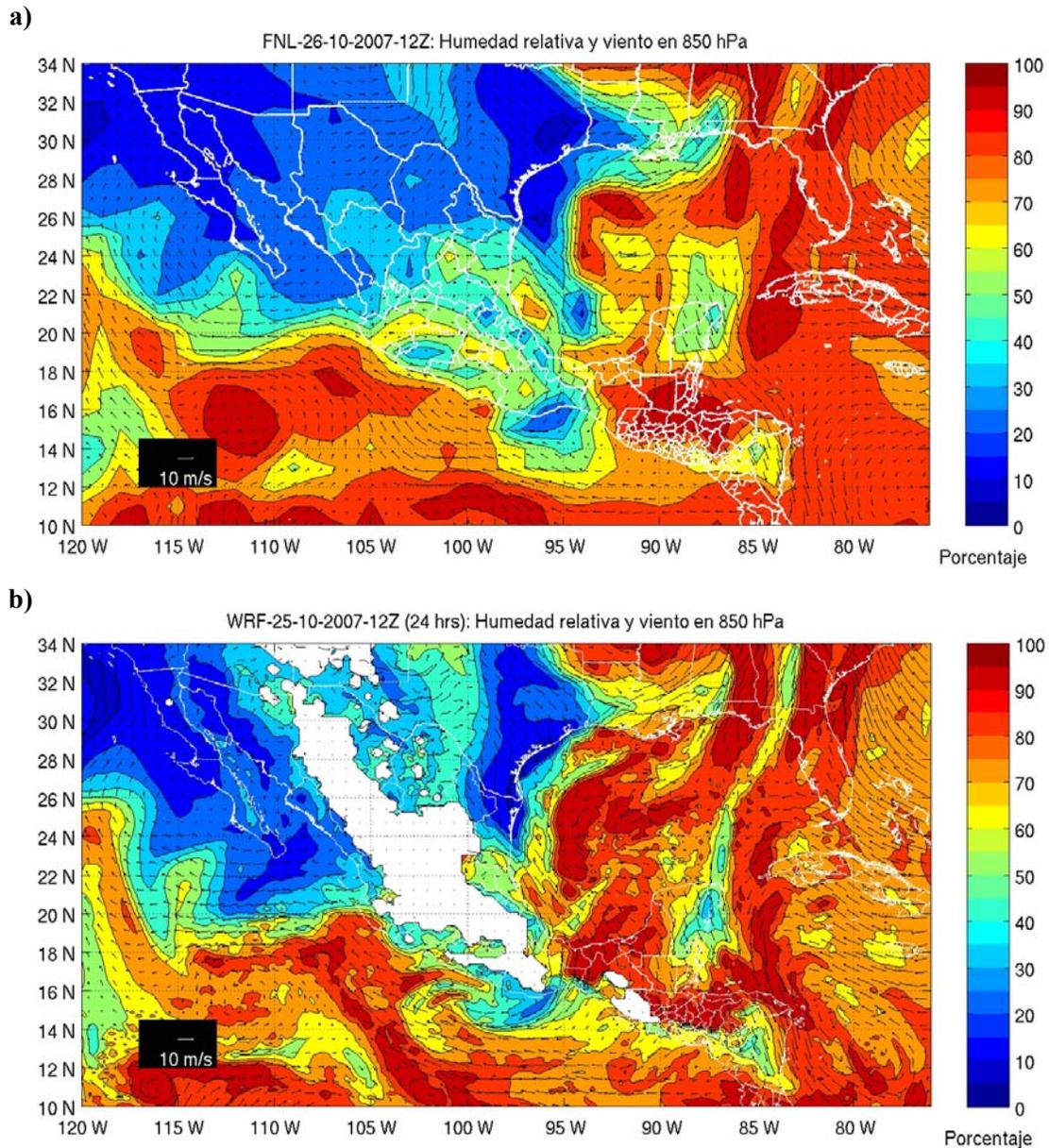


Figura 4.17. Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-26-10-2007-12Z. (b) WRF-25-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas.

La humedad asociada a la línea frontal se desplazó hacia el este ubicándose aproximadamente en 85°W de longitud, como se indicó en el análisis de superficie de la figura 1.5. Sobre la región de estudio, en la figura 4.17a, se observa que la humedad oscila entre 50% y 70% aunque al sureste de Chiapas alcanza valores superiores al 80%. Los vientos que afectan a los estados de Chiapas y Tabasco tienen una componente predominantemente del norte con intensidades menores a 10 m/s. En cuanto a los resultados numéricos (Fig. 4.17b) se observa que el modelo también tiene definida la línea frontal alrededor de 85°W pero sobrestima el contenido de humedad en el centro del Golfo de México y en los estados de Tabasco y Chiapas mostrando valores superiores al 80%, sin embargo, debido a que el sistema predominante es la subsidencia ocasionada por la alta presión no se generan precipitaciones. Por otro lado, se observa que los vientos sobre los estados de Tabasco y Chiapas son bien reproducidos por el modelo pues se muestran débiles y con una componente predominante del norte y noreste.

Como se mencionó en el análisis sinóptico del Capítulo 1, las condiciones meteorológicas de mesoescala que contribuyeron al origen de las precipitaciones del segundo periodo fueron:

- La entrada de un sistema de alta presión en el Golfo de México, distinto de aquel que estaba asociado al frente frío número 4 y que causó nuevamente una intensificación en los vientos dirigidos hacia el Istmo de Tehuantepec, con una componente predominante del norte y noreste (ver figuras 4.8 y 4.9).
- Una amplia zona de baja presión ubicada al este del Golfo de México que indujo un flujo de vientos desde Florida hasta el Istmo.
- Por último, una zona con gran contenido de humedad ubicada al sur de Mar Caribe asociada a una vaguada que se movía hacia el oeste perpendicular a la Península de Yucatán.

El análisis final del día 29 de octubre a las 12Z (Fig. 4.18a) muestra que la interacción entre el flujo asociado a la baja presión localizada en el Caribe y el flujo debido al sistema de alta presión que entraba por el Golfo de México, generaron un jet en el flujo de vientos dirigido hacia el Istmo, el cual comenzó a adveccionar humedad desde el sur de Florida hasta los estados de Chiapas y Tabasco, siguiendo la línea de un frente estacionario que marcaba la división entre las masas de distintas

propiedades. Además, la humedad que se concentraba en el Caribe y se desplazaba hacia el oeste también era advectada hacia el Istmo al llegar a la zona del jet. En la figura 4.18b se representan las condiciones de la figura 4.18a obtenidas con el modelo. Se aprecia que el modelo reproduce bien el alto contenido de humedad sobre los estados de Chiapas, Tabasco, Veracruz y en general en todo el Golfo, por lo que se esperaría una buena estimación de las precipitaciones. El jet también es bien representado por el modelo notándose la intensificación de los vientos provenientes del norte cuando estos pasan del Golfo de México al Golfo de Tehuantepec a través del Istmo.

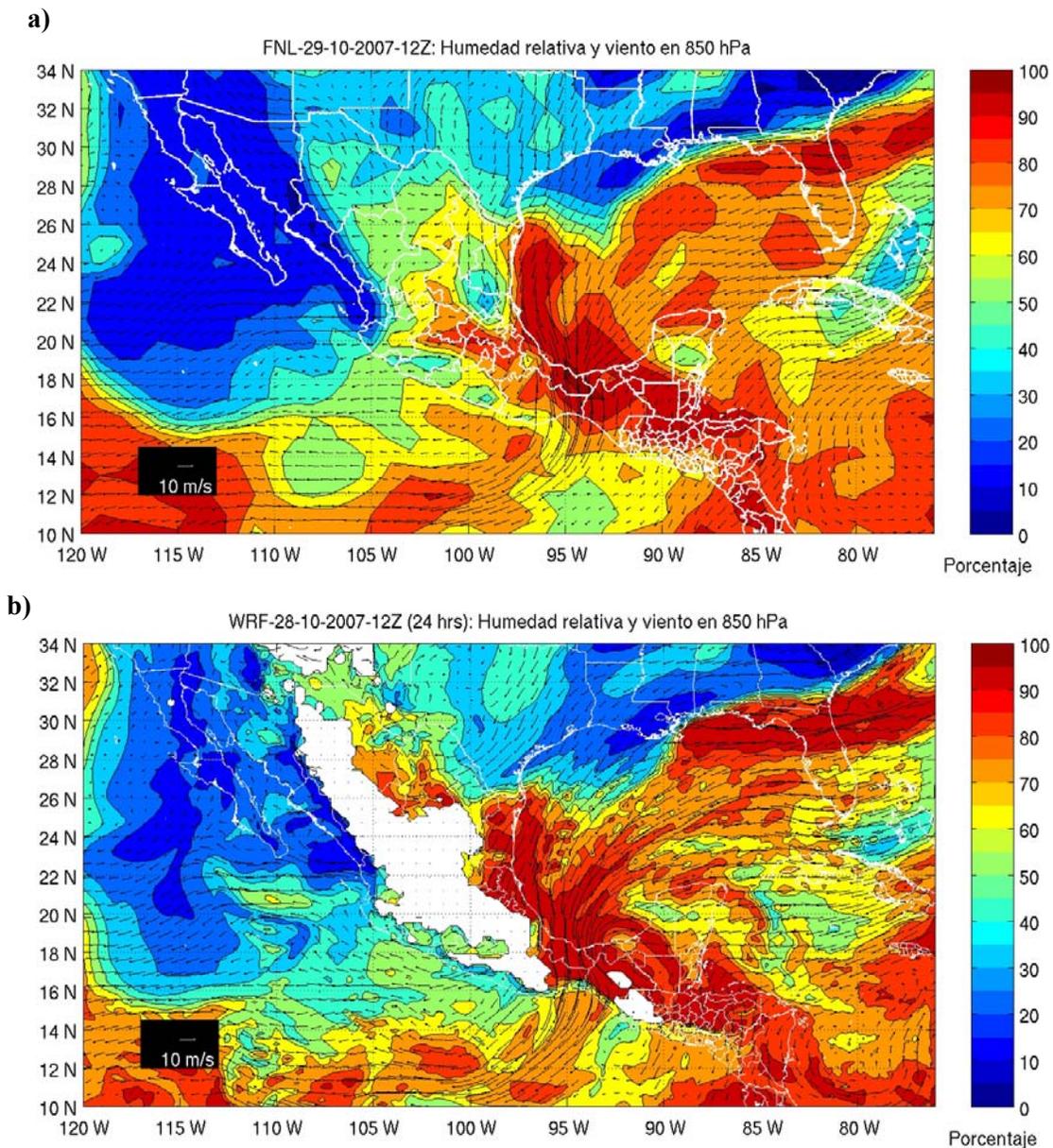


Figura 4.18. Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-29-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas.

En la figura 4.19a se muestra el análisis del NCEP del día 30 de octubre a las 12Z y en 4.19b los campos obtenidos con el modelo para esa fecha. Se observa que la intensidad del campo de vientos del modelo es mayor al campo mostrado en el análisis final, sobre todo en la parte central del Golfo, sin embargo, la dirección es bien representada pues indica que los vientos que llegan al Istmo tienen una componente predominante del norte debido a la influencia del jet. El campo de humedad muestra que casi todo el Golfo tiene una humedad relativa superior al 80% y valores aún mayores en la zona del Istmo. Los resultados numéricos representan el pronóstico a 48 horas, por lo que puede deducirse que el máximo de humedad sobre el Istmo está asociado al transporte de humedad que provoca el jet, y que predominó por lo menos 48 horas.

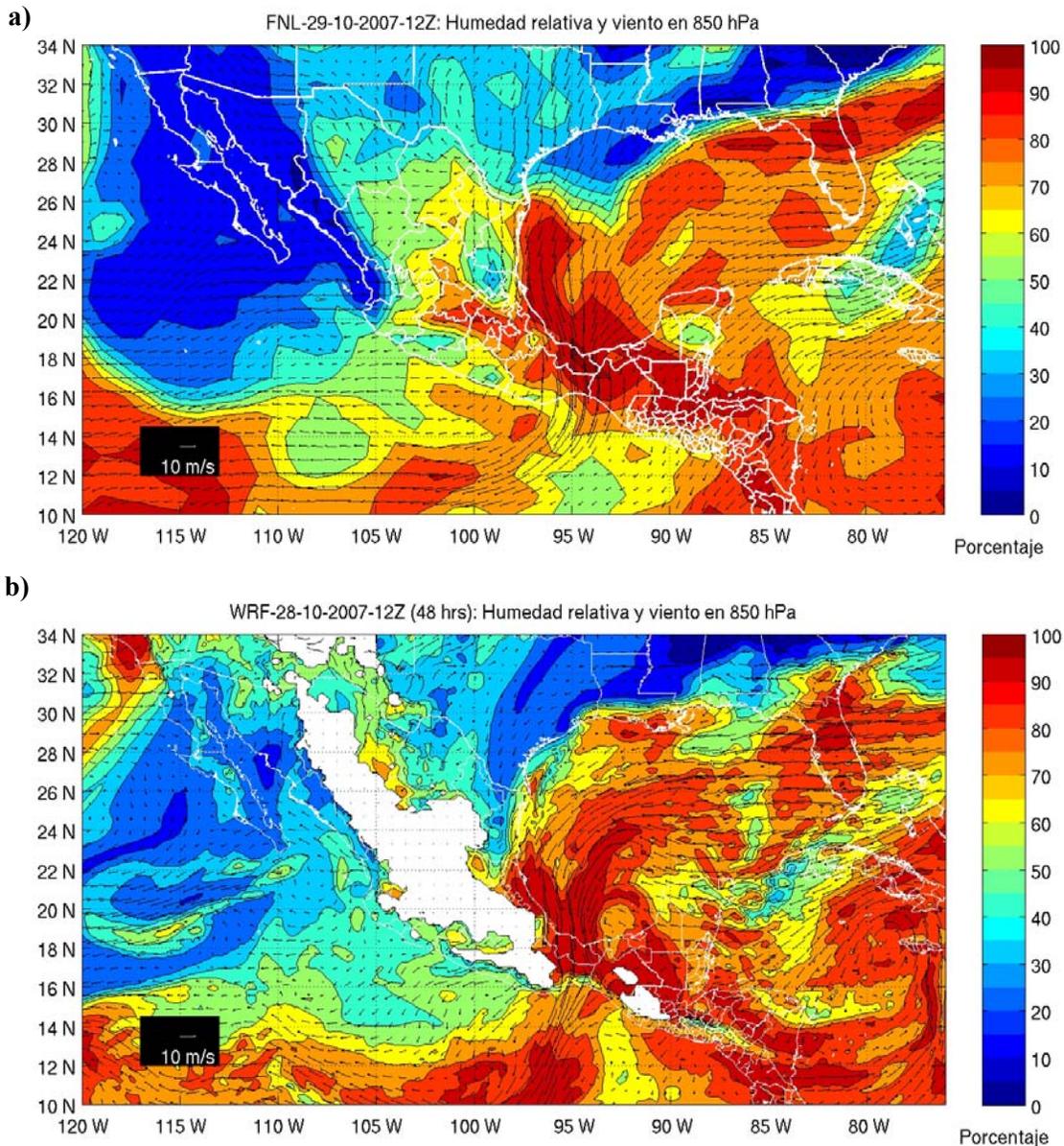


Figura 4.19. Humedad relativa y viento en 850 hPa. (a) FNL-30-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas.

Debido a la importancia del jet como factor para que se desarrollaran las precipitaciones, a continuación se describe la altura a la cual se extiende y su relación con el contenido de humedad. En la figura 4.20a se muestra el análisis del NCEP para el día 29 de octubre a las 12Z, mientras que en 4.20b se muestra el pronóstico a 24 horas iniciando el día 28 de octubre, coincidiendo en tiempo con el análisis final. Ambos gráficos muestran el campo de humedad relativa y viento en 400 hPa.

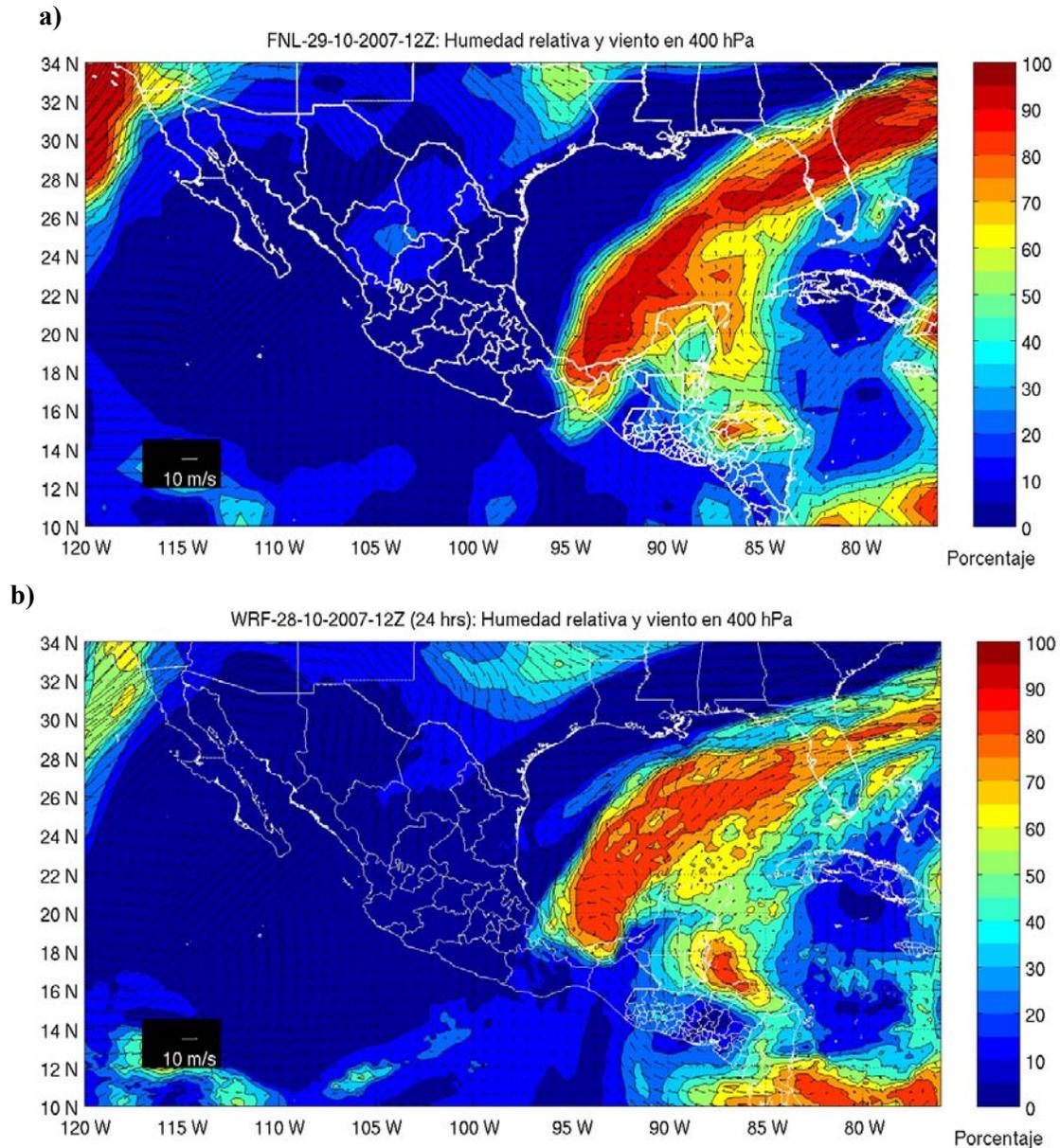


Figura 4.20. Humedad relativa y viento en 400 hPa. (a) FNL-29-10-2007-12Z. (b) WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 24 horas.

Se observa claramente que en ambos gráficos la extensión vertical del contenido de humedad sobre la línea frontal alcanza los 400 hPa y que el modelo subestima el contenido de humedad a lo largo de esta línea. Para el flujo de vientos sobre la línea frontal y sus alrededores se observa que en este nivel ya no existe una consistencia con el jet observado en 850 hPa, de hecho el flujo dirigido a la zona de estudio solo se aprecia alrededor de los 18°N ya que más al norte de esa latitud el viento tiene una componente predominante del este, revirtiéndose incluso más allá de los 24°N. Estas condiciones indican que la advección de humedad ocurre esencialmente en los niveles medios y bajos de la atmósfera.

La figura 4.21 muestra cortes zonales de humedad relativa en 17.22°N, que es la latitud a la cual se ubica Ocoatepec (Chiapas) y en donde se registró la máxima precipitación acumulada del segundo periodo. En 4.21a se muestra el análisis final del NCEP del día 28 de octubre y en 4.21b las condiciones iniciales del modelo para la misma fecha. Se observa que las condiciones iniciales del modelo no difieren mucho del análisis final pues en ambos casos, alrededor de 87.5°W, existe una columna con gran humedad que se extiende hasta los 400 hPa, aunque el modelo subestima un poco la humedad en niveles altos. En el rango de longitudes en que se encuentran las estaciones (limitado por las líneas negras de las figuras) se aprecia un alto contenido de humedad por debajo de los 800hPa, tanto en las simulaciones numéricas como en el análisis final, a diferencia del primer periodo de lluvias en donde se mostró un alto contenido de humedad distribuido en todos los niveles.

En el pronóstico a 48 horas (4.21d), el modelo muestra algunas diferencias con respecto al análisis del NCEP, entre 90°W y 85°W el contenido de humedad es subestimado por el modelo en los niveles medios y altos, posiblemente como consecuencia de la falta de información en esos niveles de las condiciones iniciales. En la zona de las estaciones la humedad es bien representada por el modelo, ya que en ambos casos el mayor contenido de humedad está por debajo de los 500 hPa. Sin embargo, el modelo muestra alrededor de 95°W una columna con un gran contenido de humedad que se extiende hasta los 300 hPa y que no se aprecia en los análisis finales, esto puede estar asociado a que la máxima intensidad del jet reproducido por el modelo esté ubicada alrededor de esa latitud.

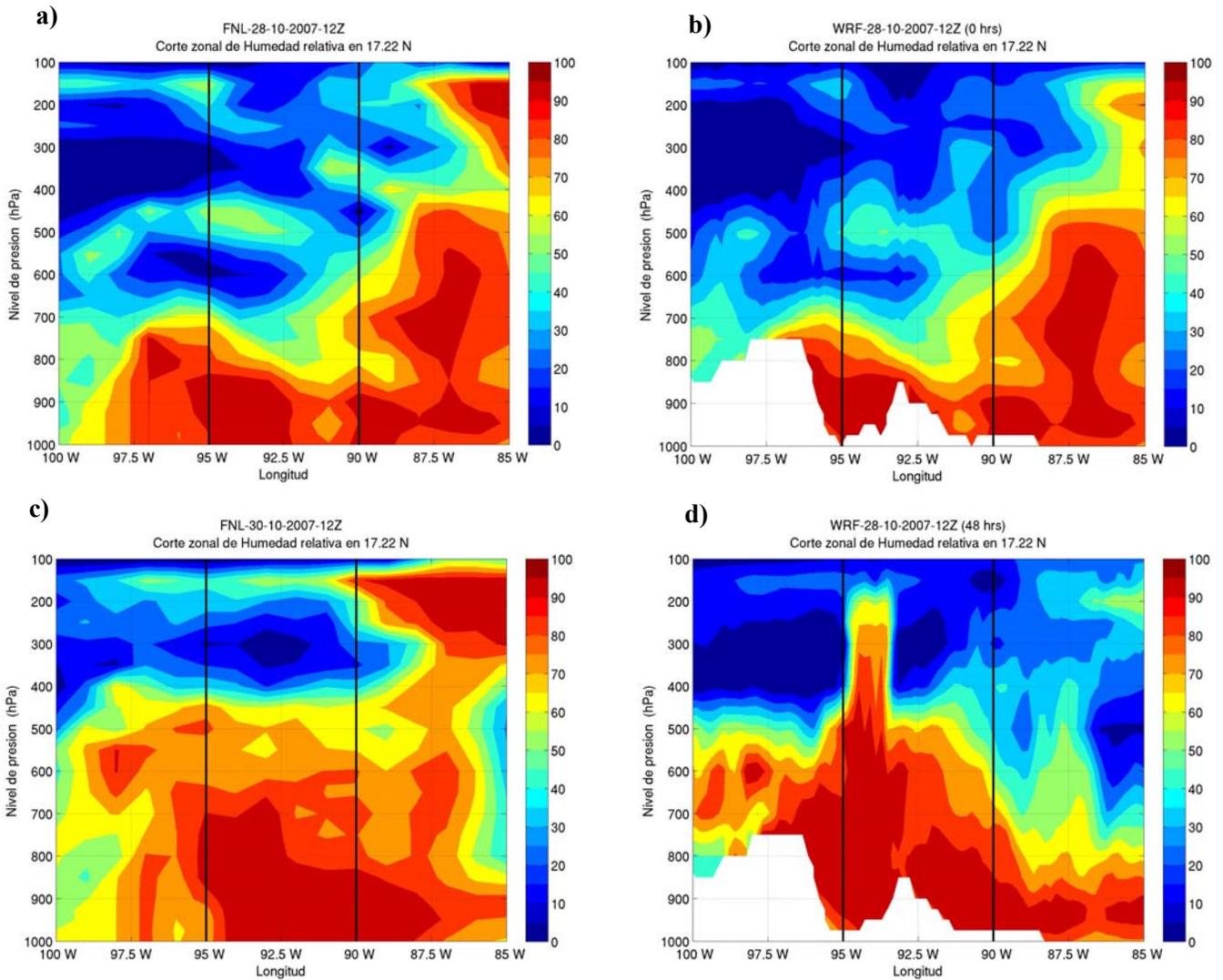


Figura 4.21. Cortes zonales de humedad relativa en 17.22 °N (latitud de Ocoatepec, Chiapas). a) FNL-28-10-2007-12Z. b) WRF 23-10-2007-12Z, condiciones iniciales. c) FNL-24-10-2007-00Z. d) WRF 23-10-2007-12Z, pronóstico a 48 horas. Las líneas negras indican el rango de longitud en que se localizan las estaciones de la GASIR.

Los análisis anteriores indican que el modelo reproduce bien la interacción entre los sistemas meteorológicos y el jet resultante, resolviendo también la advección de humedad hacia el Istmo. En cuanto a las diferencias más notables, está el hecho de que el modelo reproduce una columna con gran contenido de humedad en el oeste de la región en que se ubican las estaciones, probablemente asociado con las características del jet que reproduce el modelo. Más adelante se ampliará la discusión acerca del jet al analizar las diferencias entre los factores que causaron cada uno de los periodos de precipitación.

La figura 4.22a muestra la precipitación acumulada en 72 horas estimada por el modelo iniciando la simulación el día 28 de octubre y en 4.22b se observa la estimada por el TRMM, en ambos casos le

periodo abarca del 28 al 31 de octubre a las 12Z.

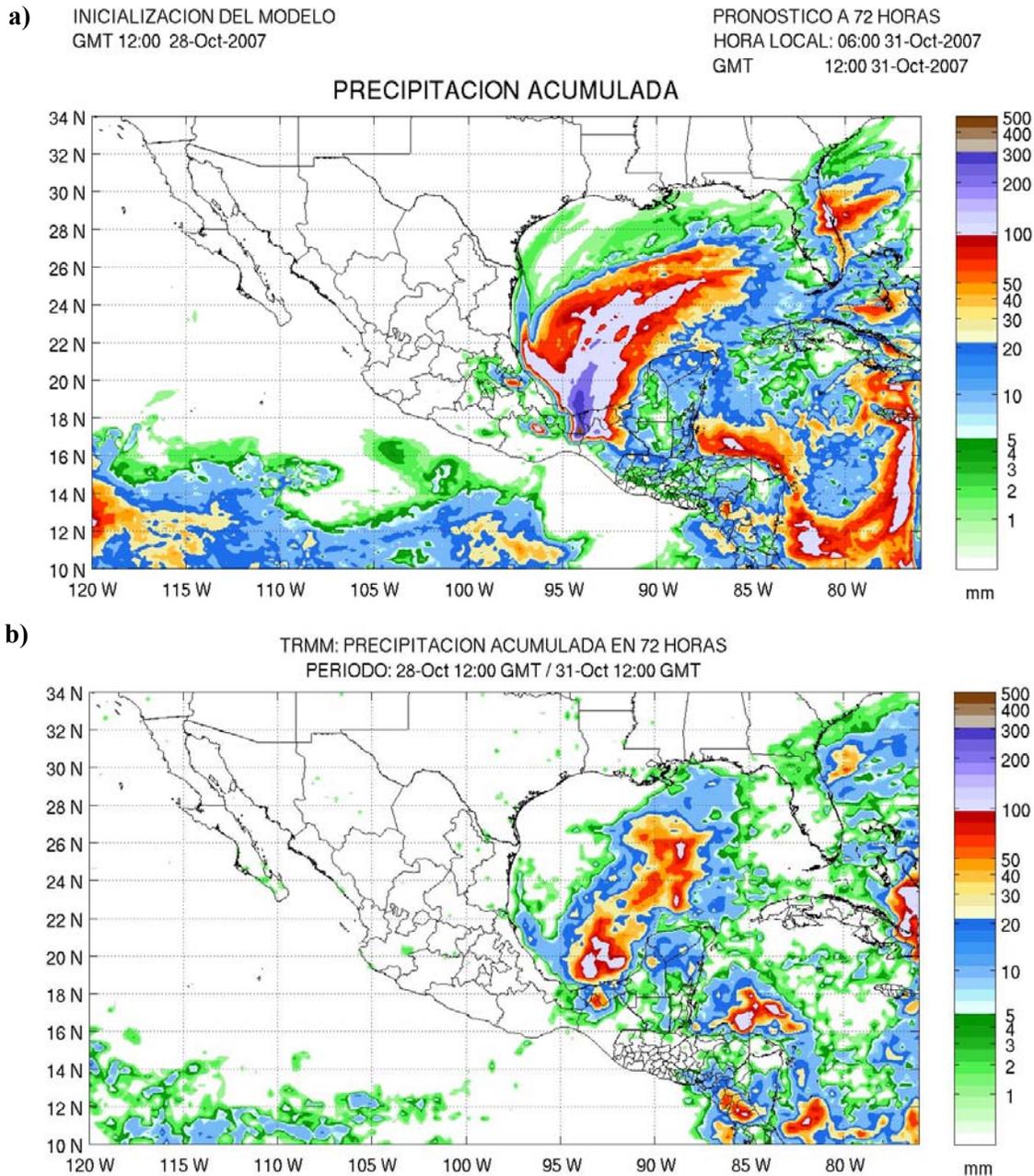


Figura 4.22. a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir del 28-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 28-10-2007-12Z al 31-10-2007-12Z.

A diferencia del primer periodo de lluvias, en donde se mostraban zonas dispersas con grandes precipitaciones acumuladas en el sureste de México, el pronóstico del modelo muestra una región de máxima precipitación que va desde el centro del Golfo de México hasta el Istmo de Tehuantepec, confinada a la región del jet formado en el Golfo. Se aprecia que las zonas terrestres más afectadas

por las precipitaciones son Veracruz, Tabasco y Chiapas, mostrándose que el valor máximo estimado se encuentra en el sur de Veracruz con aproximadamente 400 mm, desafortunadamente no se cuenta con registros en esa zona para evaluar la precipitación. Para la región que cuenta con mediciones se observa un máximo en el noroeste de Chiapas, con una precipitación acumulada de aproximadamente 200 mm.

La estimación del TRMM muestra también una zona de máxima precipitación acotada por la estructura del jet afectando los estados del Istmo, sin embargo el valor de máxima precipitación acumulada para el noreste de Chiapas es menor a 100 mm, mostrando que el máximo de precipitación acumulada estimado por el modelo duplica la estimación del TRMM. Por otra parte se observa que el TRMM no muestra un máximo en el sur de Veracruz como lo hace el modelo, esto está asociado a que el jet que desarrolla el modelo provoca la formación de una columna con gran contenido de humedad en esa zona, disponible para la generación de precipitaciones.

En la figura 4.23 se muestra la precipitación acumulada en la zona de estudio, se ha graficado el acumulado que corresponde a cada elemento de la malla del modelo (Fig. 4.23a) y del TRMM (Fig. 4.23b) superponiendo la topografía. Para el caso de las precipitaciones estimadas por el TRMM es clara una zona de máxima precipitación limitada de 92.5°W a 93.5°W y de 17.25°N a 18.25°N con un máximo de precipitación acumulada de aproximadamente 100 mm, subestimando por mucho la precipitación medida, pues el promedio de los registros para las estaciones comprendidas en esa área es de 445 mm. Por otro lado, la precipitación acumulada en Ocotepéc (estación 5) es bastante subestimada pues se encuentra en una zona en la que el TRMM ha estimado entre 20 mm y 50 mm mientras que el registro indicó más de 700 mm. Se observa también que las estaciones altas y las que se encuentran al pie de la pendiente orográfica (5, 9, 13, 14, 15 y 16) son las que tienen registros más grandes de precipitación, 475 mm en promedio, sin embargo, las estaciones que están antes de la pendiente orográfica (3, 4, 6, 7, 8, 10 y 12) también muestran grandes valores de precipitación acumulada, 310 mm en promedio, por lo que la diferencia entre ambos grupos es sólo de 165 mm.

Es evidente que para este periodo de precipitación la pendiente orográfica tiene una influencia de manera que favorece la ocurrencia de precipitaciones, sin embargo la poca diferencia entre ambos grupos de estaciones conduce a concluir que gran parte de las precipitaciones de este periodo no son debidas a la formación de grandes celdas convectivas sino a precipitaciones de tipo estratiforme a lo largo del jet, lo cual concuerda con las imágenes satelitales infrarrojas mostradas en el análisis

sinóptico pues no mostraron núcleos de fuerte convección sobre la región de estudio. De manera general se observa que la precipitación acumulada estimada por el TRMM para este periodo no tiene una buena representación cuantitativa y espacial.

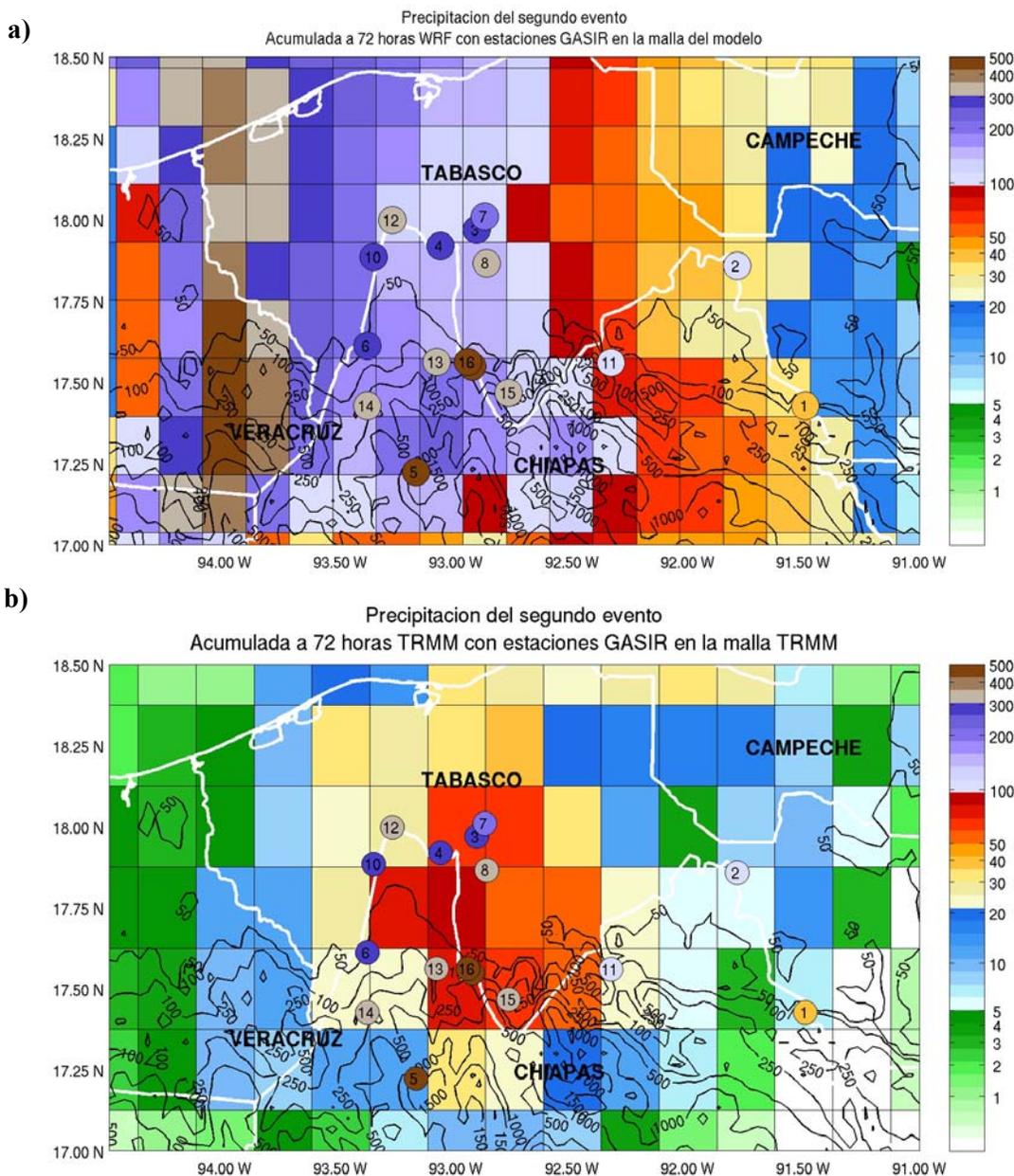


Figura 4.23. a) Precipitación acumulada en 72 horas estimada por el WRF a partir del 28-10-2007-12Z. b) Precipitación acumulada estimada por el TRMM del 22-10-2007-12Z al 25-10-2007-12Z. En ambos casos se muestran las observaciones registradas identificando las estaciones de acuerdo con la Tabla 2.2.

El caso de la precipitación estimada por el WRF es bastante distinto al del TRMM, la zona de máxima precipitación se localiza al sur de Veracruz alrededor de 94°W y 17.5°N, este máximo está

asociado al jet desarrollado por el modelo y no puede ser verificado por falta de mediciones in situ. La precipitación estimada por el modelo para las estaciones que se encuentran en el área más plana es subestimada como en el caso del TRMM, pero es cuantitativamente más consistente, pues el modelo estima precipitaciones entre 100 mm y 250 mm. El máximo de precipitación acumulada en Ocoatepec (estación 5) también es subestimado, pues se encuentra en una zona de 200mm a 300 mm, sin embargo, es una mejor representación que en el caso del TRMM.

La distribución espacial de la precipitación estimada por el modelo muestra una disminución hacia el este a partir de los 94°W, que es un patrón similar al de las estaciones, pues los registros de mayor precipitación acumulada están alrededor de 93°W. Al este de este grupo se encuentran las estaciones 11 y 2 con registros de aproximadamente 100 mm. Finalmente, la estación 1 muestra el registro más pequeño con apenas 44 mm, mientras que el modelo estima entre 30 mm y 50 mm para esa zona.

Los análisis anteriores muestran que el modelo obtiene una mejor distribución espacial de las precipitaciones en el segundo periodo así como una mejor estimación cuantitativa comprando contra los datos TRMM. Para concluir el análisis cuantitativo, en la Tabla 4.4 se resumen los estadísticos de este periodo en donde se aprecia que el RMSE y BIAS del modelo es menor en todas las comparaciones. En el caso de las estaciones altas el TRMM tiene un error de 287 mm, que es más del doble de los 108 mm del modelo. En cuanto al BIAS, ambos conjuntos de datos subestiman la precipitación, pero el modelo subestima con un sesgo de -95 mm, que es un valor tres veces menor que los -286 mm con que subestima el TRMM. Nuevamente se encuentra que los estadísticos del TRMM son comparables en magnitud con los 230 mm que corresponden a la segunda lámina de precipitación más grande en México para el mes de octubre.

Tabla 4.5. Estadísticos asociados a la comparación de las precipitaciones estimadas por el TRMM y el WRF contra los registros de las estaciones de la GASIR durante el segundo periodo de precipitaciones.

Estaciones	Estadísticos	TRMM	WRF
BAJAS	RMSE	96.00	63.20
	BIAS	-74.23	-12.41
ALTAS	RMSE	287.20	108.70
	BIAS	-286.24	-95.50

4.3.4 Análisis de las diferencias entre los periodos de precipitación

En las últimas secciones se ha revisado con detalle la manera en que el modelo reprodujo las condiciones meteorológicas relacionadas a los vientos y los dos periodos de precipitación, encontrándose una serie de argumentos favorables para el modelo. Sin embargo, es importante profundizar en algunos aspectos que ayuden a responder la causa de las precipitaciones extremas, por lo que el siguiente análisis tiene por objetivo marcar las particularidades de cada uno de los periodos de precipitación con la ayuda del modelo, debido a que ésta tiene una resolución espacial y temporal que permite observar detalles del fenómeno, que muchas veces es imposible visualizar si solo se cuenta con un conjunto de observaciones.

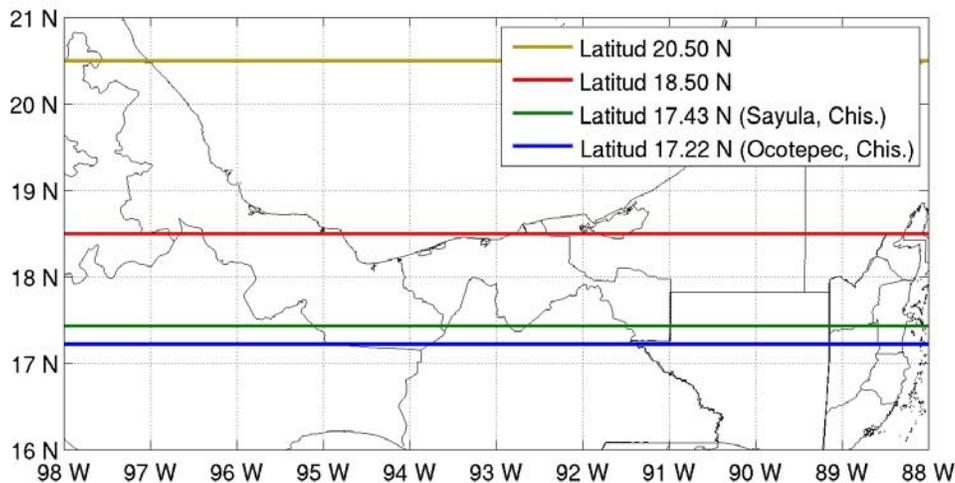


Figura 4.24. Latitudes utilizadas para realizar los cortes zonales.

La figura 4.24 muestra las líneas de latitud utilizadas para realizar cortes zonales que se utilizan en esta sección; 18.22°N es la latitud de Ocotepc, Chis.; 18.43°N corresponde a la latitud de Sayula, Chis.; 18.50°N es una latitud casi paralela a la costa de Tabasco y 20.50°N cruza el sur del Golfo de México. La figura 4.25 muestra el transporte de humedad (áreas de color) y la intensidad de la componente meridional del viento (líneas de contorno) en los cortes zonales ya mencionados. En 4.25a se muestra el pronóstico a 24 horas del modelo iniciado el día 22 de octubre y en 4.24b el pronóstico a 24 horas iniciando el modelo el día 28 de octubre. Se observa que para ambos pronósticos la intensidad de la componente meridional del viento muestra valores negativos (contornos rojos), lo cual indica que la dirección predominante del viento es del norte.

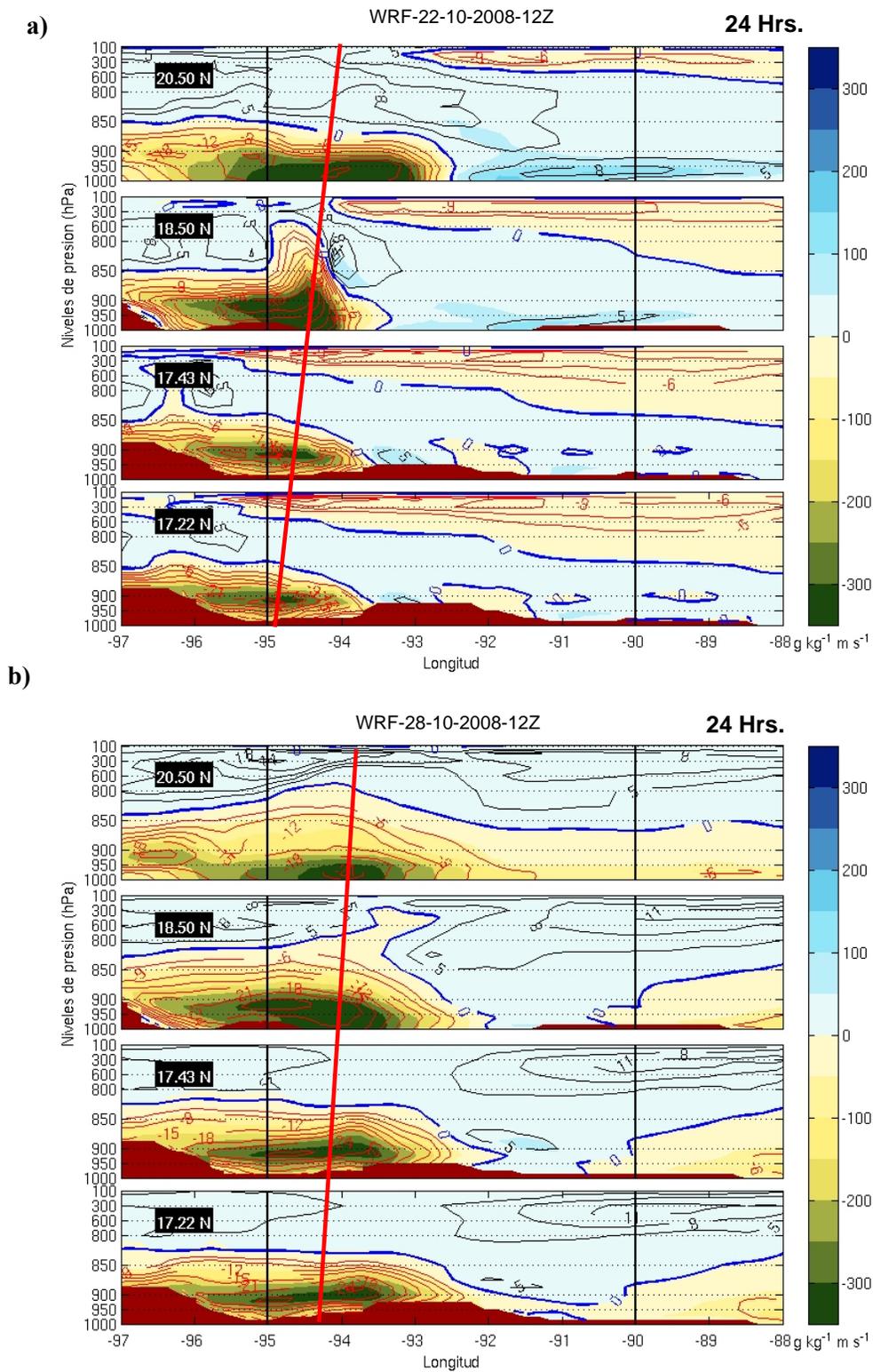


Figura 4.25. Cortes zonales para las latitudes mostradas en la figura 4.24. a) Pronóstico a 24 horas del día 22 de octubre. b) Pronóstico a 24 horas del día 28 de octubre. Áreas en color: Valores negativos (positivos) indican transporte de humedad hacia el sur (norte). Las líneas de contorno indican la intensidad de la componente meridional del viento: Rojo (negro) indica dirección hacia el sur (norte), la línea azul indica el cero. Las líneas negras verticales indican el rango de longitudes en las cuales se concentran las estaciones.

También se observa, en ambos casos, que el máximo transporte humedad (denotado por las líneas gruesas rojas) está ligeramente desplazado hacia este en los cortes zonales localizados en el sur, esto es debido a que tanto el frente frío del día 22 como el frente estacionario del día 28 cruzan el Golfo de México de nor-noreste a sur-sureste formando una línea diagonal respecto a la dirección norte.

Con el fin de que sea clara la referencia a cada uno de los eventos, de aquí en adelante se referirá como primer evento al periodo de lluvias que empezó el día 22 y como segundo evento al periodo del día 28. Se aprecia que en el primer evento la máxima intensidad de la componente meridional es de 30 m/s en 18.5°N, mientras que para el segundo la máxima intensidad es de 24 m/s, lo cual concuerda con el hecho de que los vientos al paso del frente fueron más intensos que en el jet (ver figuras 4.6 y 4.7). En cuanto al transporte de humedad se observa que es mayor para el caso del primer evento, lo cual quiere decir que hay una mayor cantidad de humedad advectada al Istmo disponible para generar precipitaciones, sin embargo, ya se ha analizado que las precipitaciones del primer periodo no fueron causadas únicamente por un transporte de humedad a la región.

En la figura 4.26 se muestran cortes zonales para las mismas variables que en 4.25. Las figuras (a), (b) y (c) representan el pronóstico a 24, 48 y 72 horas para el primer evento. En (d), (e) y (f) se muestran los pronósticos para el segundo. En el caso del primer evento la influencia de la componente meridional del viento provoca un transporte de humedad hacia el Istmo solo en las primeras 24 horas, pues el avance hacia el este del sistema de alta presión y el frente asociado, provocan que la región con máxima intensidad de vientos y transporte de humedad se desplace también al este. El pronóstico a 48 horas indica que el transporte de humedad hacia la región de estudio fue menor que en las primeras 24 horas y en el pronóstico a 72 horas prácticamente nulo. Son dos los factores que influyen para que el transporte de humedad disminuyera en 48 y 72 horas; primero, la disminución de los vientos después de que el frente ha pasado por la región de estudio; segundo, el bajo contenido de humedad característico de la masa de aire que va cubriendo la zona de estudio conforme avanza el sistema de alta presión.

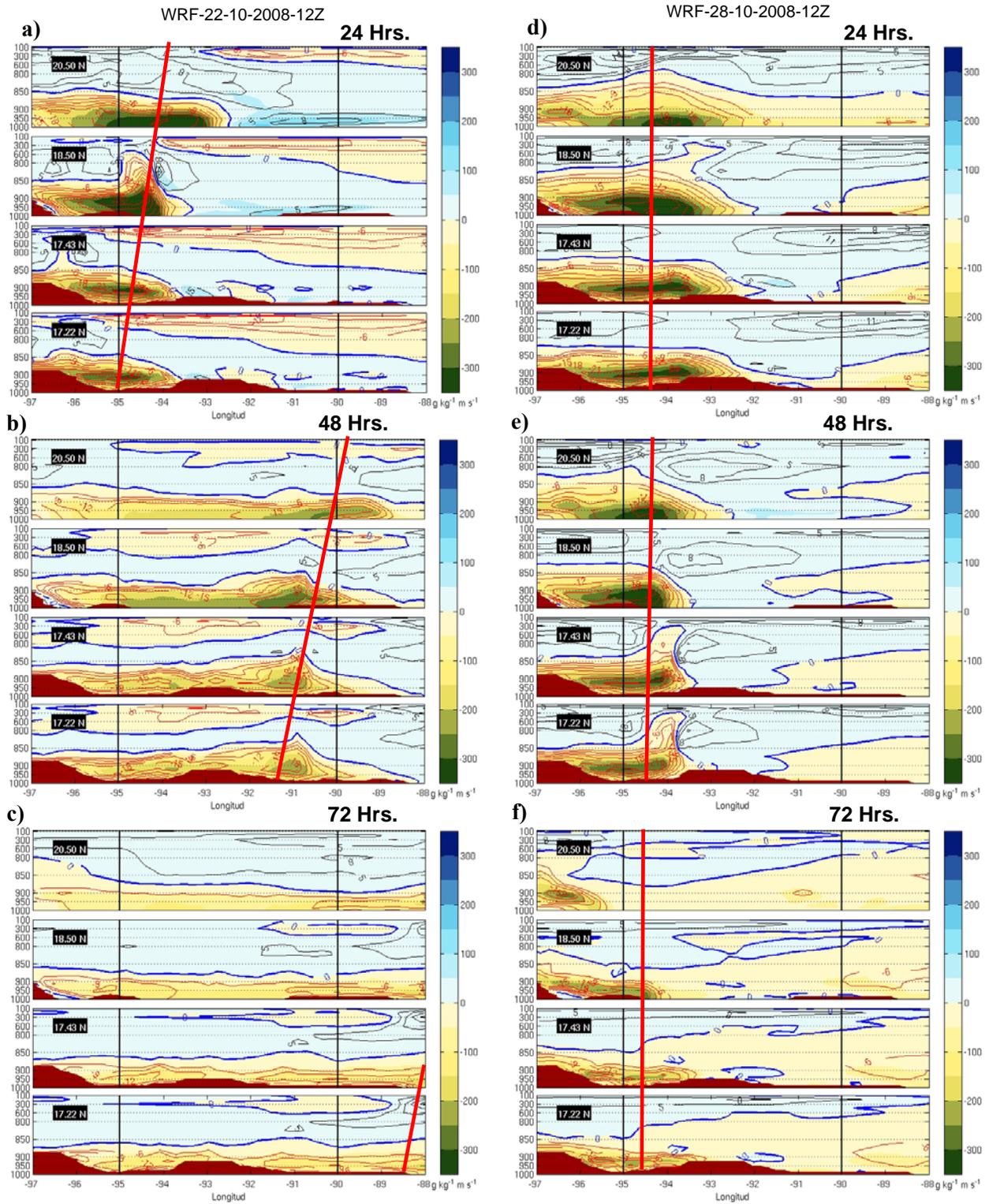


Figura 4.26. Cortes zonales igual que en 4.25. En (a), (b) y (c) se muestra el pronóstico a 24, 48 y 72 horas respectivamente, iniciando el modelo el día 22 de octubre. En (d), (e) y (f) se muestra el pronóstico a 24, 48 y 72 respectivamente, iniciando el modelo el día 28 de octubre.

Para el caso del segundo evento, una de las características más importantes es que provoca un transporte de humedad hacia el Istmo que se mantiene por 48 horas. Aunque a las 72 horas de pronóstico aún se aprecia la influencia del jet, el transporte de humedad hacia la zona es menor. Estas condiciones fueron la principal causa de las precipitaciones del segundo periodo. Se aprecia también que el máximo transporte de humedad ocurre entre 94°W y 95°W , corroborando que el máximo de precipitación acumulada estimado por el modelo al sur del estado de Veracruz, es causado por la constante advección de humedad hacia esa zona durante las primeras 48 horas del pronóstico. Este máximo podría ser una sobrestimación en la precipitación estimada por el modelo, pero como se dijo anteriormente, la falta de mediciones no permite confirmar ni descartar que en el sur de Veracruz se hayan registrado precipitaciones mayores a las medidas en Chiapas y Tabasco.

La figura 4.27 ilustra la situación comentada anteriormente, se muestra el pronóstico del transporte de humedad en 24, 48 y 72 horas para el caso del primer evento (4.27a) y del segundo evento (4.27b). Los cortes se han realizado a la latitud de 18.50° debido a que en esta latitud aún no existen efectos asociados a la orografía en el transporte de humedad. Nuevamente se aprecia el paso del frente y el constante transporte de humedad debido al jet. Otra de las características importantes del segundo evento es que su mayor intensidad ocurre en los niveles bajos de la atmósfera, aproximadamente de 850 hPa hacia abajo. Nuevamente se observa que el máximo transporte de humedad ocurre al oeste de la región en que se encuentran las estaciones (limitada por las líneas negras verticales). En la sección 4.3.3 se mostró que la columna de humedad a lo largo de la línea del jet se extendía hasta los 300 hPa, sin embargo el transporte solo se da en niveles bajos debido a que la dirección del viento predominante cambia y disminuye el efecto de la componente meridional en niveles medios y superiores.

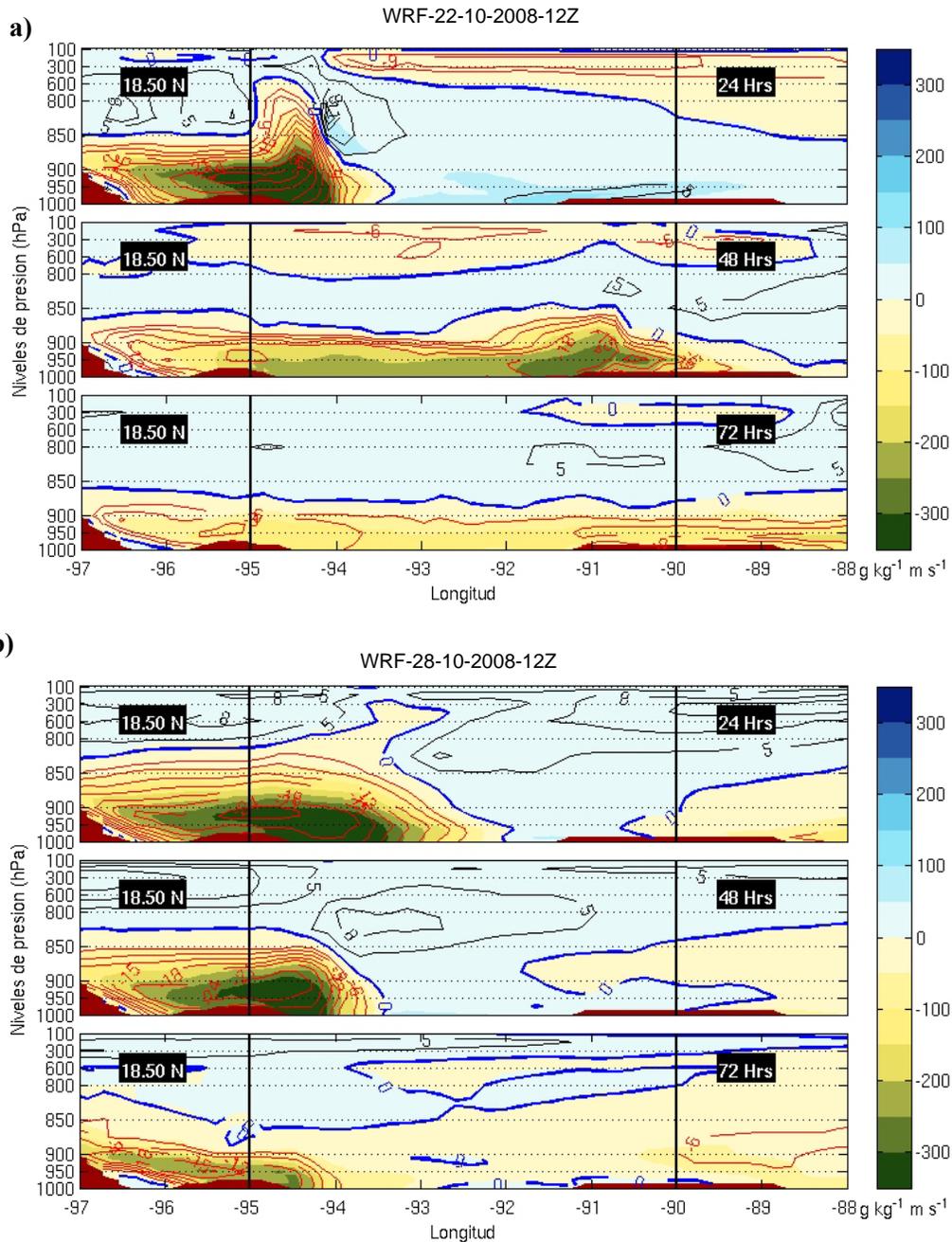


Figura 4.27. Cortes zonales como en 4.25. a) Pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 22 de octubre. b) Pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 28 de octubre.

Para concluir el análisis del transporte de humedad se calculó el flujo de vapor de agua durante las 72 horas de las simulaciones numéricas. El cálculo está hecho sobre una sección vertical a la superficie en 18.50°N , limitada de 90°W a 97°W y extendida hasta los 700 hPa en la vertical. Las longitudes que limitan a la sección consideran la ubicación las estaciones y ha sido extendida hasta los 97°W en lugar de 95°W , debido a que la influencia del jet es clara aún en esas longitudes.

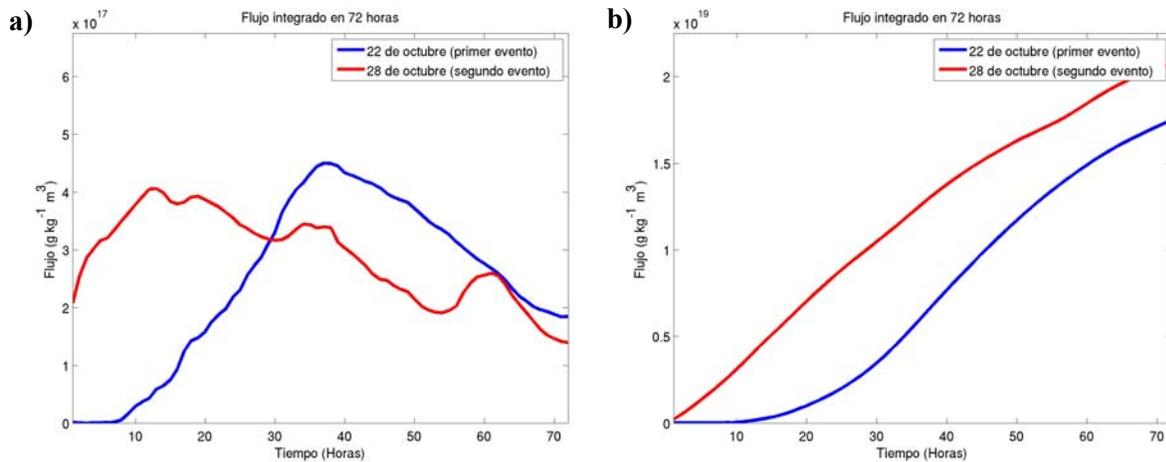


Figura 4.28. Flujo de vapor de agua para los dos eventos de precipitación durante 72 horas de pronóstico. a) Flujo horario. b) Flujo acumulado.

La figura 4.28a muestra que la advección de humedad del primer evento comenzó 10 horas después de iniciada la simulación numérica y tiene un máximo en 40 horas que representa el paso del frente, posteriormente disminuye el flujo debido a que el frente sigue su avance hacia el este. En el flujo que corresponde al segundo evento se observa que desde que inicia la simulación existen condiciones favorables para la advección de humedad y el máximo ocurre a las 15 horas del pronóstico, disminuyendo ligeramente en las horas posteriores pero con una pendiente más suave que la del primer evento, indicando que la influencia de la componente meridional del viento es más prolongada que en el caso del primer evento. En 4.27b se muestra el flujo acumulado de 4.27a, es claro que la cantidad de vapor de agua que pasa por la sección seleccionada es mayor para el caso del segundo evento. Las pendientes que describen el acumulado permiten observar que mientras el primer evento provoca un repentino incremento en el flujo, después de 10 horas de simulación, el segundo evento muestra una pendiente casi constante que implica una menor variación en el flujo, que como se vio anteriormente, fue casi constante por lo menos durante 48 horas.

Como último análisis sobre la habilidad del modelo para reproducir las precipitaciones, en la figura 4.29 se muestran las series de precipitación acumulada para cada una de las estaciones de la GASIR divididas en dos grupos; el primero corresponde a las estaciones que se encuentran por arriba de los 100 msnm (líneas rojas) y el segundo a las que se ubican por debajo de esa altitud (líneas azules). La línea negra representa la precipitación acumulada en el punto de malla que más precipitación registró el modelo, ubicado sobre el estado de Veracruz, y es construida con las precipitaciones acumuladas en 72 horas de tres simulaciones numéricas (216 horas en total), las del día 22, 25 y 28 de octubre. La línea verde es construida de la misma manera que el caso anterior, pero los

pronósticos son del día 21, 24 y 27 de octubre. De esta manera, la línea negra representa las simulaciones numéricas cuando empiezan ambos periodos de lluvias y la verde representa el pronóstico 24 horas antes de que sucedan. Los sombreados amarillo y azul corresponden a las 72 horas de los pronósticos del día 22 y 28 de octubre, respectivamente.

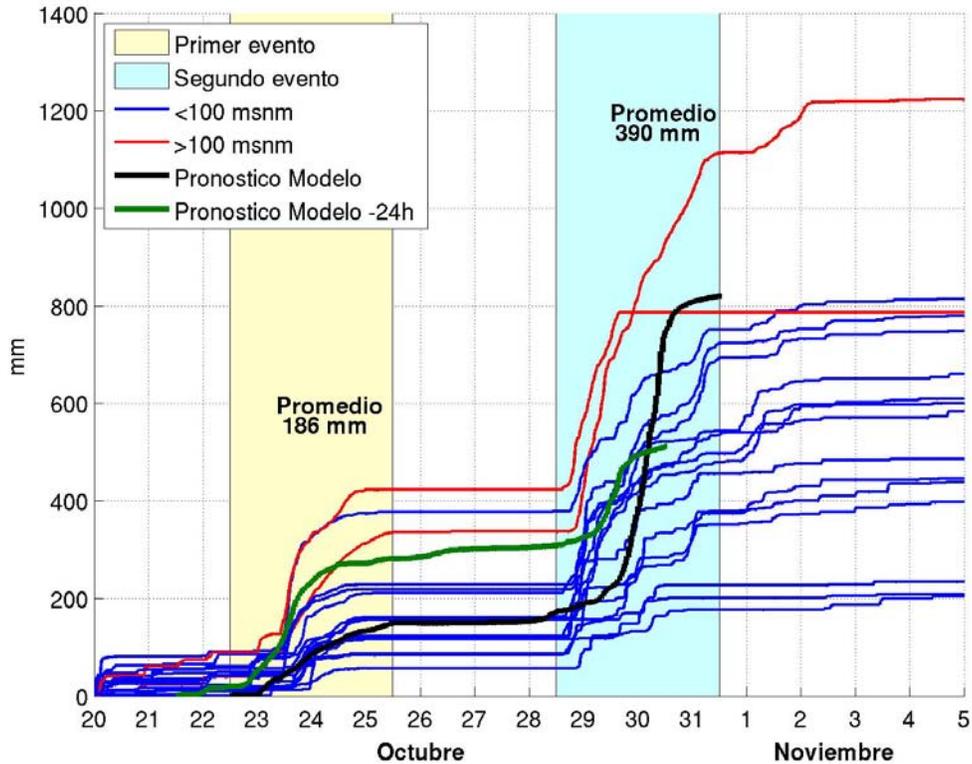


Figura 4.29. Precipitaciones acumuladas en las estaciones de la GASIR del 20 de octubre al 5 de noviembre. Las áreas sombreadas representan las 72 horas de precipitación de cada evento. La línea negra representa las precipitaciones acumuladas a 72 horas de los pronósticos del día 22, 25 y 28 de octubre. La línea es construida igual que la anterior, pero representa los pronósticos del día 21, 24 y 27 de octubre.

Se observa que en promedio, la precipitación acumulada del segundo evento fue dos veces mayor que la del primero. En cuanto a los registros, se observa que las precipitaciones fueron mayores en las estaciones más altas, aunque una de ellas dejó de registrar el día 29 de octubre. Además, se muestra un intervalo sin precipitación, entre el 25 y 28 de octubre. Considerando los pronósticos que cubren el inicio de las precipitaciones (línea negra), se observa que el modelo reproduce muy bien la razón de precipitación que tienen las estaciones de la GASIR, así como el lapso de tiempo en que no se registran precipitaciones. Los pronósticos 24 horas antes (línea verde), indican que el modelo pronostica adecuadamente las precipitaciones, aunque subestima ligeramente la precipitación en el segundo evento. Este análisis muestra nuevamente que el modelo logra una buena representación del caso de estudio.

4.4 Influencia del huracán Noel

De acuerdo con el análisis sinóptico y algunos trabajos previos (ver Boosart, 2008), uno de los factores que pudo contribuir a las precipitaciones del segundo periodo es el aporte de humedad del ciclón tropical Noel. El informe del *National Hurricane Center* menciona que el 28 de octubre una zona de fuerte convección al sureste de Puerto Príncipe, Haití adquirió suficiente organización para alcanzar la categoría de tormenta tropical (NHC, 2008). En la figura 4.30a y 4.30b se observa la convección y el vapor de agua asociados a la formación de la tormenta tropical, las imágenes corresponden al día 28 de octubre a las 12Z.

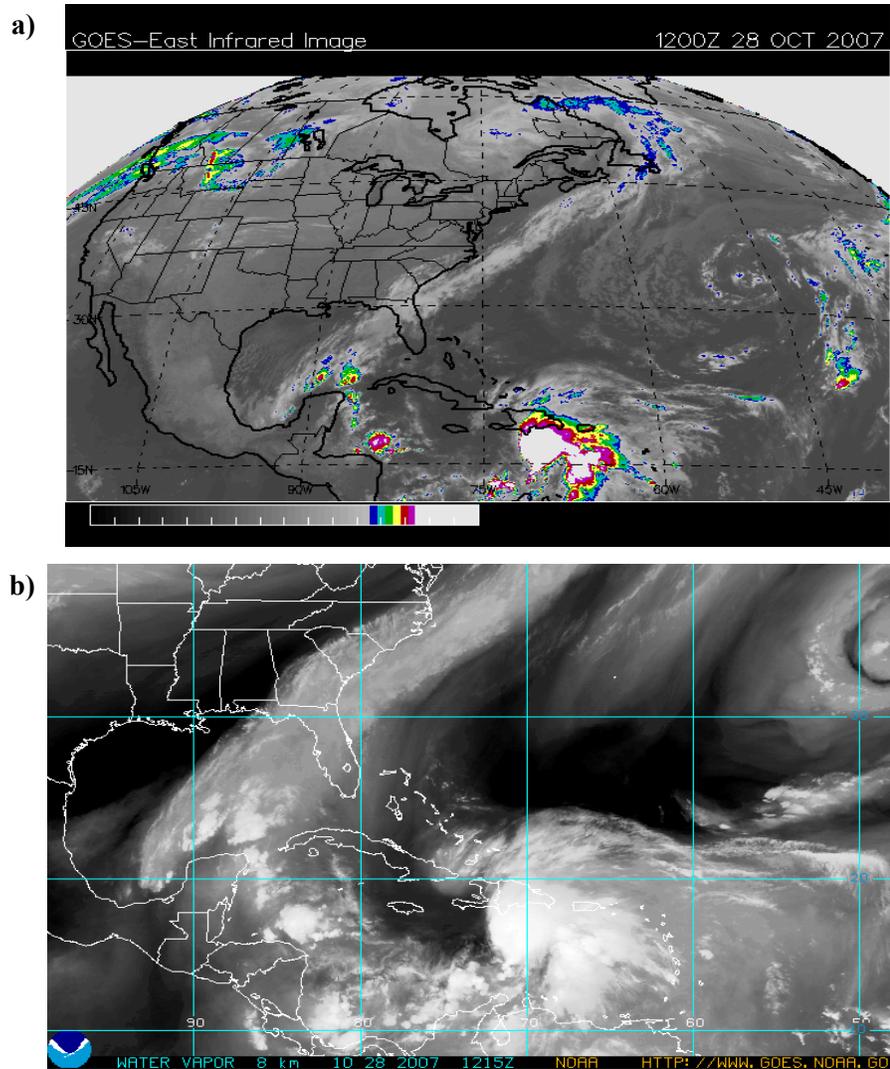


Figura 4.30. Imágenes satelitales del día 28 de octubre a las 12Z. a) Imagen infrarroja indicando la temperatura del tope de las nubes de acuerdo con la escala de la figura 1.2. b) Imagen de vapor de agua.

Aunque la malla del modelo sobre la cual se realizan las simulaciones numéricas no incluye la zona sobre la cual se ubicaba la tormenta tropical el día 28, las imágenes permiten apreciar que el sistema se encontraba demasiado alejado para tener influencia en las precipitaciones que empezaron a registrarse al mismo tiempo en Chiapas y Tabasco. En las siguientes 72 horas la tormenta tropical se movió hacia el noreste y el día 31 se ubicó al este de Cuba (figura 4.31). El análisis de superficie muestra que la configuración isobárica aún representa un flujo de vientos dirigidos hacia el sureste de México y a la Península de Yucatán.

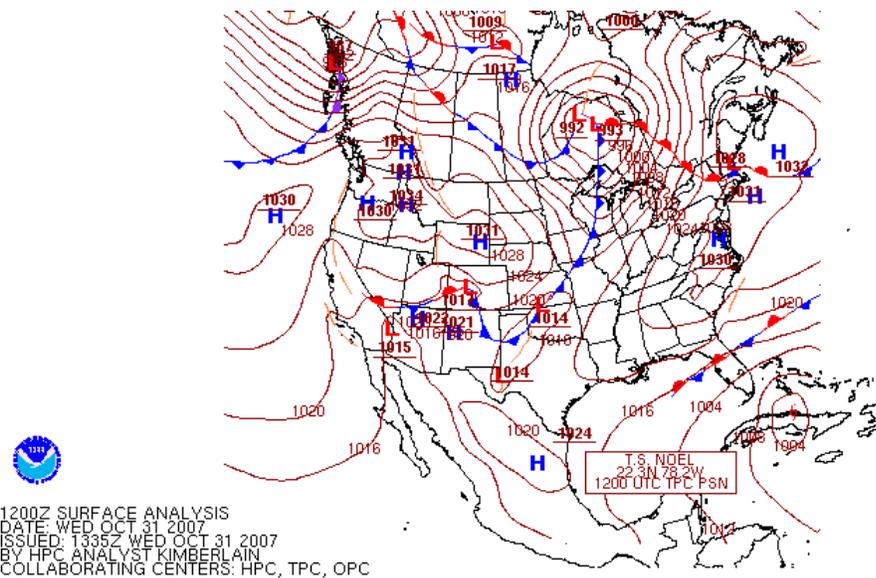


Figura 4.31. Análisis de superficie del día 28 de octubre a las 12Z.

La figura 4.32 muestra el pronóstico a 72 horas del campo de humedad y vientos a 850 hPa del modelo, su validez es para la fecha en que la tormenta tropical se encuentra sobre Cuba. Se observa que el modelo reproduce la humedad asociada a la tormenta, y aún se muestra un flujo hacia el Istmo, sin embargo los vientos en la región central del Golfo son más débiles que en el caso del jet formado el día 28 y existen mínimos relativos de humedad con valores de 60%.

En la figura 4.33 se muestran los cortes meridionales (ver Fig. 4.34). Se observa que en el corte de 80°W y a la latitud de 24°N existe un transporte de humedad, mucho menor comparado con los transportes hacia la zona del Istmo y asociado a la circulación de Noel ya que no se extiende a la longitud de 84°W. Aunque la tormenta tropical no tiene una circulación totalmente definida, la dirección del viento en el lado norte de la tormenta (Fig. 4.32) es la que causa este transporte.

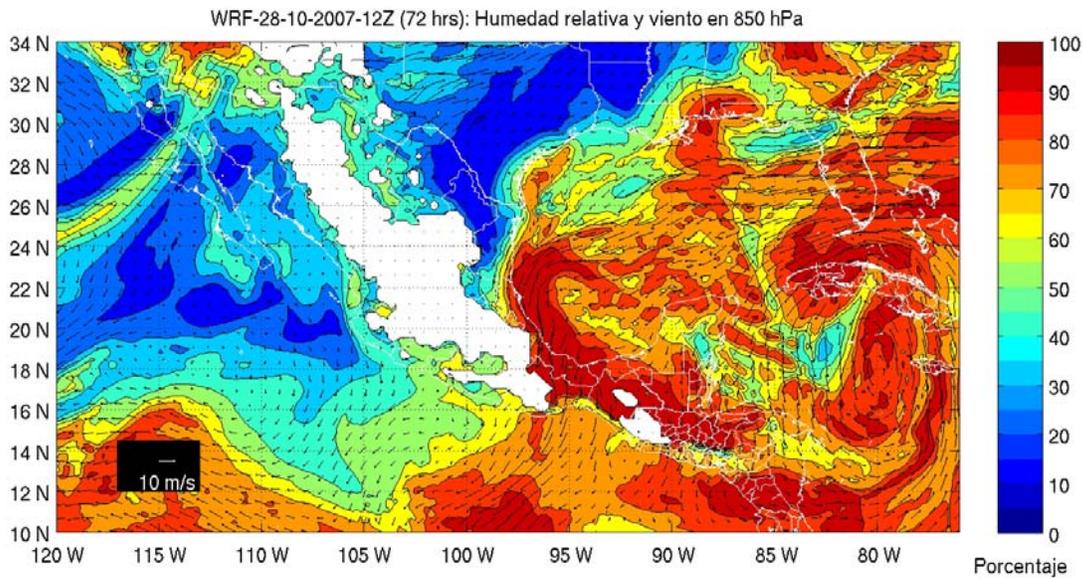


Figura 4.32. Humedad relativa y viento en 850 hPa. WRF-28-10-2007-12Z, pronóstico a 72 horas.

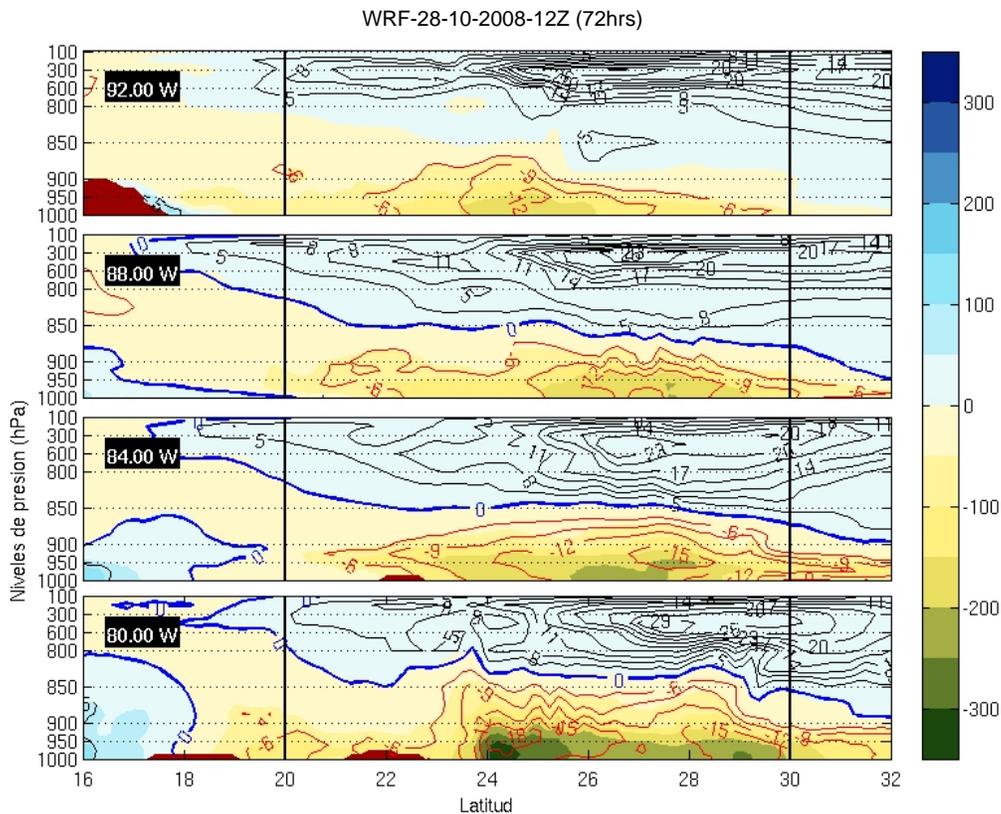


Figura 4.33. Cortes meridionales para las longitudes mostradas en la figura 4.32. Pronóstico a 72 horas del 28 de octubre. Áreas en color: Valores negativos (positivos) indican transporte de humedad hacia el oeste (este). Las líneas de contorno indican la intensidad de la componente zonal del viento: Rojo (negro) indica dirección hacia el oeste (este), la línea azul indica el cero. Las líneas negras verticales indican el rango de latitud en el cual se ubica la tormenta tropical.

Los vientos débiles y los mínimos relativos de humedad en la región central del Golfo indican que no existe un alto contenido de humedad que pueda ser advechado por el flujo de vientos, estas condiciones y el transporte de humedad local mostrado en los cortes meridionales, sugieren que no hay elementos para argumentar que la humedad de la tormenta tropical Noel fue advechada a la región de Istmo y contribuyó a las precipitaciones en los últimos días de octubre y los primeros días de noviembre.

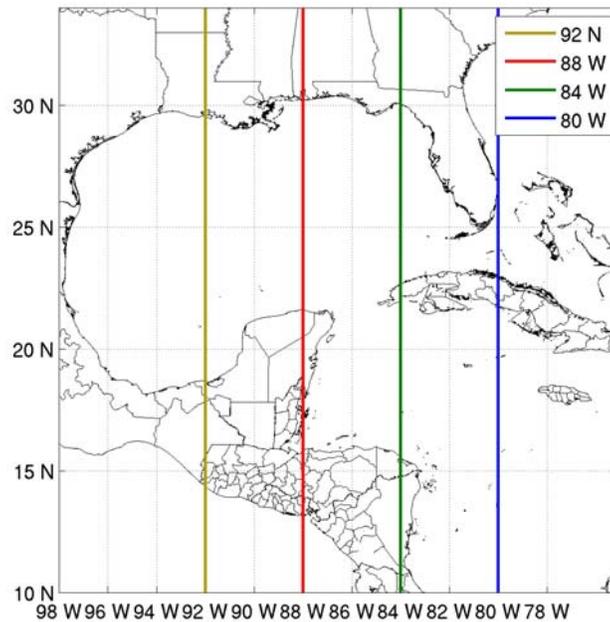


Figura 4.34. Longitudes utilizadas para realizar los cortes meridionales.

Finalmente en la figura 4.35 muestra el transporte de humedad calculado a la latitud de 18.50°N , los cortes corresponden al pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 31 de octubre. Ahí se aprecia que aún existe un transporte mínimo en las primeras 48 horas, como consecuencia de la permanencia del jet, pero en 72 horas, no se mantiene el transporte, como sucedería se parte de la humedad de Noel fuera advechada a la zona. Después del paso de la tormenta tropical Noel por Cuba, esta alcanzó la categoría de huracán y siguió un movimiento de traslación al noreste, por lo que se alejó más del flujo de vientos que podría llevar humedad al Golfo de México y al Istmo de Tehuantepec.

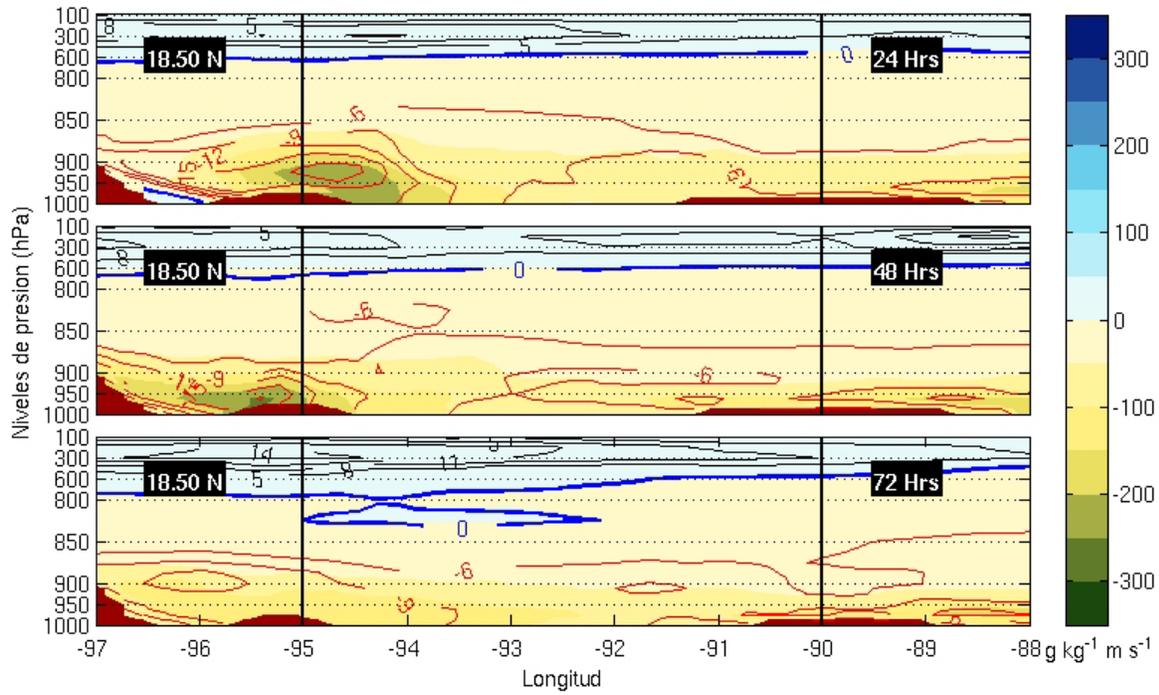


Figura 4.35. Cortes zonales como en 4.25. a) Pronóstico a 24, 48 y 72 horas del día 31 de octubre.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Climatológicamente, la República Mexicana es afectada a lo largo del año por distintos sistemas meteorológicos, cuya intensidad o frecuencia en una región determinada puede contribuir a desastres como el sucedido en Villahermosa, Tabasco a finales de octubre y principios de noviembre del 2007. Esto sugiere que el estudio de los fenómenos atmosféricos que comúnmente afectan a México, es de suma importancia para evitar o mitigar futuros accidentes. En este trabajo de investigación se analizaron las salidas de un modelo numérico y diversos conjuntos de datos con el fin de estudiar las condiciones meteorológicas asociadas a este evento.

El análisis de las precipitaciones que contribuyeron a la inundación en el estado de Tabasco, mostró que éstas ocurrieron en dos periodos de tiempo, el primero de ellos entre el 22 y 25 de octubre y el segundo del 28 de octubre al 2 de noviembre. De manera general, se mostró que el modelo reproduce satisfactoriamente los fenómenos que se conjugaron para dar origen a los dos periodos de precipitaciones intensas en la región de estudio. Estos eventos pueden resumirse de la siguiente manera:

Precipitaciones del primer periodo (Del 22 al 25 de octubre): Se debieron al alto contenido de humedad a lo largo de la línea frontal que cruzó el Golfo de México de noreste a sureste, y que interaccionó con la humedad asociada a un pequeño sistema de baja presión sobre el sur del Golfo, provocando fuerte convección sobre esta región y extendiéndose hasta los estados de Veracruz, Chiapas y Tabasco, además del transporte de humedad asociado a los vientos dirigidos hacia el Istmo.

Precipitaciones del segundo periodo (Del 28 al 31 de octubre): Principalmente fueron debidas al gran transporte de humedad que se mantuvo en la región por más de 48 horas, a lo largo de una región confinada de vientos intensos (jet) desde Florida hasta el Istmo de Tehuantepec, siguiendo la línea de un frente estacionario. El máximo transporte de humedad por causa de este jet sucedió por debajo de los 850 hPa. Otro factor que contribuyó al gran transporte de humedad fue una zona con gran contenido de humedad ubicada en el sur-occidente del Mar Caribe.

Por otra parte, el análisis de las condiciones meteorológicas asociadas a la tormenta tropical Noel, indican que este sistema no aportó humedad que influyera en las precipitaciones del segundo evento por dos razones: la lejanía de este sistema con respecto a la zona del Istmo de Tehuantepec el día 28 de octubre y el alto contenido de humedad asociado solo a la circulación local del sistema el día 31 de octubre.

La evaluación de la precipitación ocurrida en ambos eventos indica que las simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF reprodujeron de mejor manera, cuantitativa y espacial, la precipitación acumulada en comparación con la estimada por el TRMM. El análisis de las estaciones indicó que los valores de RMSE y BIAS son casi dos veces más grandes que los obtenidos por el modelo. Para el caso del segundo evento el modelo produce un máximo de precipitación acumulada al sur del estado de Veracruz que no se observa en los datos del TRMM, sin embargo, no se consiguieron datos de precipitación en esa región que descarten o confirmen este máximo.

Aunque no se determinó un periodo de retorno exacto de las precipitaciones ocurridas en Chiapas y Tabasco, los registros climatológicos indican que en los últimos 30 años se han presentado por lo menos dos eventos de precipitación similares al estudiado. Sin embargo, la interacción de un evento de norte con sistemas tropicales es un fenómeno que puede darse en cualquier año, particularmente en el mes de octubre, por ser un periodo en el que los fenómenos meteorológicos tanto de invierno como de verano afectan a la República Mexicana.

El análisis de la intensidad de vientos asociados al frente frío número que afectó el Golfo de México los días 22 y 23 de octubre, mostró que la magnitud de los nortes que ocurren con mayor frecuencia tienen asociadas intensidades de viento entre 13 m/s y 15 m/s, y representan el 36% de los casos, mientras que los nortes con una intensidad superior a los 21.2 m/s, como el ocurrido el 23 de Octubre, representan aproximadamente el 1.5% del total.

El proceso de validación aplicado a la temperatura obtenida por el modelo puede resumirse en los siguientes puntos:

- El modelo es capaz de reproducir gran parte de la variabilidad del ciclo diurno de temperatura, así como la variabilidad de este parámetro debida a cambios drásticos en las condiciones atmosféricas, como el caso de la entrada de los frentes fríos.
- Los mínimos de temperatura provocados por los sistemas de alta presión que afectan a México pueden ser subestimados, sin embargo, se debe considerar que el caso de estudio representa un fenómeno atmosférico que ha sido calificado como extremo, por lo que los errores pudieran disminuir en otros casos.
- Los errores asociados a los pronósticos muestran que el pronóstico hasta 72 horas es bastante aceptable ya que, tanto la magnitud del RMSE como del MAE asociada a los pronósticos, es de aproximadamente 3°C en promedio, con una tendencia a subestimar este parámetro en menos de 1°C (BIAS).

Para el caso del viento se concluye que:

- El modelo reproduce satisfactoriamente los cambios drásticos en la dirección y magnitud del viento asociados al evento extremo.
- Los errores en magnitud se mantienen acotados entre 2 m/s y 5 m/s para cualquier magnitud de viento y aumentan en los casos del evento extremo, con errores menores a 50° en la dirección del vector, sin presentar un error sistemático en la dirección del viento.
- En condiciones de viento débil, alrededor de 5 m/s (18 km/hr), el modelo tiene mayores errores en la dirección del viento, sin preferencia por alguna dirección con respecto al vector de viento observado.
- En condiciones de vientos intensos, mayores a 17 m/s (~61 km/h), el modelo tiene menores

errores en dirección y subestima ligeramente la magnitud, al menos durante este evento.

- Los pronósticos 24 horas antes de un evento de norte son considerablemente mejores que los de 48 y 72 horas.

Recomendaciones

La magnitud de los errores calculados es menor que los obtenidos en otros estudios y los errores más grandes están asociados al paso de un frente frío considerado como extremo, por ello se sugiere analizar un periodo de tiempo más largo para conocer el desempeño del modelo en distintas condiciones meteorológicas y tener estadísticos más robustos.

Por otra parte, el conjunto de los resultados obtenidos con la aplicación del modelo WRF a la República Mexicana, permite inferir que el sistema de pronóstico numérico en tiempo real implementado reproduce con bastante precisión las condiciones atmosféricas de los sistemas que comúnmente afectan a México y las asociadas al evento extremo, por lo que su implementación de manera operativa ofrece grandes ventajas para el pronóstico del tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

Bosart, L. F., Archambault, H. M. and Cordeira, J. M., 2008. Flooding in southern Mexico, tropical cyclone Noel and intense European storm in late October and early November 2007: Linked weather systems?. 28th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology. Del 27 de abril al 2 de mayo del 2008.

Disponible en su sitio electrónico: <http://ams.confex.com/ams>

Brooks H.E., and C.A. Doswell, 1996: A comparison of measures-oriented and distributions-oriented approaches to forecast verification. *Wea. Forecasting*, **11**, 288-303.

Caballero, G., J. M., 2005: Predictibilidad de nortes en aguas mexicanas. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. 89 pp.

CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2008: Tabasco: Características e impactos socioeconómicos de las inundaciones provocadas a finales de octubre y a comienzos de noviembre de 2007 por el frente frío número 4. 231 pp.

DiMego, G. J., L. F. Bosart, and G. W. Endersen, 1976: An Examination of the Frequency and Mean Conditions Surrounding Frontal Incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 709–718.

Finley, J. P., 1884: Tornado predictions. *Amer. Met. J.*, **1**, 85-88.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I

to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Jolliffe, I. T. and Stephenson D. B., 2003: *Forecast verification: A partitioner's guide in atmospheric sciences*. John Wiley and Sons. 254 pp.

Jorba, O., Jiménez, P. y Baldasano, J.M., 2006. Simulación anual con elevada resolución especial para aplicaciones de la calidad del aire. Memorias de la XXIX Jornada Científica de la Asociación Meteorológica Española. Del 24 al 26 de abril del 2006. Pamplona, España.

Disponible en su sitio electrónico: <http://www.ame-web.org>

Jorba, O., Loridan, T., Jiménez G., P and Baldasano, J. M, 2008. Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe. Presentaciones del 9th Annual User's Workshop, del 23 al 27 de junio del 2008. Boulder, Co. USA.

Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parametrization: An update. *J. Applied Meteorology*, **43**, 170-181.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. Yang, J. J., Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.

Kundu, P. K., 1976: Ekman Veering Observed near Ocean Bottom. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 238-242.

Kusaka, H., Crook, A., Dudhia, J. and Wada, K., 2005: Comparison of the WRF and MM5 models for simulation of heavy rainfall along the Baiu Front. . *SOLA*, **1**, 197-200.

Pielke, R. A., 2001: *Mesoscale Meteorological Modelling*. 2nd Edition. Academic Press. 676 pp. Volumen 78 en la *International Geophysics Series*.

Schultz D. M., W. E. Bracken, L. F. Bosart, G. J. Hakim, M. A. Bedrick, M. J. Dickinson and K. R. Tyle, 1997: The 1993 superstorm cold surge: Frontal structure, gap flow, and tropical impact. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 5-39; Corrigendum, **125**, 662.

SMN, Servicio Meteorológico Nacional, 2007: Reseña del intenso frente frío número 4 en base a las notificaciones oficiales emitidas por el SMN.

Skamarock, W. C, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang and J. G. Powers: 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

Stauffer, D.R. and N.L. Seaman, 1990: Use of Four Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1250-1277.

Stenger, R. A., 2000: Sensitivity studies on a limited area mesoscale model: an examination of lateral boundary placement , grid resolution and nesting type. Air Force Institute Tecnology. Thesis for the degree of Master of Science in Meteorology, 215.pp.

Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp.

Willmott, C. J., 1982: Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **63**, 1309-1313.

Zielonka, J. R., Gaudet, B. J., Seaman, N. L., Stauffer, D. R., Deng A., and Hunter G.K., WRF and MM5 Realtime Systems: Statistical comparisons using the Model Evaluation Toolkit (MET). Presentaciones del 9th Annual User's Workshop, del 23 al 27 de junio del 2008. Boulder, Co. USA.

Referencias electrónicas:

CISL. Research Data Archive, 2008. Sitio electrónico que contiene los análisis finales del modelo GFS y datos de Reanálisis NCEPR2.

<http://dss.ucar.edu/>

Consultada en agosto del 2008.

CRWS. California Regional Weather Service, 2007. Imágenes infrarrojas satelitales.

<http://squall.sfsu.edu/>

Consultada en noviembre del 2007.

GFS, Global Forecast System, 2008. Sitio electrónico que contiene las salidas del modelo GFS.

<ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>

Consultada en agosto del 2008.

HPC, Hydrometeorological Prediction Center, 2008. Análisis de condiciones meteorológicas en superficie.

<http://www.hpc.ncep.noaa.gov/>

Consultada en mayo del 2008.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2008. Información geográfica de México.

<http://www.inegi.org.mx>

Consultada en agosto del 2008.

NDBC, National Data Buoy Center, 2008. Obtención de observaciones meteorológicas en el Golfo de México.

<http://www.ndbc.noaa.gov/>

Consultada en mayo del 2008.

NHC, National Hurricane Center, 2008. Reportes de ciclones tropicales correspondientes a la temporada 2007.

<http://www.nhc.noaa.gov/>

Consultada en mayo del 2008.

UCAR, University Corporation for Atmospheric Research, 2008a. Guía de usuarios del modelo WRF, versión 3.0.

http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html

Consultada en agosto del 2008.

UCAR, University Corporation for Atmospheric Research, 2008b. Sitio de desarrollo del modelo

MM5.

<http://www.mmm.ucar.edu/mm5>

Consultada en noviembre del 2008.

PGI, Portland Group, 2008. Compiladores para cluster.

<http://www.pgroup.com/>

Consultada en mayo del 2008.

Senado de la República, 2008. LX legislatura. Boletín de prensa B-0250. Accidente ocurrido en la Plataforma Usumacinta.

<http://comunicaion.senado.gob.mx/>

Consultada en octubre del 2008.

SMN, Servicio Meteorológico Nacional, 2008. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas.

<http://smn.cna.gob.mx/>

Consultada en agosto del 2008.

TRMM, Tropical Rainfall Measurement Mision, 2007. Estimación de precipitación por medio de satélite.

<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

Consultada en noviembre del 2007.