



03060

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFISICA  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

**PREDICTIBILIDAD DE NORTES  
EN AGUAS MEXICANAS**

**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

**Juan Manuel Caballero González**

Director de tesis:  
Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda

México, D.F.

2005

m346467



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Los puntos de vista expresados en este trabajo de investigación, son los considerados por el autor y no reflejan alguna política Oficial y/o posición, por parte de la Secretaria de Marina o por el Gobierno Federal.

Antes a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM e difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Juan Manuel Caballero

Gonzalez  
FECHA: 16 Junio 2005

FIRMA: [Signature]

*A mis Padres, quienes me han dedicado  
un gran esfuerzo, dándome su amor, cuidado y cariños,  
para que pudiera llegar hasta donde estoy*

*A Claudia, quien me ha apoyado en mis  
planes, sueños e ilusiones*

*A Fátima de Jesús, quien cambió completamente mi vida,  
dándome una gran felicidad y alegría, coincidiendo  
su llegada con el inicio de éste gran proyecto*

*A Gerardo, por ser un gran hermano y a mi Tío Gonzalo,  
quienes me han dado su apoyo incondicional,  
aunque algunas veces, la distancia nos separe*

## Agradecimientos

Antes que nada quiero agradecer a Dios, por haberme dado la fuerza y el espíritu, para emprender la noble aventura de efectuar un Posgrado en Ciencias.

A mi tutor, Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda, por guiarme para concluir a buen término, el trabajo de investigación, además de transmitir sus conocimientos y experiencia profesional. Al Dr. Ernesto Caetano Neto, por su buena disposición al atender cualquier duda durante mi estancia en el Centro de Ciencias de la Atmósfera. A los Drs. Aron Jazcilevich, Víctor M. Mendoza y Ricardo Prieto, por sus valiosos comentarios para mejorar éste trabajo. A los Drs. Amparo Martínez, Tomás Morales y Artemio Gallegos, por sus comentarios y aportaciones durante mi estancia en el CCA y en la campaña ECAC-V, a bordo del B.O. El Puma. A mis compañeros del Grupo de Meteorología Tropical en el CCA y demás colegas de Posgrado: José Luis Pérez, Carolina Neri, Alejandro Zitacuaro, Rosa Elena Morales, Miguel Pérez Sesma, Juan Matías, Baldemar Méndez, Edgar, Abraham Onofre, Joel Pérez, Sergio Abarca, Keyla Sosa, Lorena Cruz, Jorge Luis Vázquez, Vladimir Hernández y Genaro; quienes colaboraron con enseñanzas, aportaciones, comentarios y soluciones durante mi trabajo de investigación.

A la Secretaria de Marina, por darme la oportunidad de cursar el Posgrado en Ciencias de la Tierra, mientras continuaba en el servicio activo, prestando mis servicios en la Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología, con el compromiso de que el producto de éste esfuerzo, genere frutos a la Institución. Al Vicealmirante SIA. Ing. Nav. Edgar Fernando Narro y Quesada, Contralmirante C.G. DEM. Carlos Octavio Angulo Jiménez y Capitán de Fragata C.G. Juan Martín Aguilar Morales, por haber confiado en éste proyecto y tener sus puertas abiertas. Al Contralmirante C.G. DEM. Anastasio Francisco de Abiega Gámez y al Capitán de Navío C.G. DEM. Roberto González López, por haber depositado su confianza al inicio de éste proyecto. A los Capitanes de Corbeta C.G. Gabriel Balcazar Silva y Erwins Castro Montiel, así como a los Oficiales del CAPMAR (Tenientes Tagle, Salazar, Ancona, Hinojosa, Belmonte, Becerra, Cacho y Mtre. Anaya), por su apoyo en la Dirección de Meteorología Marítima.

Un agradecimiento especial a Gustavo Vázquez, quien me ayudó a dar mis primeros pasos en Linux, Fortran y con el MM5, bajo la conducción del Dr. Magaña.

A mis profesores Elías Piña y Alberto (quienes me ayudaron a entrar en el mundo de las matemáticas), por su apoyo académico, paciencia y disposición. Al *profesor nocturno* Oscar Sánchez, quien me aclaró dudas en diversos problemas y tareas.

A mi compañero y amigo, Arturo Caracas Uribe, buen colega y *hermano de armas*, quien *mantuvo firme la caña, pese al mal tiempo que tuvimos en la derrota de ésta nave* y en el que confió, para llevar al plano operativo, el proyecto de pronóstico numérico en SEMAR.

A mi esposa, Claudia, quien me apoyó incondicionalmente desde el inicio del Posgrado, dándome su comprensión y cariño, a pesar de que algunas veces pasamos poco tiempo juntos.

## - INDICE -

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Indice	V
<b>Introducción</b>	1
<b>Capítulo I</b>	
<b>Nortes: Definición, Impactos, Pronósticos y Ensamblés</b>	
1.1. Nortes	4
1.2. Impacto de los Nortes en las actividades socioeconómicas del país	10
1.3. Pronósticos numéricos de Nortes	12
1.4. Ensamblés y predictibilidad	14
<b>Capítulo II</b>	
<b>Metodología y Datos</b>	
2.1. El modelo numérico de mesoescala MM5	19
2.2. Metodología	23
2.3. Datos: Condiciones iniciales y asimilación	24
2.4. Variación de las condiciones iniciales y parametrizaciones físicas	28
2.5. Evaluación de ensambles de pronósticos	29
<b>Capítulo III</b>	
<b>Ensamblés de pronósticos de Nortes</b>	
3.1. Selección de los casos de Nortes	33
3.2. 1er caso de Norte (07 al 12 de abril 2003)	33
3.3. 2º caso de Norte (25 al 30 de octubre 2003)	51
3.4. 3er caso de Norte (21 al 26 de diciembre 2003)	65

## **Capítulo IV**

### **Conclusiones**

4.1	Importancia de la metodología de ensambles aplicada a Nortes	77
4.2	Resultados de la evaluación de los ensambles	79
4.3	Trabajo a futuro	80

### **Anexos y Referencias**

Anexo 1: - Escala “Beaufort” del viento	81
Anexo 2: - Terminología empleada en los ensambles de pronósticos	82
Referencias	84

## Introducción

Desde tiempos ancestrales, las condiciones meteorológicas sobre las áreas marítimas han sido determinantes para la navegación, pesca, explotación de recursos y más recientemente, actividades de recreación y deportivas. En la actualidad, los navegantes siguen siendo vulnerables a sufrir los embates de los elementos meteorológicos (Bowditch, 1995). Pero, a medida que ha avanzado la tecnología y gracias a organismos internacionales, esta vulnerabilidad se ha reducido, contándose en la actualidad con programas como el de Vigilancia Meteorológica Mundial, llevado a cabo por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2005), permitiendo un monitoreo permanente de todo el planeta, ante la amenaza de fenómenos hidrometeorológicos extremos.

En las Aguas Nacionales, se presenta un fenómeno meteorológico llamado *Norte* que afecta las actividades del ámbito Marítimo Nacional y que reduce la cadena productiva, afectando la navegación en el Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe. Bajo las condiciones de un Norte, los vientos soplan de dirección norte y aumentan su rapidez, alcanzando algunas veces una clasificación 8 de la escala Beaufort (17.5 m/s), generando un oleaje de hasta 5.5 m, por lo que la navegación marítima se torna extremadamente peligrosa.

El pronóstico numérico de Nortes en México, se realiza en forma determinística y con extensiones de hasta 72 horas. Las Instituciones que mantienen en forma operativa las predicciones numéricas son el Servicio Meteorológico Nacional y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SMN, 2005; CCA, 2005).

A pesar de que los modelos empleados en la predicción numérica del tiempo, tienen un alto grado de confiabilidad, también tienen errores, lo cual depende del grado de conocimiento de los fenómenos atmosféricos, la exactitud de los esquemas numéricos empleados por el modelo, la resolución espacial y temporal con la que se hayan configurado, la calidad y cantidad de datos meteorológicos y oceanográficos para construir las condiciones iniciales y de frontera, las parametrizaciones físicas, además de los datos topográficos que indican el tipo de suelo y la orografía. Los errores pueden minimizarse al construir ensambles de pronósticos, en donde debido al comportamiento caótico determinístico de la atmósfera, éstos pueden ser promediados reduciéndose considerablemente el error final (Krishnamurthi, et. al., 2002).

El empleo de ensambles de pronósticos permite conocer la incertidumbre en la predicción numérica, al conocer la dispersión de los miembros conforme aumenta el tiempo de pronóstico, además de generar pronósticos probabilísticos de alguna variable en particular que ayudan a identificar la probabilidad de que ocurran futuros eventos extremos. Esta técnica de ensambles de pronósticos, ha demostrado ser una herramienta de alto valor, para los tomadores de decisiones (Palmer, 2002).

La información previamente descrita ha servido como motivación para desarrollar el presente trabajo, con el fin de aplicar la metodología de ensambles de pronósticos en la predictibilidad de los Nortes. Además, se utilizaron los datos meteorológicos que se colectan en tiempo real en diversas redes de observación nacionales e internacionales. Se determinó la habilidad de pronóstico al evaluar el desempeño del mismo mediante técnicas objetivas, demostrando que la técnica de ensambles aplicada al pronóstico de Nortes, tiene un mejor desempeño que el emplear soluciones determinísticas.

## **Objetivo del estudio**

Aunque los modelos numéricos para la predicción del tiempo tienen una buena capacidad para pronosticar los Nortes, tienen errores en la predicción de la intensidad de los vientos, debido a las variaciones de las velocidades de propagación de la onda asociada en niveles medios y del frente frío en superficie, así como a las variaciones en la magnitud del viento.

Con los esquemas de predicción numérica empleados en forma operativa actualmente en nuestro país, no se conoce la incertidumbre en los pronósticos de Nortes y por lo tanto no se puede estimar la habilidad de pronóstico y límites de predictibilidad.

Se propone emplear una metodología de pronóstico numérico a mediano plazo (120 horas) por medio de la técnica de ensambles (soluciones probabilísticas en ves de determinísticas), aplicada en eventos de Nortes. En diversos estudios se ha demostrado que el pronóstico por ensambles tiene una mayor habilidad de predicción, al considerar la evolución en la integración en el tiempo de la función de densidad de probabilidad, donde puede estar integrada la solución y mostrarse en forma

probabilística, conociendo la predictibilidad de estos sistemas.

El esquema propuesto, será la base para explorar la posibilidad de llevar a cabo en forma operativa, un pronóstico de Nortes mediante ensambles, lo que beneficiará a los usuarios de la información meteorológica, al contar con una herramienta confiable para una mejor toma de decisiones, conociéndose la incertidumbre en los pronósticos y contar con mapas probabilísticos de eventos futuros, que en algunos casos puedan ser extremos.

# Capítulo I

## Nortes: Definición, impactos, pronósticos y ensambles

### 1.1 Nortes

#### Masas de aire y frentes

Las masas de aire relativamente uniformes y afines con las características físicas de su región de origen, se desplazan hacia otras regiones, modificando a su paso el estado del tiempo (Weisberg, 1976) y ocasionan algunas veces condiciones de tiempo severo. Tal es el caso de las masas de aire polar continental que en invierno llegan a México (Di Mego, et. al. 1976). Cuando dos masas de aire de distintas características se encuentran, se dice que ocurre un frente, el cual puede ser frío o cálido (Bluestein, 2000).

Un frente frío, se genera cuando una masa de aire frío avanza y desplaza a una masa de aire cálido, lo que resulta en una frontera entre una atmósfera baroclínica y una barotrópica (Di Mego, et. al. 1976), con una rápida transición del campo térmico, acompañado por un cambio en la dirección del viento (Blumen, 2003). La interacción entre las dos masas de aire, genera vientos en los niveles bajos de la tropósfera (desde la superficie hasta el nivel de 700 mb), propiciando la formación de una línea frontal con una longitud de cientos a miles de kilómetros, de una anchura en superficie de unas cuantas decenas de kilómetros. A lo largo de ésta, se desarrollan nubes cumulus produciendo abundante nubosidad, que en ocasiones provoca precipitación a su paso (Magaña, et. al. 1999), como en las cordilleras del este de México.

Al paso del frente se observa una disminución en la presión atmosférica por la convección desarrollada, la cual aumenta después del cruce de la línea frontal, con cambio de hasta 20 milibares en 24 horas; el viento en superficie cambia de dirección del sureste al oeste y posteriormente al norte, con un considerable aumento en la rapidez, disminución de la humedad relativa y descenso de la temperatura del aire de hasta  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  en 24 horas (Dickinson, et. al., 1997; Schultz, et. al. 1997; Steenburg, et al. 1998).

Las penetraciones de aire frío sobre el Golfo de México, provenientes de latitudes medias,

presentan una estrecha relación con la posición de la corriente de chorro subtropical (DiMego, et al., 1976) y con los patrones de circulación a escala sinóptica y planetaria (Colle, et. al, 1995), contribuyendo a la duración e intensidad de éstas debido a dos factores: una alta presión persistente en el nivel de 200 milibares sobre el oeste de los EE.UU. y una confluencia en el mismo nivel sobre el Golfo de México (Schultz, et. al., 1998). Estos sistemas son ondas de escala sinóptica que se forman al este de las montañas Rocallosas o de la Sierra Madre y se propagan hacia el ecuador, constituyendo un ejemplo de la interacción entre trópicos y latitudes medias (Dickinson, 1997; Steenburg, 1998).

En el Golfo de México, los frentes fríos provienen de la región sur de los EE.UU., cruzan el Golfo de México, se bifurcan con una extensión hacia el Océano Pacífico a través del Istmo de Tehuantepec y la otra continúa su avance internándose en el Mar Caribe (Di Mego, et.al. 1976). Las incursiones de aire frío en el Golfo de Tehuantepec, generan una banda nubosa perpendicular a la dirección del viento, quedando detrás de ésta una amplia zona libre de nubosidad (Schultz, et. al., 1998).

## **Nortes**

Los Nortes son eventos de tiempo extremo, caracterizados por la presencia de fuertes vientos en superficie que corren en dirección norte – sur, en el Golfo de México y sus planicies costeras, en el Mar Caribe dentro de la región de los Mares Intra-Americanos (Steenburg, et al. 1998); y en el Océano Pacífico Nororiental en el Golfo de Tehuantepec (Bourassa, et. al., 1999; Chelton, et. al., 2000a). Un Norte está asociado a una incursión de aire frío proveniente de latitudes medias en su avance hacia el ecuador, penetrando hacia el interior del Golfo de México y América Central. Los Nortes, también reciben el nombre de “chocolateros” en el Golfo de México (Geer, 2003) y en el Golfo de Tehuantepec se les denomina “Tehuantepecanos” (Parmenter 1970; Roden 1961) o Tehuanos (Alvarez et al. 1989; Trasviña et al. 1997).

La incursión de un frente frío en el Golfo de México puede ocurrir durante todo el año. En el verano, sólo se internan ocasionalmente a la región norte del Golfo de México, pero su frecuencia y grado de penetración hacia los trópicos aumenta rápidamente de septiembre a octubre alcanzando un máximo durante enero y febrero, y una disminución acelerada hacia principios de mayo (Di Mego et,

al., 1976). Debido a que los Nortes están asociados al ingreso de un frente frío, se considera que su temporada anual ocurre desde mediados del otoño hasta mediados de la primavera (Schultz, et. al. 1997), o sea prácticamente desde octubre hasta mayo, con un promedio de 21 eventos por año (Vázquez A., 2000).

Generalmente los Nortes tienen una duración de más de un día, aunque su permanencia en el Golfo de México varía, dependiendo de la velocidad con que se desplaza la onda en niveles medios de la tropósfera, proveniente de las latitudes medias (Steenburg, et. al., 1998). Sus efectos pueden sentirse desde el día que cruza la línea frontal, hasta cerca de dos semanas después (Reding, 1992; Schultz et. al., 1997).

Los Nortes alcanzan el Océano Pacífico incursionando en el Golfo de Tehuantepec, favorecidos por el hueco de la orografía de la Sierra Madre del sur, donde la altitud promedio de 2000 metros sobre el nivel del mar (msnm), desciende drásticamente hasta los 250 msnm, creando un corredor de 40 km, llamado “Paso de Chibela” (Schultz et.al 1997), favoreciendo vientos de componente norte en ésta área.

A pesar de que el invierno se distingue por las condiciones secas en la mayor parte de la región, es posible distinguir un régimen de lluvias para el invierno sobre la vertiente del Golfo de México, Noroeste del Mar Caribe y en el Golfo de Tehuantepec; debido a la ocurrencia de Nortes (Magaña, et. al., 1999; Magaña, et. al., 2003).

## **Evolución de los Nortes**

De acuerdo a lo propuesto por Vázquez (2000), los eventos de Norte están asociados con un descenso de temperatura en 24 horas, por lo que un criterio objetivo para identificar las fechas en que ocurren éstos, es cuando la temperatura máxima presenta un descenso de más de 2 °C en 24 horas y el promedio del viento en una amplia región tiene una dirección del norte, más menos 45°, es decir, el intervalo cerrado de las direcciones comprendidas entre el noroeste (315°) y el noreste (045°). De esta manera, se define la fecha principal de Norte como aquella que cumple con las condiciones:

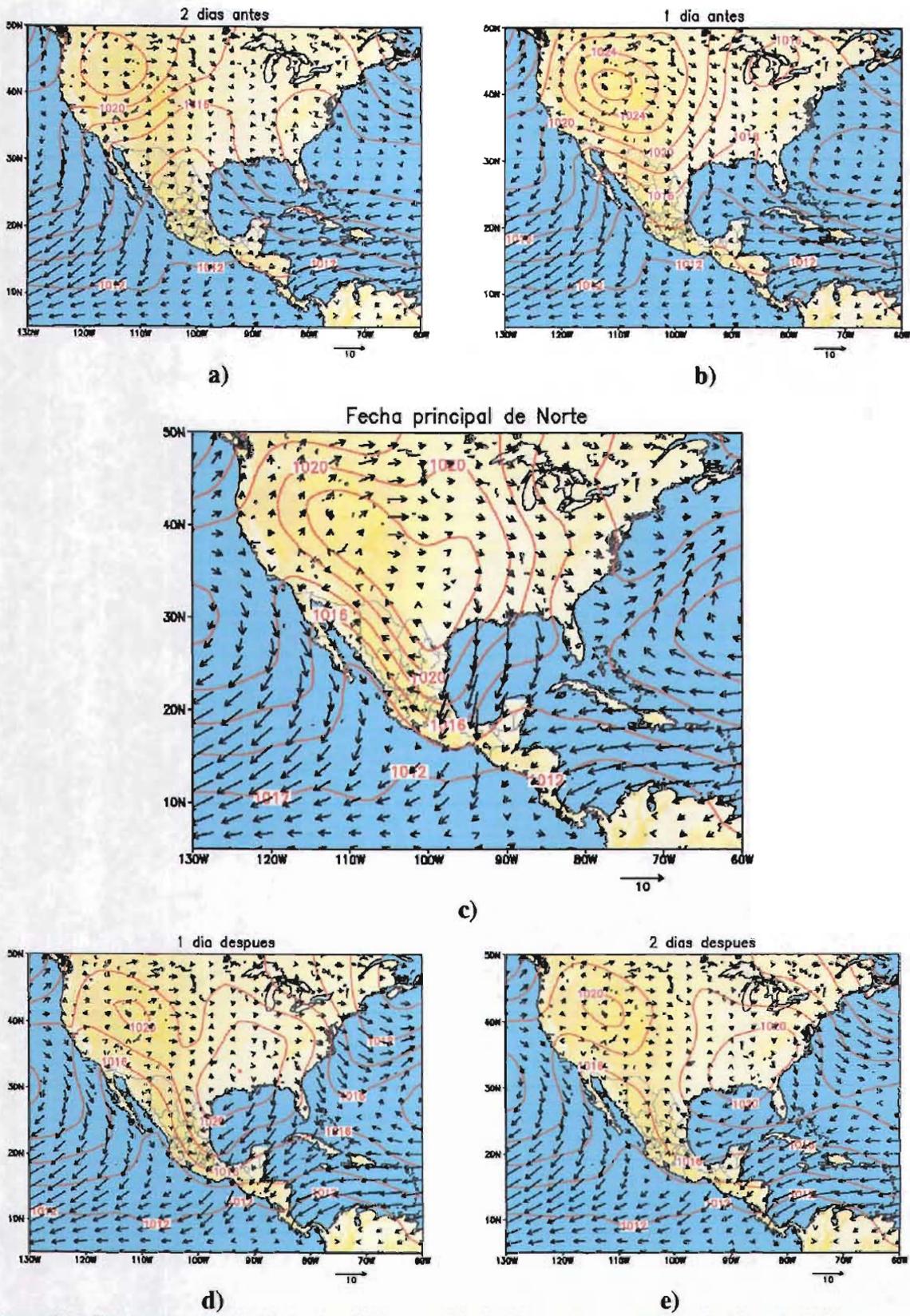
$$\Delta T_{\max} \geq 2^{\circ} \quad \dots (1.1)$$

$$NW \geq \theta_{rg} \geq NE \quad \dots (1.2)$$

donde  $\Delta T_{max}$  es el cambio de temperatura máxima en 24 horas y  $\theta_{rg}$  es la dirección del viento en una región de cientos de kilómetros en el Golfo de México.

La evolución de los Nortes se muestra en las condiciones meteorológicas desde 48 horas antes de la fecha principal de Norte y hasta 48 horas a posteriori, mediante el patrón compuesto de 964 casos de Norte, analizando las condiciones de la presión reducida a nivel del mar (PRNM) y viento a 925 mb:

- **2 días antes:**- Formación de una alta presión en el noroeste de los EE.UU., vientos del este y sureste en el Golfo de México y Mar Caribe, en el Golfo de Tehuantepec los vientos son débiles, del norte (figura 1.1a).
- **1 día antes:**- Se mantiene la alta presión en el noroeste de los EE.UU., formación de una baja presión sobre los grandes lagos, de la que se desprende un frente frío hacia el sureste hasta la costa noroeste del Golfo de México, ocasiona vientos del norte en esa región, mientras que en el resto del Golfo, los vientos son del este y sureste, que en ocasiones se intensifican llamándose *surada*. (figura 1.1b).
- **Fecha principal de Norte:**- La alta presión sobre el centro de los EE.UU., se desplaza hacia el sur. El frente frío se ubica desde una baja presión sobre la costa este de los EE.UU., hasta la costa suroeste del Golfo de México. En la región oeste y central del Golfo de México, se observan fuertes vientos del norte. En el Golfo de Tehuantepec, los vientos cambian del norte y se intensifican (figura 1.1c).
- **1 día después:**- La alta presión en el sur de los EE.UU. se debilita. La línea frontal se extiende desde la baja presión en la costa este de los EE.UU. hasta la costa noroeste del Mar Caribe. Los vientos continúan del norte en todo el Golfo de México pero son más débiles frente a la costa de Texas y Tamaulipas. En el Golfo de Tehuantepec, los vientos alcanzan las máximas magnitudes en esta región. En el Mar Caribe, se observan vientos del norte y noroeste detrás de la línea frontal (figura 1.1d).



**Figura 1.1** – Patrón compuesto de Nortes (condiciones medias de 934 casos) con presión reducida a nivel del mar y viento a 925 mb: a) dos días antes, b) un día antes, c) fecha principal de Norte, d) un día después y e) dos días después (Tomado de Magaña, et. al., 1999).

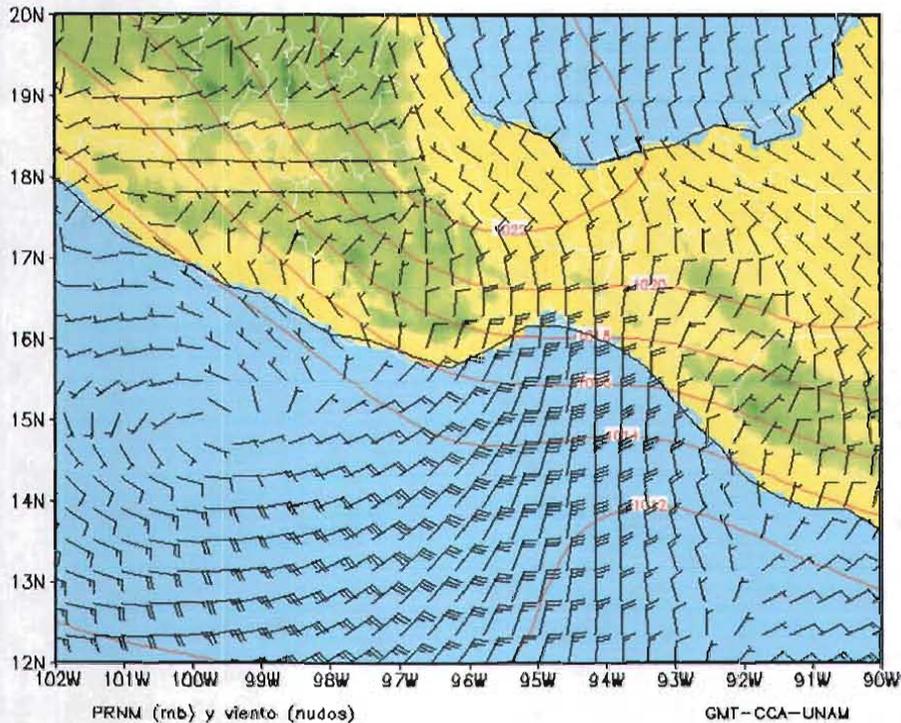
- **2 días después:**- La alta presión débil se mueve hacia el norte de Florida. La línea frontal se extiende desde el Océano Atlántico noroccidental hasta la costa de Honduras. Los vientos en el Golfo de México disminuyen y en su región occidental cambian del este y sureste. En el Golfo de Tehuantepec, los vientos prevalecen del norte pero con menor intensidad. En la región occidental del Mar Caribe, los vientos son del noreste detrás de la línea frontal (figura 1.1e).

### **Viento y oleaje con Nortes**

Las circulaciones anticiclónicas asociadas a la onda de latitudes medias, ocasionan en el Golfo de México y en el noroeste del Mar Caribe, vientos de 10 a 15 m/s durante eventos débiles, es decir, cuando existe un cambio en la presión de 8 a 12 milibares, entre el sur de los EE.UU. y el sur del Golfo de México. Con un evento de Norte extremo, el viento alcanza los 40 m/s, ocasionado por un cambio mayor en la presión ( $\Delta P > 20$  milibares) (Schultz et. al., 1998).

El efecto orográfico a través del Paso de Chibela y el gradiente de presión con respecto al Golfo de México, producen que la rapidez del viento aumente en el Golfo de Tehuantepec, alcanzando velocidades de hasta 49 m/s, con rachas de 60 m/s (Stumpf, 1975), siguiendo una trayectoria inercial (figura 1.2), volviéndose una gran parte del flujo anticiclónico hacia el oeste después de haber dejado la costa (Clarke, 1988) y sólo una ligera proporción del flujo tiene un giro ciclónico hacia el este (Chelton et al., 2000b).

Los Nortes se extienden cientos de kilómetros sobre el Océano Pacífico, algunas veces alcanzando los 07° de latitud norte (Schultz et al. 1997); producen un marcado descenso de la temperatura de la superficie del mar (TSM), de 6 °C a 12 °C por surgencia (Barton et al. 1993); generan turbulencias oceánicas de gran extensión y cambios en las corrientes oceánicas (Trasviña et al. 1995; Gallegos y Barberán 1998), e incrementan la cantidad de nutrientes y fitoplancton (Müller-Karger y Fuentes-Yaco 2000).



**Figura 1.2** – Flujo inercial del viento en superficie (10 m) y extensión de un Norte sobre el Golfo de Tehuantepec, el día 10 de abril del 2003 a las 12:00 horas Z. Fuente de los datos: Reanálisis, NCEP.

El oleaje producido por un Norte, está asociado a la dirección y velocidad del viento y al efecto de pista (fetch). La escala Beaufort del viento (anexo 1), indica que para una rapidez del viento de 10 m/s, corresponde un oleaje asociado de 1.8 a 2.4 m, pero con una intensidad del viento de 17.5 m/s, el oleaje asociado es de 5.5 m y para eventos extremos de 25 m/s el oleaje asociado es de 9 m. El oleaje generado por Nortes en el Golfo de Tehuantepec, llega a tener efectos prácticamente hasta las Islas Galápagos, 1600 kilómetros al sur (Hurd, 1929). Otros impactos de los Nortes en el medio ambiente tropical son, el cambio en la intensidad de los alisios y la localización e intensidad de la Zona Intertropical de Convergencia, o inclusive retroalimentaciones a fenómenos de gran magnitud como El Niño-Oscilación del Sur (Schultz, et. al., 1997).

## 1.2 Impacto de los Nortes en las actividades socioeconómicas del país

Cada evento de Norte ocasiona daños directos e indirectos en las actividades socioeconómicas del país. Si el promedio anual es de 21 Nortes, con una duración media de 3 días, en un año se pueden tener 63 días de afectación.

Durante los últimos 25 años, los desastres de tipo hidrometeorológico (Nortes, huracanes, lluvias extremas, granizadas, heladas y sequías) han conformado un 43.8%, al contarse junto con los del tipo geológico (temblores, volcanes) o del tipo antropogénico. Los daños directos e indirectos generados por desastres hidrometeorológicos en México, ascienden en promedio a 230 muertos anuales y pérdidas por daños totales de 230 millones de dólares (Bitran, 2001).

Las condiciones del tiempo son esenciales para las *operaciones navales*. El viento y el estado de la mar afectan el rumbo y la trayectoria de un buque, la limitación de la visibilidad perjudica el pilotaje, el estado de la atmósfera afecta la navegación electrónica así como a las radio y telecomunicaciones. Aunque existen en nuestros tiempos buques modernos y con una gran tecnología, éstos siguen siendo afectados considerablemente por el viento y el oleaje (Bowditch, 1995).

Las *actividades marítimas* son afectadas por los fuertes vientos y el oleaje asociado a un evento de un Norte, ocasionando que sean afectadas todas las rutas de navegación, las operaciones portuarias de carga y atraque de buques en los puertos de altura, así como la pesca de arrastre, ribereña y altura. Los Nortes provocan pérdidas económicas considerables para armadores de barcos, cooperativas pesqueras, administraciones portuarias integrales, prestadores de servicios turísticos y maniobristas en puertos.

Los descensos de temperatura por Nortes y frentes fríos, provocan que en las zonas altas de la Sierra Madre Oriental y en el Altiplano Mexicano, se implementen medidas de **protección civil** por las bajas temperaturas del aire en superficie, nevadas, granizadas, lluvias extremas y vientos fuertes; éstos últimos derrumban postes con líneas eléctricas, árboles, techos de lámina y anuncios espectaculares en calles y avenidas de las zonas urbanas, afectando a la población en general.

La turbulencia generada por la zona convectiva a lo largo de la línea frontal y la reducción de visibilidad por formación de nubosidad baja y media del tipo stratocumulus afecta las **operaciones aéreas**, causando atrasos o cancelaciones en aterrizajes y despegues.

Un gran número de plantas generadoras de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se ubican en el área de Nortes. Los descensos de temperatura ocasionan un incremento en el consumo

de combustible y en la demanda por los usuarios. Otras afectaciones en CFE son: corto circuito por acumulación de sales en líneas ubicadas en zonas costeras y caída de postes y torres de alta tensión con líneas de distribución y transmisión (Sansón, 2004).

La mayor parte del petróleo se extrae desde la costa de Tamaulipas hasta la Sonda de Campeche, donde se ubican barcos, plataformas hotel y complejos de producción y de perforación en altamar. Una buena parte del personal es transportado a bordo de helicópteros, los cuales ante eventos de Norte severos, aumentan su vulnerabilidad durante las maniobras de anaveaje y despegue, ocasionando que los vuelos se cancelen. Los Nortes ocasionan anualmente más afectaciones a Petróleos Mexicanos que los huracanes, por lo que un pronóstico efectivo es más que necesario para esta dependencia, (Vázquez, 2005).

En *actividades agropecuarias*, el impacto se observa en plantaciones de café y cítricos en el este y noreste de México, debido a la ocurrencia de heladas intensas ocasionadas por el descenso de temperatura y baja humedad relativa en el altiplano (García, 1996). Otros sectores afectados son el de *turismo* y el de *Defensa*.

### 1.3 Pronósticos numéricos de Nortes

Un pronóstico numérico del tiempo, es aquel sistema que realiza una predicción de las condiciones de la atmósfera y el océano mediante métodos numéricos que resuelven las ecuaciones que describen el comportamiento físico de la atmósfera y el océano (OMMa, 1998).

Los modelos numéricos en la atmósfera se dividen en dos grandes categorías:

- Modelos de circulación global: Cubren todo el planeta y no contienen condiciones de frontera.
- Modelos de área limitada: También llamados de mesoescala, ya que tienen la capacidad de simular o pronosticar sistemas de mesoescala  $\alpha$  y  $\beta$  (Orlansky, 1975), con mayor habilidad que un modelo global, al emplear anidamientos o dominios interiores dentro del dominio madre (Dudhia, et. al., 2005). Para crear las condiciones iniciales y de

frontera, requieren los datos de un modelo global o de un modelo regional, a tiempos posteriores ( $t > 0$ ).

En Internet se encuentran las salidas de algunos modelos globales, mostradas en gráficos de pronósticos cubriendo el área de afectación de Nortes, los cuales son el “Global Forecast System” (GFS) y el “Navy Operational Global Atmospheric Prediction System” (NOGAPS); mientras que los de tipo de área limitada son el “North American Model” (NAM), el “Nested Grid Model” (NGM), el “Rapid Update Cycle” (RUC), el “Coupled Ocean Atmospheric Model Prediction System” (COAMPS), el “Weather and Research Forecast” (WWR) y el MM5. Este último se describirá con más detalle en el capítulo 2.

En México, el modelo MM5 se emplea en forma operativa por el Servicio Meteorológico Nacional con pronósticos válidos por 72 horas y por el Centro de Ciencias de la Atmósfera con extensión de pronóstico a 36 horas. Ambos cubren la totalidad del país y por lo tanto, el área de ocurrencia de Nortes.

Los pronósticos descritos anteriormente, son del tipo determinístico, los cuales generan errores en las condiciones iniciales por los esquemas de análisis objetivo empleados o por deficiencias en los esquemas numéricos de la predicción, además de que las ecuaciones no consideran todos los procesos físicos; por lo que cada modelo genera errores desde el inicio de la predicción numérica, los cuales crecen paulatinamente con el tiempo de predicción, hasta que llegan a perder su habilidad de pronóstico.

Los errores generados en la predicción numérica, generan una incertidumbre en la confiabilidad de los pronósticos. Al emplearse en forma determinística un modelo numérico, es decir, ejecutarlo una sola ocasión, no permite que se conozca la incertidumbre en el pronóstico, por lo que se tiene una limitación al ocupar las predicciones determinísticas.

Una nueva técnica de pronóstico que permite conocer la incertidumbre en las predicciones numéricas, es conocida como, pronósticos de conjuntos o comúnmente llamada, ensambles de pronósticos, la cual se describirá con más detalle a continuación.

## 1.4 Ensamblajes y predictibilidad

### La teoría del Caos

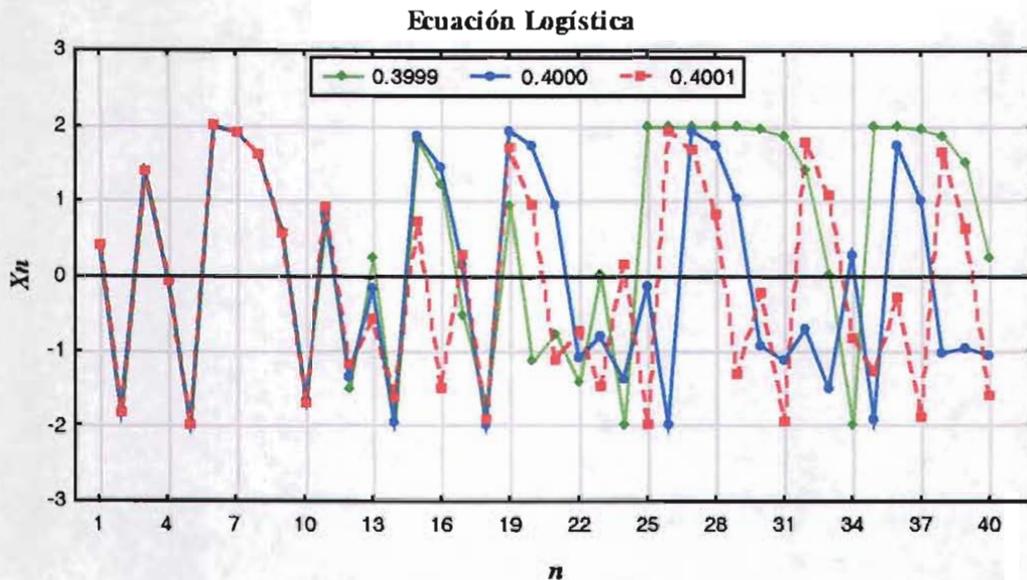
La *teoría del caos* es uno de los principales progresos científicos del siglo XX (Kalnay, 2003). Los sistemas caóticos son descritos por ecuaciones determinísticas exactas en la evolución, pero tienen comportamiento imprevisible y aparentemente al azar. El caos puede ocurrir cuando estas ecuaciones son no-lineales e inestables con pequeñas perturbaciones. La *atmósfera* es un *sistema caótico* y consecuentemente, los pequeños errores en la estimación del estado actual de la atmósfera tienen un impacto en el pronóstico. Debido al número limitado de las observaciones disponibles y la distribución no uniforme de éstas alrededor del mundo, hay siempre una incertidumbre en la estimación del estado actual de la atmósfera (Palmer, 1999). El *caos* se puede encontrar aún en sistemas muy simples y la *no linealidad* es una de las *condiciones necesarias para el caos*.

En la fig. 1.3, la línea continua azul muestra la secuencia de los números  $X_1, X_2, X_3$ , etc., hasta  $X_{40}$ , comenzando en la condición inicial  $X_1 = 0.4$ . Al cambiar ligeramente el valor con  $X_1 = 0.4001$ , se crea un pequeño error en las condiciones iniciales (la línea punteada roja, demuestra qué sucede). Para los primeros 13 pasos, parece que un error inicial pequeño no afecta el resultado, pero después las dos secuencias de números llegan a ser diferentes. Lo mismo se aprecia si  $X_1 = 0.3999$  (línea punteada en verde claro). Cada solución en el paso 30 es completamente diferente a las otras e inclusive de signo opuesto. Este comportamiento demuestra la presencia de caos (las pequeñas diferencias iniciales pueden conducir a predicciones totalmente diferentes). La fórmula en este ejemplo, es una versión de la ecuación logística (Arfken y Weber, 2001), usada en el estudio del crecimiento de la población:

$$X_{n+1} = X_n^2 - a \quad \dots \quad (1.3)$$

donde  $a = 2$

Los puntos iniciales diferentes pueden considerarse como estimaciones del verdadero estado del sistema y la evolución de cada uno de ellos como un posible pronóstico. Sujetos al estado inicial verdadero del sistema, puntos muy cercanos en el tiempo inicial, divergen al transcurrir el tiempo con diferentes rangos, luego entonces, dependiendo del punto escogido para describir la evolución del sistema en el tiempo, se obtienen diferentes pronósticos.



**Figura 1.3** - Graficación de la ecuación logística, mostrando el comportamiento caótico del sistema, al variar ligeramente el valor inicial.

## Ensamblados de pronósticos

Es un conjunto de dos o más soluciones de predicciones numéricas del tiempo, derivadas de diferentes condiciones iniciales y/o modelos numéricos, válidas para la misma **área, variable o región** y para el mismo tiempo de pronóstico; es también conocido como pronóstico de conjuntos. Es una innovación de la predicción numérica, siendo una herramienta muy útil para los pronosticadores del tiempo. (Palmer, 1999; Kalnay, 2003; Eckel, 2003).

El propósito del ensamble de pronósticos, es producir una función de densidad de probabilidad (FDP) del pronóstico de los posibles estados de la atmósfera, desde la cual, el **verdadero estado** es consistentemente una muestra aleatoria (Eckel, 2003). Al alcanzar este objetivo, el ensamble de pronósticos tiene tres aplicaciones generales (Epstein 1969; Leith 1974):

1. Usar el ensamble promedio para mejorar la habilidad de los pronósticos determinísticos y maximizar su predictibilidad.
2. **Predecir la habilidad** del pronóstico usando la dispersión del **ensamble**.
3. **Pronosticar la probabilidad** de eventos **meteorológicos** futuros.

Otra **aplicación derivada del ensamble** es reconocer **áreas donde sistemáticamente se presenta**

una gran incertidumbre en el pronóstico, debido a orografía compleja o por ausencia de datos meteorológicos, como pueden ser las áreas oceánicas (Kalnay, 2003).

El método tradicional de hacer predicción numérica del tiempo, es realizar las predicciones con un modelo numérico y usar diferentes parametrizaciones de procesos físicos que han mostrado un buen desempeño, realizando predicciones hasta que el modelo pierde habilidad de pronóstico, ocasionado por el crecimiento de los errores de las condiciones iniciales. El promedio del ensamble puede resultar en el mejor pronóstico, debido a que los promedios sobre los posibles estados iniciales *suavizan* la naturaleza caótica de la atmósfera, con lo que es posible pronosticar las probabilidades de las diferentes condiciones del sistema. (Weickmann, et. al., 2004).

Los ensambles de pronósticos han resultado ser una buena herramienta al ser contemplados como entrada para un modelo de toma de decisiones simple, debido a que los pronósticos probabilísticos del tiempo y el clima tienen un gran potencial en su valor económico, comparado con las decisiones tomadas con un pronóstico determinístico, en el cual no se conoce la exactitud de la incertidumbre (Buizza, 2001; Palmer, 2002; Zhu, et. al., 2002; McQueen, et. al., 2004).

Una técnica reciente para crear ensambles es la de *asimilaciones de datos múltiples*. Crea las condiciones iniciales con diferentes esquemas de asimilación de datos (Houtekamer y Mitchel, 1998). En cada esquema de asimilación se adicionan errores aleatorios por las observaciones y se incluyen diferentes parametrizaciones de procesos físicos, con lo que se puede ver el impacto de parametrizaciones en particular y por lo tanto el desempeño de cada una de ellas (Kalnay, 2003). Hamill et. al. (2000) mostraron que en un sistema quasi-geostrófico, esta técnica tiene un mejor desempeño que la metodología de vectores singulares o la técnica de “breeding”, aunque esto requiere de un costo de computo alto.

Otra técnica es la de *ensamble multimodelo*, la cual ocupa las salidas de diferentes modelos numéricos como miembros del ensamble. En ésta técnica están implícitas diferentes condiciones iniciales, esquemas de métodos numéricos y parametrizaciones físicas (Mass, 2002).

## Predictibilidad

Se entiende como *predictibilidad*, al *grado* en que es posible pronosticar el estado futuro de las condiciones atmosféricas (OMM, 1998). La predictibilidad, se puede encontrar con algunas variables en particular, como temperatura en superficie, TSM, PRNM, rapidez del viento, etc.; estando inherentemente limitada por los errores generados en la formulación de los modelos numéricos (Geer, 2003), así como por la sensibilidad de condiciones iniciales imprecisas, generando incertidumbres que ocasionan la pérdida de predictibilidad (Eckel, 2003).

A pesar del aumento en la precisión de los pronósticos meteorológicos, todavía hay un elemento de incertidumbre en todas las predicciones, por lo que existe un gran esfuerzo en la investigación meteorológica, dedicado a encontrar el *límite de predictibilidad* (investigación sistemática de la extensión temporal a la cual es posible predecir un sistema), en escalas de tiempo de unos cuantos días, mensuales e inclusive estacionales (Kalnay, 2003).

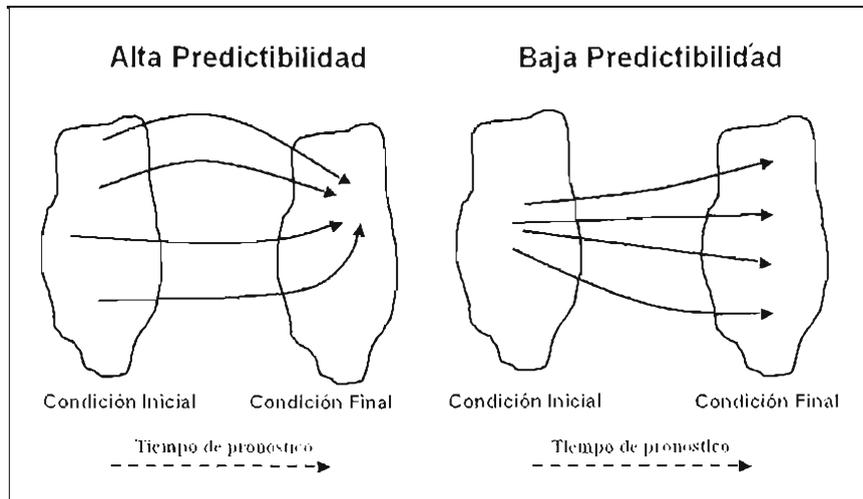
Un ensamble promedio no sólo mejora la habilidad de los pronósticos determinísticos, sino también maximiza la predictibilidad. Una falsa idea que se puede generar al utilizar un ensamble de pronósticos, es que éste puede extender el límite de predictibilidad de la atmósfera, sin embargo los límites de predictibilidad están establecidos primeramente por los análisis del error. El ensamble de pronósticos no corrige el error, pero usa éste como una base para estimar el crecimiento del error durante el período de pronóstico. Luego entonces, el ensamble de pronóstico no extiende la predictibilidad pero puede revelar el *límite de predictibilidad* (Eckel, 2003).

La predictibilidad se asocia a:

- 1er tipo:** El crecimiento de los errores en problemas de condición inicial, tal como el pronóstico del tiempo.
- 2º tipo:** Las respuestas del sistema por forzamientos externamente impuestos, por ejemplo, la respuesta del sistema climático al cambiar los niveles de gases de invernadero.

¿Cuándo se puede decir que un sistema tiene alta o baja predictibilidad? En un esquema con

alta predictibilidad (figura 1.5), las soluciones parten con una gran dispersión en la condición inicial, pero en la condición final después de un tiempo de pronóstico, convergen en un área reducida con poca dispersión. Con baja predictibilidad, aunque las soluciones parten de una condición inicial con poca incertidumbre, divergen conforme aumenta el tiempo de pronóstico, llegando a la condición final con una gran dispersión.



**Figura 1.5** – Esquemas de alta predictibilidad (las soluciones convergen en un área reducida) y de baja predictibilidad (con una gran dispersión en las soluciones).

Los sistemas de mesoescala  $\alpha$  y los de escala sinóptica, actúan como sistemas turbulentos bidimensionales, por lo que poseen mayor predictibilidad inherente (del orden de días) en comparación con sistemas convectivos a escalas de nubes, los cuales actúan como turbulencias tridimensionales con una predictibilidad del orden de unas cuantas horas o menos (Mass, et. al., 2002).

En cuanto a la predictibilidad en modelos de área limitada, Ehrendorfer y Errico (1995), revelaron que los errores de las condiciones iniciales pueden crecer rápidamente, ya que los mecanismos de control del crecimiento de los errores del pronóstico y la pérdida de predictibilidad son todavía pobremente entendidos (Zhang, et. al., 2002).

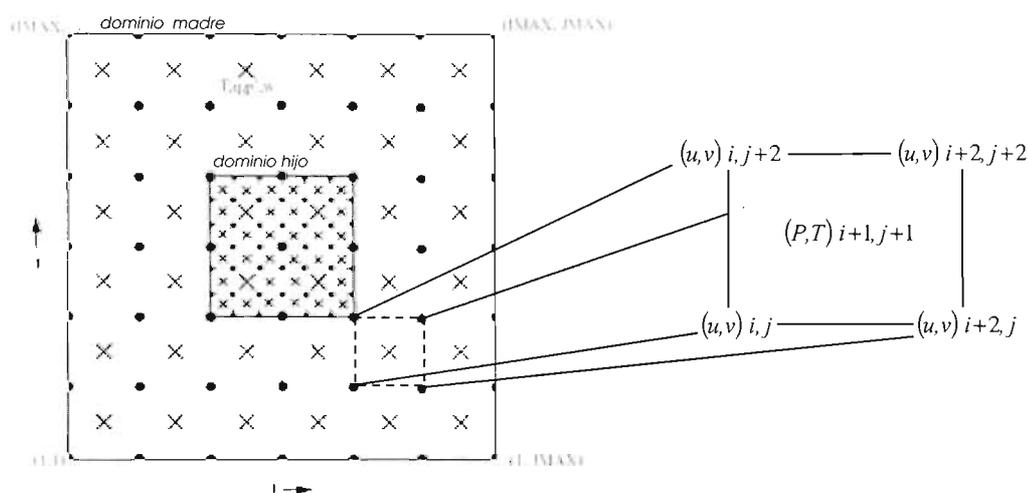
## Capítulo II

### Metodología y Datos

#### 2.1. El modelo numérico de mesoescala MM5

El modelo numérico de mesoescala versión 5, mejor conocido como MM5, fue desarrollado en la Universidad Estatal de Pennsylvania a principios de los 70's (Antes y Warner, 1978) y posteriormente enriquecido por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés) en los EE.UU. (Dudhia, et. al., 2005).

El MM5 es un modelo no hidrostático que emplea la ecuación de continuidad de masa compresible. Resuelve las ecuaciones en términos de flujos y en coordenadas verticales sigma para sistemas atmosféricos de mesoescala. Emplea esquemas de diferencias finitas adelantadas para la solución del termino  $\delta/\delta t$ , usando el método semi-implícito en tiempo sobre una malla Arakawa tipo B (figura 2.1). Se puede emplear a resoluciones muy altas (1 kilómetro), utilizándose en estudios de sistemas convectivos de mesoescala, frentes, brisas de mar-tierra, circulaciones de montaña y valle e inclusive en islas urbanas de calor (Dudhia, et. al., 2005). Horizontalmente, todas las ecuaciones son escritas en mapas de proyección Lambert conformales, estereográfico polares, o Mercator; permitiendo que el MM5 se pueda aplicar para cualquier región del planeta.



**Figura 2.1** - Malla Arakawa tipo B ( $i$  y  $j$  representan el punto de posición dentro de la malla;  $u$ ,  $v$ ,  $P$  y  $T$  representan los parámetros asignados para tales puntos). Tomada de Dudhia et al., 2005.

Las coordenadas verticales siguen el contorno del terreno, estando definidas como:

$$\sigma = \frac{p_0 - p_t}{p_s - p_t} \quad . . . . (2.1)$$

donde  $p_0$  es la presión de referencia que depende solamente de un estado de referencia constante,  $p_t$  es la presión en la altura tope del modelo, y  $p_s$  es la presión en la superficie. Debido a que ni  $p_t$  ni  $p_s$  cambian con el tiempo, sigma es constante en el tiempo.

El MM5 está dividido en varios módulos: TERRAIN, REGRID, RAWINS/little\_r, INTERP\_F y MM5. Cada módulo realiza funciones específicas dentro del procesamiento de los datos que requiere el modelo. En la figura 2.2 se muestra la carta de flujo de los datos, con el orden de los módulos, los cuales se describen a continuación:

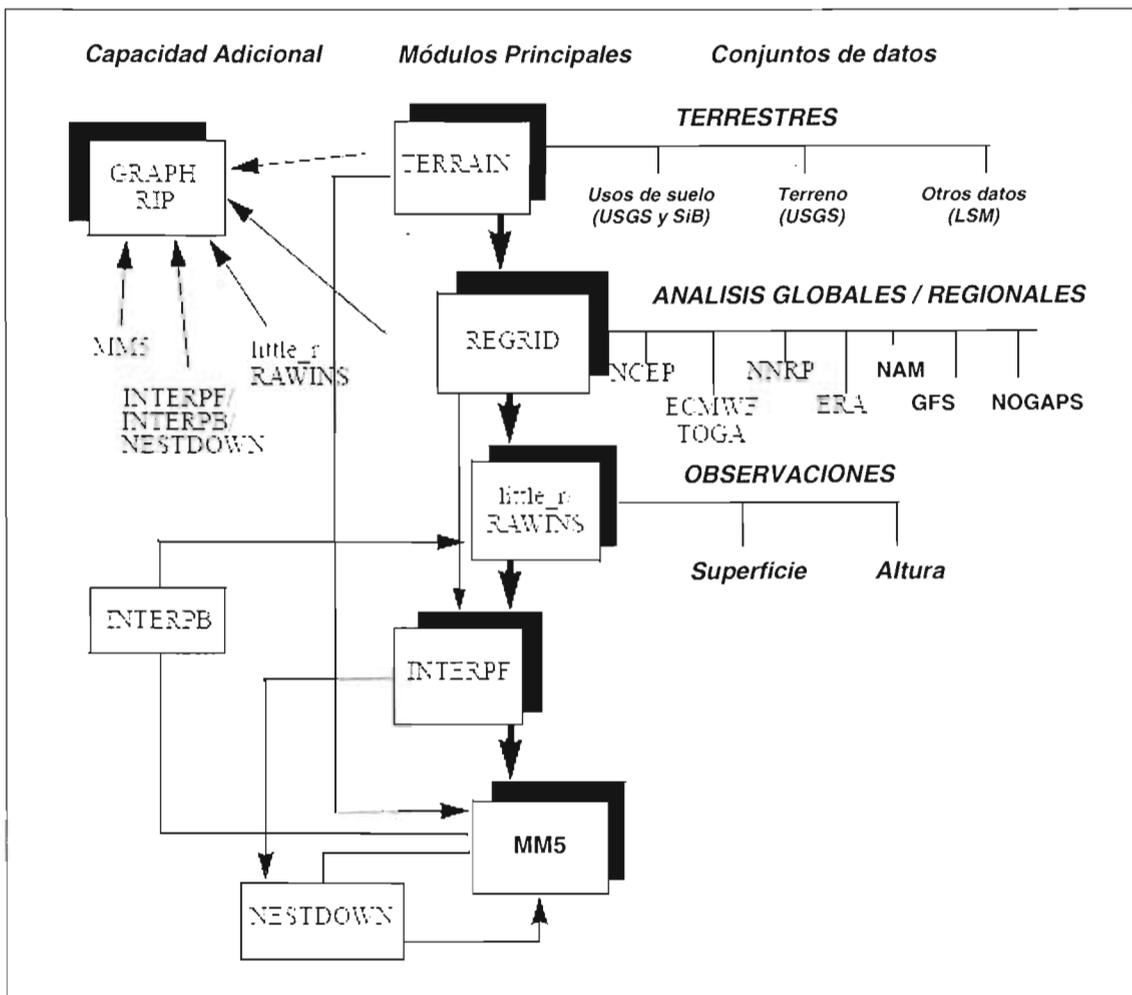


Figura 2.2 Carta de flujo de los módulos del modelo numérico MM5 (Tomada de Dudhia et al., 2005).

**TERRAIN:-** Realiza una interpolación horizontal de las coordenadas del globo terrestre (latitud y longitud) a una malla de mesoescala. De entrada, utiliza datos de elevación del terreno, uso del suelo, tipos de vegetación y cuerpos de tierra- agua. En TERRAIN se determina la resolución de la malla de los dominios madre y anidados, sobre los cuales se resolverán los sistemas de ecuaciones del modelo, permitiendo utilizar hasta 5 dominios de trabajo.

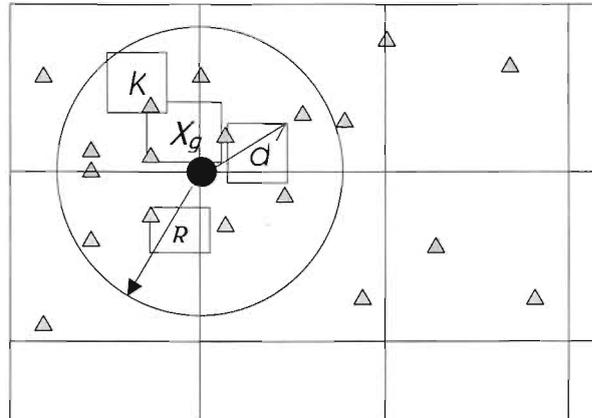
**REGRID:-** Utiliza las salidas generadas de TERRAIN para preparar los datos de entrada que requiere el módulo MM5 como condiciones iniciales y de frontera. Se divide en dos sub-módulos que son PREGRID y REGRIDDER. PREGRID extrae los parámetros que requiere el modelo, desde las mallas de análisis meteorológicos globales. REGRIDDER interpola los datos con información meteorológica de las salidas de PREGRID, en la malla de cada dominio obtenido de TERRAIN.

**RAWINS / Little\_r:-** Permite la asimilación de datos, es decir, incorpora los datos observados en superficie y en altura, a las mallas de los módulos REGRIDDER. Como datos observados utiliza tanto los observados por estaciones de superficie, como los de radiosondeo y los de sensores remotos, tales como radares, vientos derivados por satélite y perfiladores de viento. Ocupa los métodos de interpolación de Cressman y multicuadrático para realizar el análisis objetivo en la asimilación de datos. A continuación se describen ambos métodos:

#### **A) Análisis Objetivo tipo Cressman**

El esquema de análisis objetivo tipo Cressman, también llamado método de correcciones sucesivas (Cressman, 1959), fue originalmente diseñado para áreas de datos relativamente densas y redundantes. Es una de las dos opciones de análisis objetivo que tiene el modelo MM5, el cual puede ser esquematizado como se muestra la figura 2.3. El método considera la distribución de una variable meteorológica  $X_{g_{ij}}^{(v)}$  en la  $v$ -ésima iteración en el punto de malla  $(i, j)$ , y  $d$  es la distancia del punto de malla  $X_{g_{ij}}^{(v)}$  al punto de observación  $k$ . Alrededor de un punto de malla se dibuja un círculo mostrando el radio de influencia  $R$  y el área circunscrita es llamada región de influencia. Este planteamiento flexible y satisfactorio en el manejo de datos, es una herramienta robusta para los requerimientos presentes de la predicción numérica, gracias a la detección y eliminación de errores que posee este sistema de análisis, a pesar de que una de las mayores dificultades de la aplicación

práctica de interpolación de cualquier análisis objetivo, es el problema de la confiabilidad y calidad de los datos (Cressman, 1959).



**Figura 2.3.-** Arreglo de puntos distribuidos irregularmente, mostrando la región de influencia de un punto de malla en el análisis objetivo tipo Cressman (los triángulos indican estaciones de observación).(Tomada de Krishnamurti et al., 1996)

## B) Análisis Objetivo Multicuadrático

Es también llamado método de interpolación con funciones hiperboloides (Nuss and Titley, 1994), fue incorporado recientemente en la comunidad meteorológica, el cual basa su confiabilidad al incorporar una gran cantidad de datos al campo inicial, por lo que entre mayor sea la cantidad de buenas observaciones que se incorporen, menor será el error entre el campo inicial y el modificado por la asimilación de datos. Debe ser empleado con precaución ya que puede generar errores en áreas donde existe una gran ausencia o nulidad de datos (Dudhia, et. al., 2005).

**INTERP\_F:-** Interpola los datos de los niveles isobáricos a los niveles sigma requeridos por el módulo MM5 en la vertical, generando las condiciones iniciales y de fronteras laterales.

**MM5:-** Este módulo es el más importante. Aquí se procesa toda la física del modelo y es donde se realiza la parte numérica de la predicción del tiempo y elaboración de diagnósticos meteorológicos. En este módulo se resuelven todas las ecuaciones para las condiciones iniciales y los resultados se vuelven a utilizar para un procesamiento posterior. Dentro de este módulo se especifican las características que se requerirán para ejecutar el modelo, tales como el período de pronóstico y las parametrizaciones de los procesos físicos, así como la configuración de las opciones de cómputo a emplear tales como sistema operativo, paralelización en cómputo, número de

procesadores para el caso de supercómputo y clusters, e inclusive el tipo de compilador a emplear para crear los archivos ejecutables del MM5.

En México, el modelo numérico MM5 se ha utilizado para realizar pronósticos a corto plazo y obtener diagnósticos, determinando soluciones accesibles en problemas ambientales y de cambio climático regionalizado (Magaña et., al., 1998). Actualmente es de distribución libre y puede ser ejecutado en computadoras de procesamiento paralelo con memoria distribuida y en computadoras tipo PC con sistema operativo Linux. (Calderón, 2003). Por estas características, el MM5 es ampliamente usado por la comunidad científica mundial, estando bien documentado y cuenta con foros y sitios web de asistencia técnica para los usuarios.

## **2.2. Metodología**

Se diseñó un esquema de predicción de Nortes a 120 horas (mediano plazo), mediante ensambles de pronósticos, utilizando el modelo numérico de mesoescala MM5, con una distancia entre nodos de 45 kilómetros, cubriendo Norteamérica. Esta malla permite visualizar la evolución de un frente frío y el Norte desde su génesis en el centro de los EE.UU., el cruce por el Golfo de México e incursión hasta el Mar Caribe y Golfo de Tehuantepec (figura 2.4).

Se seleccionaron 3 casos de Nortes durante el inicio, la mitad y el final de la temporada de Nortes, con el fin de tomar casos representativos en cada período. Durante los meses de octubre y abril, nuestro país se encuentra en una etapa de transición climatológica dentro del ciclo anual, pasando de la temporada de invierno a verano y viceversa, interactuando sistemas de latitudes medias con sistemas tropicales (ondas del este). Evaluaciones de pronósticos numéricos en Norteamérica muestran que durante estas fechas existe un error mayor en la predicción numérica, que en los períodos de pleno invierno o verano (Grimitt, et. al. 2003).

Se asimilaron la mayor cantidad de datos disponibles en el área de estudio, mejorando con ello los campos iniciales del modelo GFS. Para esto se variaron los esquemas de asimilación de datos, con lo cual se crearon condiciones iniciales y de frontera, empleadas posteriormente con diferentes parametrizaciones físicas para cada pronóstico numérico del modelo MM5.

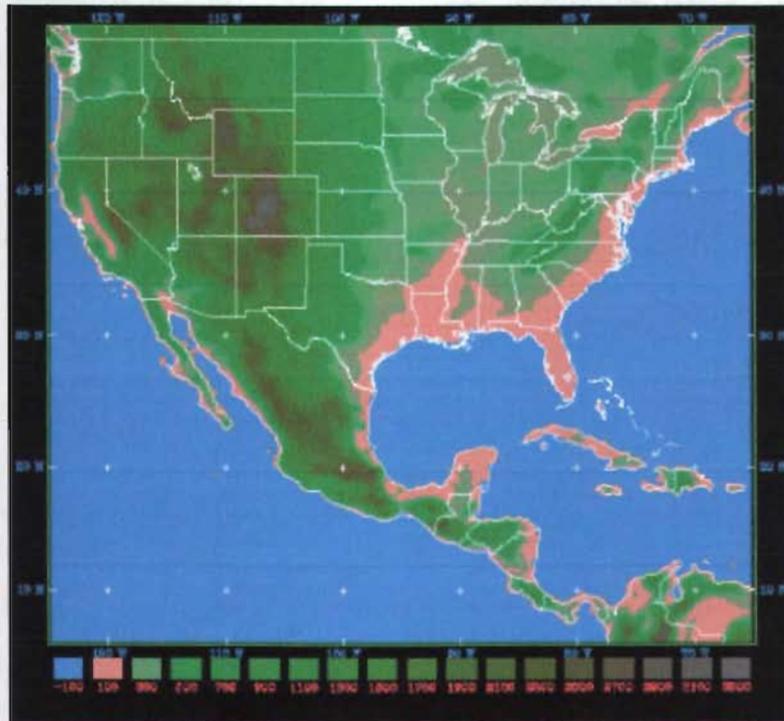


Figura 2.4 - Dominio configurado para el pronóstico del modelo numérico MM5.

Para el primer caso, del 7 al 12 de abril del 2003, se ejecutaron 32 experimentos de pronóstico y cada solución determinística fue evaluada contra los datos de estaciones de superficie, seleccionando las 10 configuraciones que mostraron el más alto índice de correlación y la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), las cuales se emplearon como miembros para conformar el ensamble de los 3 casos.

Los resultados fueron evaluados objetivamente utilizando los campos de verificación y los campos pronosticados, calculando el patrón de correlación y el error de dispersión del ensamble, con lo cual se determinó la habilidad del ensamble para pronóstico a mediano alcance y la predictibilidad de los Nortes.

### 2.3. Datos: Condiciones iniciales y asimilación

La predicción numérica del tiempo (tanto en forma determinística como con ensambles), es en esencia un problema de condición inicial y de condiciones de frontera. Dada una estimación del

estado presente de la atmósfera (condición inicial) y unas condiciones apropiadas de la superficie y de las fronteras laterales, (condiciones de frontera), el modelo numérico simulará (pronosticará) la evolución de la atmósfera. Por lo tanto, con una mayor cantidad de “buenos” datos, se creará una condición inicial de “buena” calidad que contenga las condiciones atmosféricas más apegadas a la realidad, mejorando con ello la habilidad del pronóstico (Kalnay, 2003).

### **Datos para las condiciones iniciales y de frontera**

Se tomaron los datos de “Análisis Final” del servidor del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de los EE.UU. (NCAR, por sus siglas en inglés). Básicamente son las salidas del modelo GFS (“first guess”) cada 6 horas, pero enriquecido con los datos de observaciones que no llegaron a tiempo para la corrida operacional del GFS. Tienen una resolución de  $1^\circ \times 1^\circ$  con cobertura global para las 0000, 0600, 1200 y 1800 Z. Los análisis están disponibles en la superficie, y 26 niveles en la vertical, desde 1000 mb hasta 10 mb. Los parámetros incluyen presión en superficie, PRNM, altura geopotencial, temperatura, TSM, tipo de vegetación, valores de cobertura por nieve, humedad relativa, componentes zonal y meridional del viento, vorticidad y ozono. Se encuentran disponibles en el servidor de almacenamiento de datos de NCAR: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>

Otros datos empleados fueron los de TSM diaria. Son de cobertura global, con resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y temporal cada 6 horas, desarrollados operativamente por NCEP y disponibles en <ftp://polar.wwb.noaa.gov/pub/history/sst>

### **Asimilación de datos**

Su propósito es usar toda la información posible para determinar tan exacto como sea posible el estado del flujo atmosférico u oceánico (Talagrand, 1997). El proceso de analizar los datos de las observaciones meteorológicas esparcidas, para producir valores en una malla regular, ya sea para modelación o diagnóstico computacional, ha presentado uno de los mayores retos para los meteorólogos durante años (Nuss and Titley, 1994), por lo que se han desarrollado diferentes esquemas de asimilación de datos como el de Cressman, Barnes (Krishnamurti, 1996) o multicuadrático; y más recientemente los esquemas que incorporan información estadística como la

interpolación óptima, 3D-VAR, 4D-VAR y el ensamble de filtros Kalman (Kalnay, 2003).

Durante el proceso de asimilación, los datos pasan un control de calidad, filtrando los que son erróneos o los que tienen una gran variación con respecto al campo inicial; se realiza una interpolación con un radio de influencia de cada dato observado, incorporándolo a la malla regular y realizando posteriormente un suavizamiento de los campos modificados.

Para este estudio se ocuparon los siguientes datos en la asimilación:

### **Datos de altura**

- A) **Radiosondeos:** Realizados en Norte y Centroamérica durante la fecha y hora de la condición inicial para cada caso. Contienen las variables de dirección y rapidez del viento, altura geopotencial, presión atmosférica y humedad relativa, en niveles mandatorios y significativos. Están disponibles en el sitio web de RAOBS (Radiosonde Database Access, en inglés) de la NOAA: <http://raob.fsl.noaa.gov/>
- B) **Globos piloto del proyecto PACS-SONET:** Datos de dirección y rapidez del viento a diferentes alturas. De las 7 estaciones, 3 de ellas se ubican a lo largo de la costa del Golfo de México y 2 en el Golfo de Tehuantepec, considerándose de gran utilidad para éste estudio, ya que complementan la ausencia de datos de viento en niveles superiores, donde no existen estaciones de radiosondeo del SMN. Disponibles en la pagina web: <http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/>

### **Datos de Superficie**

- A) **Estaciones Meteorológicas Automáticas de Superficie de la Secretaría de Marina:** 27 Estaciones ubicadas a lo largo de las costas nacionales y en islas, cayos y arrecifes. Las ubicadas en el Golfo de México, Mar Caribe y Golfo de Tehuantepec; se tomaron para la evaluación de las corridas del primer caso. Contienen datos de temperatura del aire, humedad relativa, PRNM, dirección y rapidez del viento.
- B) **Estaciones Meteorológicas Automáticas de Superficie del Servicio Meteorológico Nacional:** 23 Estaciones ubicadas en los estados costeros del Golfo de México, Mar

Caribe y Golfo de Tehuantepec. Las estaciones de Matamoros, Altamira, Veracruz, Campeche, Mérida y Cozumel, se tomaron para la evaluación de las corridas del primer caso. Contienen datos de temperatura del aire, humedad relativa, PRNM, dirección y rapidez del viento.

- C) **Boyas Oceánicas del Servicio Meteorológico de los EE.UU:** Se tomaron los datos de las boyas ubicadas en el norte del Golfo de México y frente a la costa sur de California en el Océano Pacífico, utilizando las variables de temperatura del aire, PRNM y dirección y rapidez del viento. Tienen mediciones horarias y su banco de datos está disponible en la pagina web del Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC, por sus siglas en inglés) de la NOAA: <http://www.ndbc.noaa.gov/>

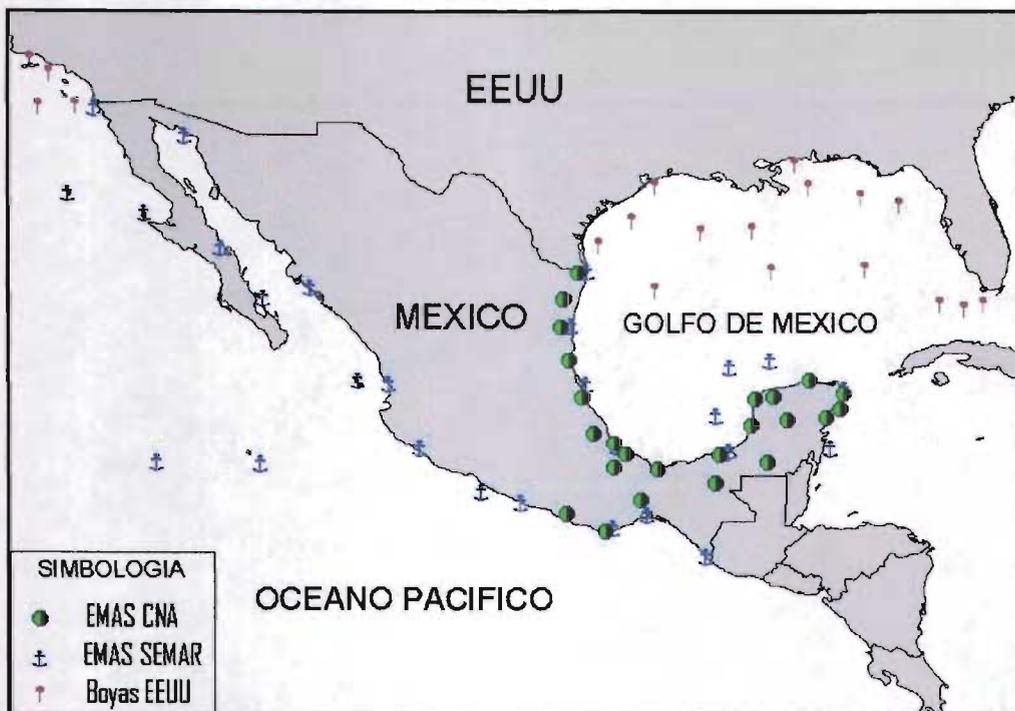


Figura 2.5 - Estaciones de superficie empleadas para asimilar datos y mejorar las condiciones iniciales y de fronteras laterales del MMS.

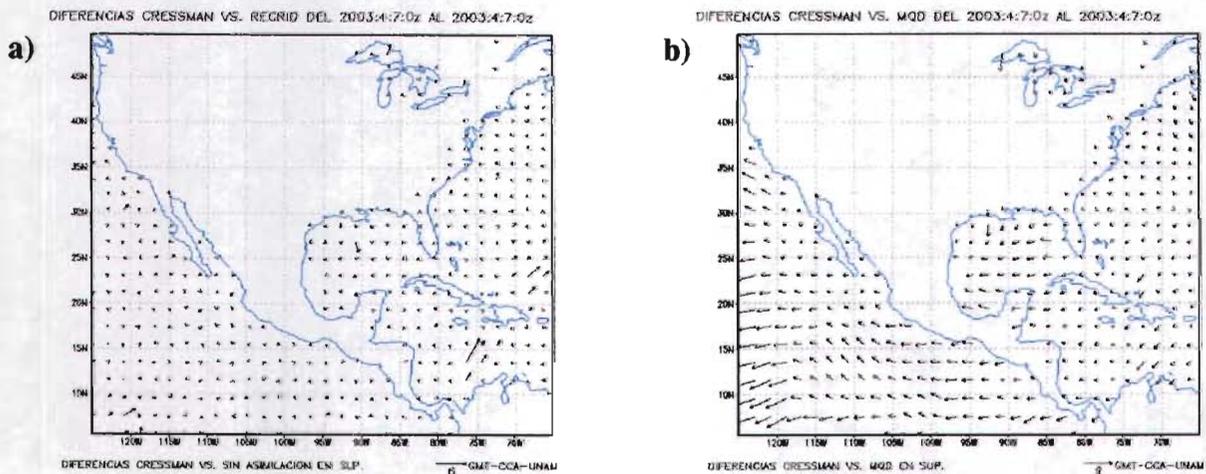
- D) **Vientos derivados de Satélite (Quikscat), de los EE.UU:** Se tomaron los datos a 10 m de la superficie sobre las áreas oceánicas del dominio, utilizando las variables de componentes zonal, meridional y rapidez del viento. Disponibles en la pagina web del “Jet Propulsion Laboratory” de la NASA de los EE.UU. <http://poet.jpl.nasa.gov/>
- E) **Datos sinópticos de superficie y de barcos de oportunidad.** Proviene de las observaciones sinópticas en Norte y Centroamérica, incluyendo las de barcos de

oportunidad. Se encuentran disponibles en el servidor de almacenamiento de datos de NCAR: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds464.0/data/>

## 2.4. Variación de las condiciones iniciales y parametrizaciones físicas

### Variación de las condiciones iniciales

Se crearon diferentes condiciones iniciales utilizando los esquemas de análisis objetivo Cressman y multicuadrático. Por cada condición inicial creada, se arrastra un error entre el estado verdadero de la atmósfera y el campo creado para la condición inicial. El error se reproduce tanto como  $n$  miembros del ensamble o soluciones existan, lo que hace que la dispersión entre ellas aumente (Kalnay, 2003; Eckel, 2003).



**Figura 2.6** - Mapa de diferencias de los campos de viento en superficie de las condiciones iniciales, del primer caso de Norte. La figura a, muestra las diferencias entre las condiciones iniciales utilizando análisis objetivo tipo Cressman y sin asimilar datos; mientras que la figura b muestra las diferencias al utilizar los esquemas Cressman y multicuadrático.

Al crear los mapas de diferencias de las condiciones iniciales del campo de viento en superficie, se aprecian las diferencias entre el campo de control (sin asimilar datos) y el campo corregido con análisis objetivo tipo Cressman (figura 2.6a) y las diferencias de los campos corregidos con análisis objetivo tipo Cressman y multicuadrático (figura 2.6b). Se observa que el campo inicial entre ambos esquemas de asimilación es diferente, principalmente en las áreas oceánicas donde existe ausencia de datos, (esquina inferior izquierda) en la región del Océano Pacífico Ecuatorial, coincidiendo con lo sugerido por Dudhia, et. al., (2005) al utilizar el esquema de

análisis objetivo multicuadrático con el MM5.

### **Variación de las parametrizaciones físicas**

La metodología de variar las parametrizaciones físicas, puede simular el hecho de utilizar datos de diferentes modelos globales o regionales, creando un ensamble del tipo multimodelo (Buizza, 2001; Eckel, 2003; Gritmit, 2003). En este proceso se agrega incertidumbre a las soluciones del ensamble, aumentando los errores en una forma controlada y no aleatoria, ya que esto depende de las parametrizaciones seleccionadas en la modelación numérica. La dispersión en las soluciones aumenta ligeramente después de la variación en las condiciones iniciales, pero mejora la habilidad de pronóstico del mismo ensamble (Eckel, 2003).

Para la configuración de parametrizaciones físicas se variaron los: Esquemas de humedad explícita, cumulus, capa límite planetaria, convección somera y radiación.

### **2.5. Evaluación de ensambles de pronósticos**

La evaluación de los ensambles de pronósticos del MM5, se puede realizar usando dos metodologías:

- Evaluando contra los datos de estaciones dentro del dominio, interpolando los valores de los puntos de malla circundantes, a la situación geográfica de las estaciones.
- Evaluando el campo pronosticado por el MM5 vs. un campo de verificación (Reanálisis), para la fecha y hora del pronóstico, en todos los puntos de malla.

En el presente estudio se tomaron ambas metodologías de la siguiente forma:

#### **Evaluación en puntos de malla vs. observaciones**

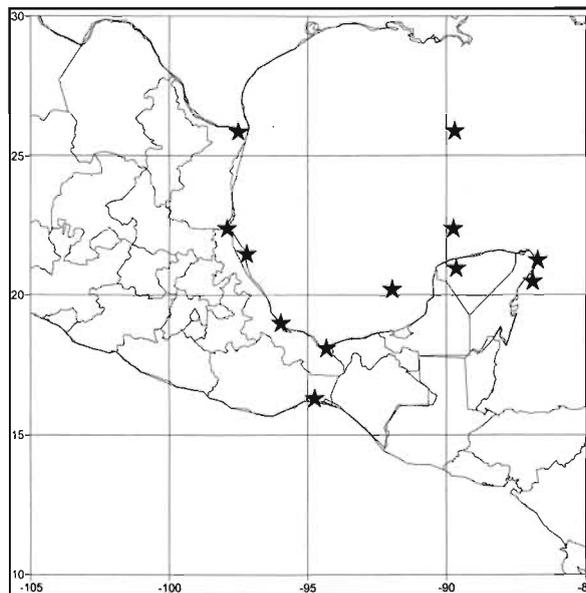
Los 32 experimentos de pronóstico con el modelo MM5 del primer caso, se evaluaron calculando dos parámetros estadísticos: el índice de correlación entre los valores observados y los pronosticados, definido como:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}} \quad . . . . (2.2)$$

y la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) de acuerdo a lo propuesto por Wilks (1995) y Krishnamurti, et. al. (2003), el cual se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (Y_m - O_m)^2} \quad . . . . (2.3)$$

donde  $M$  es el número total de datos,  $Y_m$  es el dato observado y  $O_m$  es el dato pronosticado. Estos dos parámetros estadísticos permiten estimar el orden de magnitud de las diferencias entre las salidas numéricas y las observaciones. Ambos parámetros son ampliamente usados para fines de evaluación meteorológica (Wilks, 1995; Krishnamurti, et. al. 2003).



**Figura 2.7** – Estaciones empleadas en la evaluación de los 32 experimentos del 1er caso de Norte.

Cada experimento de predicción fue evaluado empleando las observaciones de 12 estaciones de superficie en las vertientes del Golfo de México, Mar Caribe y Golfo de Tehuantepec (figura 2.7). Al extraer los valores de las variables, se realizó la interpolación con los puntos de malla circundantes a la situación geográfica de la estación, ya que por la resolución espacial (45

kilómetros), se pueden generar errores por influencia geográfica, principalmente en aquellas estaciones ubicadas en la costa, mientras que las de islas y boyas oceánicas se consideran sin ésta influencia. Las variables empleadas fueron: magnitud del viento (10 m sobre la superficie), temperatura del aire (a 2 m) y PRNM; considerando que con estas variables se puede ver la señal de los Nortes en el área de estudio.

Este proceso de evaluación muestra el impacto de parametrizaciones físicas en particular y por lo tanto el desempeño de cada una de ellas (Kalnay, 2003), reduciendo los errores aleatorios por cada solución y por lo tanto la incertidumbre que arroje el ensamble (Palmer, 1999).

### **Evaluación de los campos pronosticados vs. campos de análisis**

Esta metodología se empleó para evaluar el desempeño del ensamble, calculando dos parámetros:

- **Correlación** (corr) entre los campos de verificación y los campos pronosticados, definido como:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}} = r(f, v) \quad . . . . . (2.4)$$

- **Error de dispersión** (disp), proporcional a 1-corr, el cual se define como:

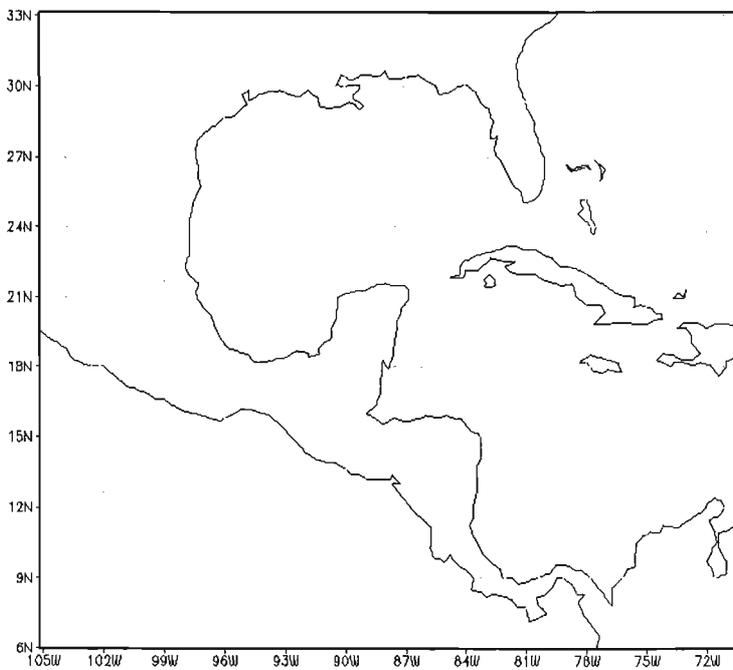
$$disp^2 = 2[1 - r(f, v)]sd(f)sd(v) \quad . . . . . (2.5)$$

donde  $sd(f)$  es la desviación estándar del campo pronosticado y  $sd(v)$  es la desviación estándar del campo de verificación. Este parámetro se considera la medida más importante para evaluar la habilidad del pronóstico por ensambles (Takacs, 1985), ya que los errores de dispersión de cada uno de los miembros del ensamble se deben a errores en fase en lugar de errores en la amplitud (Hou, et. al., 2001). Esta metodología fue empleada como una verificación objetiva en el “Experimento de ensamble de tormentas y mesoescala” (SAMEX, por sus siglas en ingles) desarrollado en mayo de 1998, en los EE.UU.

Se utilizaron las variables de rapidez del viento en el primer nivel sigma y PRNM,

consideradas de difícil evaluación en campos de orografía compleja, con lo que se puede apreciar la habilidad del ensamble a corto plazo de 0 a 48 horas (Eckel, 2003) y el comportamiento del mismo cuando se hace presente la perturbación atmosférica, que en éste caso es cada evento de Norte.

Para determinar el área de evaluación del ensamble, se consideró que el efecto de Norte sólo se presenta en algunos puntos de malla y no en todo el dominio del pronóstico, por lo que se seleccionó una zona que cubre el Golfo de México, Golfo de Tehuantepec y el Mar Caribe (figura 2.8), evitando con ello sobreestimar la habilidad del ensamble, ya que el número de puntos de malla con afectación de Nortes es menor, con relación al número de puntos sin afectación (dominio completo).



**Figura 2.8** Área empleada para la evaluación del ensamble, solo en puntos de malla con afectación de Nortes.

## Capítulo III

### Ensamblados de pronósticos de Nortes

#### 3.1 Selección de los casos de Nortes

Al seleccionar los casos de estudio, se consideró que durante los meses de otoño y primavera, México se encuentra en una etapa de transición climatológica dentro del ciclo anual, pasando de la temporada de invierno a verano y viceversa, interactuando sistemas de latitudes medias (frentes fríos) con sistemas tropicales (ondas del este).

Evaluaciones de pronósticos numéricos en Norteamérica, muestran que durante estas fechas existe un error mayor en la predicción numérica del tiempo, en comparación con los períodos de pleno invierno o verano (Grimitt, et. al., 2003). Un comportamiento similar en la predicción numérica ocurre en términos de predictibilidad estacional, como la que se lleva a cabo para el pronóstico de El Niño Oscilación del Sur, debido a que ésta es alta durante los años El Niño, mientras que durante otros años la predictibilidad es baja (Palmer, 1999). En los extratropicos, los cambios de la circulación a causa de El Niño y La Niña, son la mayor fuente de la predictibilidad (Oldenborgh, et. al., 2003).

Para conocer la efectividad de la técnica de ensambles aplicada al pronóstico de Nortes a mediano plazo, se seleccionaron 3 casos representativos de la temporada anual: al inicio de la temporada, iniciando el invierno y al final de la temporada.

#### 3.2 1er caso de Norte (07 al 12 de abril 2003)

##### **Descripción sinóptica**

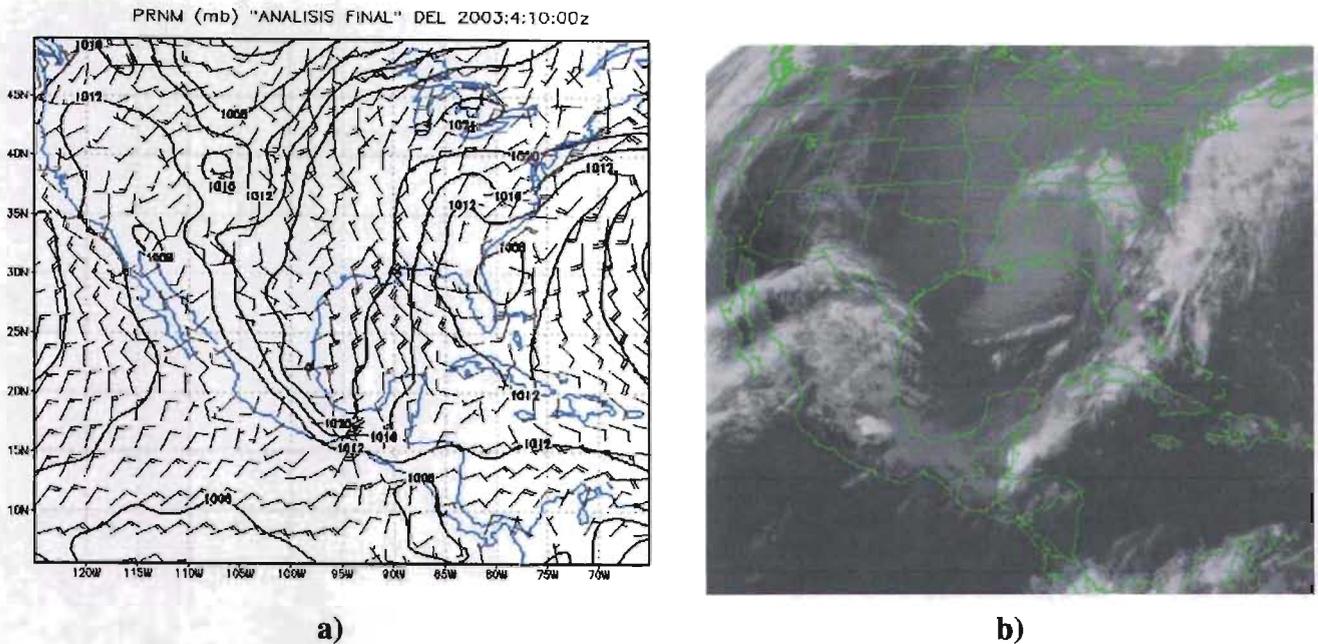
El día 7 abril a las 0000 Z una baja presión en superficie de 1004 milibares se ubicaba sobre la costa sur de Tamaulipas. Para las 1200 Z, se había formado una alta presión en superficie de 1024 milibares en Colorado, EE.UU. La PRNM en el sur del Golfo de México era de 1005 milibares. A las 0000 Z del día 8, una línea frontal se desprendía hacia el suroeste, desde una baja presión de 1004 milibares ubicada en Carolina del Norte, cruzaba el norte de Florida y se extendía hasta el sur de

Texas. Esa noche ingresó al Golfo de México, avanzando hacia el sureste. La EMAS de Matamoros, Tamps., registró a las 0900 Z un cambio en la dirección del viento del noroeste al noreste aumentando la rapidez de 0.5 a 2.4 m/s. A las 1200 Z, el frente frío se ubicaba desde el norte de Georgia hasta la costa central de Tamaulipas, en el sur del Golfo de México, se presentaron vientos del suroeste registrados en Cayo Arcas de 8.2 m/s e Isla Lobos Ver. de 10.9 m/s, manifestando la presencia de surada, antes del cruce del frente frío.

A las 0000 Z del día 9 de abril, el frente frío se ubicó desde Cabo Hatteras, Carolina del Norte, hasta la costa central de Veracruz, cruzando por la Sonda de Campeche. Isla Lobos registró vientos del norte de 17.9 m/s y un descenso de temperatura de  $-7.3^{\circ}\text{C}$  en 6 horas. En Veracruz, Ver., se registraban vientos del norte de 9.4 m/s; mientras que Cayo Arcas reportaba rotación del viento del noroeste al noreste aumentando de 3.4 a 6.2 m/s. Una alta presión asociada de 1032 milibares se encontraba sobre Oklahoma, mientras que en Salina Cruz, Oax., se observaba una PRNM de 1006 milibares con vientos del sur de 4.7 m/s, mostrando un gradiente de presión de -26 milibares entre el sur de EE.UU. y el Golfo de Tehuantepec.

Para el día 10 a las 0000 Z, el frente frío se ubicaba desde el sur de Florida, hasta la costa de Belice, detrás de ésta se observaron vientos del norte y noroeste en prácticamente todo el Golfo de México, determinándose como la fecha principal de Norte (figuras 3.1 y 3.2). La boya 42001 de la NOAA, registró vientos del noroeste de 12.8 m/s; Isla Lobos, Ver. del norte de 8.9 m/s, Antón Lizardo, Ver. del noroeste de 17.7 m/s, Coatzacoalcos, Ver. del noroeste de 8.9 m/s, Cayo Arcas del norte de 14.8 m/s, Isla Mujeres del norte de 11 m/s, Chetumal del norte de 9.4 m/s, y Salina Cruz, Oax., del noroeste de 14.6 m/s, mientras que por medio de Quikscat se calcularon vientos de hasta 20 m/s en la región norte del Golfo de Tehuantepec.

El día 11 a las 0000 Z el frente frío se desprendía desde una baja presión de 1004 milibares sobre Carolina del Norte cruzando la región central de Cuba y prolongándose hasta la región nororiental de Honduras. Sobre el Golfo de México se observaban nubes estratocúmulus mientras que el Golfo de Tehuantepec estaba prácticamente sin nubes por la incursión de la masa de aire frío a través del Paso de Chibela. En la región occidental del Golfo de México los vientos eran del este de 5.1 m/s, en el norte de la Península de Yucatán y en la región noroccidental del Mar Caribe, eran del norte y noreste de 10.3 m/s. En Salina Cruz, Oax. aún se registraban vientos del norte de 12.9 m/s.



**Figura 3.1** – Condiciones sinópticas de Norteamérica durante el 1er caso de Norte, el 10 de abril 2003 a las 0000 Z. En a) se muestra la PRNM (milibares) y viento en superficie (nudos) y en b) la imagen del satélite GOES-12 en espectro infrarrojo 4 del 10 de abril 2003 a las 00:15 Z. Fuente: Final Analysis, NCAR / Historical Goes Browse Server - NOAA.

A las 0000 Z del día 12, el frente frío se desprendía desde las Islas Bermudas, cruzaba la región sur de Cuba y se extendía hasta la región sur de Nicaragua. Sobre el Golfo de México y el Canal de Yucatán, los vientos eran del este y sureste de 5.1 a 7.7 m/s. En el Golfo de Tehuantepec, los vientos eran del noreste de 5.6 m/s (estimados por quikscat y lo observado en Salina Cruz, Oax.).

### Pronóstico numérico

Para el primer caso de Norte, se efectuaron 32 experimentos de pronósticos con el modelo MM5, variando las condiciones iniciales y las parametrizaciones de procesos físicos. Las 10 combinaciones que presentaron el mayor índice de correlación y el menor RMSE, fueron seleccionadas como miembros del ensamble, tanto en este primer caso de Norte, como en los subsecuentes (figura 3.2), incluyendo al experimento de control (el que no empleó asimilación de datos para modificar la condición inicial). Con ésta metodología se realizó la selección de los miembros en forma controlada (combinación de parametrizaciones físicas) y no en forma aleatoria.

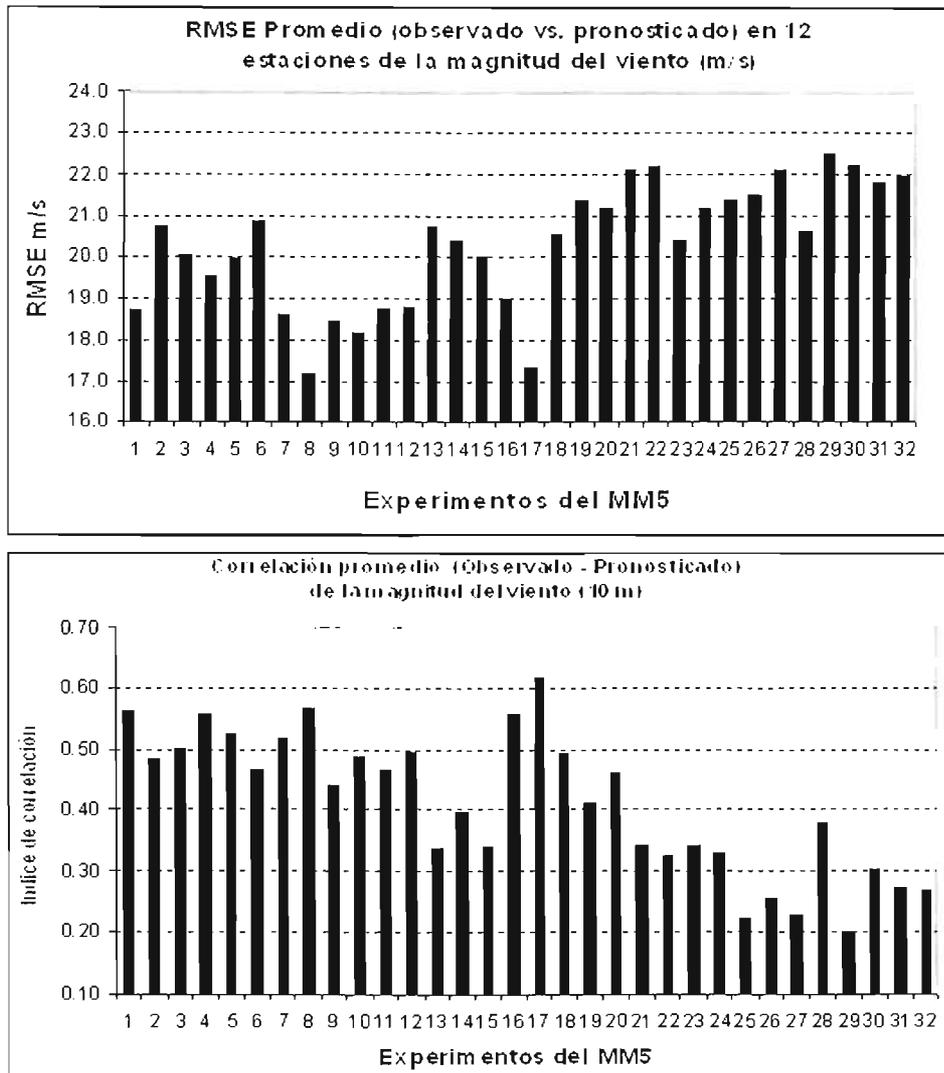


Fig. 3.2 - RMSE y correlación promedio (observado – pronosticado) de la magnitud del viento a 10m, en 12 estaciones de superficie, observándose el desempeño de cada combinación al variar la condición inicial y las parametrizaciones de procesos físicos.

Al realizar la evaluación de los 32 experimentos y seleccionar los miembros del ensemble (tabla 3.1), se observa que las parametrizaciones predominantes son: Esquema de humedad explícita Grauppel-Reisner (2), cumulus tipo Kain-Fritsch y Kain-Fritsch (2) y capa límite planetaria Blackadar.

Experimento MMS	Análisis objetivo	Esquema de humedad explícito	Cumulus	Capa límite planetaria	Convección poco profunda
1	---	Warm Rain	Kain Fritsche (1993)	Blackadar	Sí
5	Cressman	Warm Rain	Kain Fritsche (1993)	Blackadar	Sí
6	Cressman	Warm Rain	Anthes-Kuo (1972)	Blackadar	Sí
8	Cressman	Graupel - Reisner (2)	Kain Fritsche 2 (2002)	MRF (1996)	---
10	Cressman	Graupel - Reisner (2)	Grell (1994)	MRF (1996)	Sí
16	Cressman	Graupel - Reisner (2)	Kain Fritsche 2 (2002)	Blackadar	---
17	Cressman	Graupel - Reisner (2)	Kain Fritsche (1993)	Blackadar	Sí
18	Multicuadrático	Warm Rain	Kain Fritsche (1993)	Blackadar	Sí
23	Multicuadrático	Simple Ice	Kain Fritsche (1993)	MRF (1996)	---
26	Multicuadrático	Simple Ice	Anthes- Kuo (1972)	Blackadar	Sí
28	Multicuadrático	Simple Ice	Kain Fritsche (1993)	Blackadar	Sí

**Tabla 3.1** - Configuración de las 10 corridas del MM5 con el mayor índice de correlación y RMSE más bajo, por lo que fueron seleccionadas como miembros del ensamble.

### Diagramas tipo espagueti

Para mostrar la dispersión de los miembros del ensamble en forma objetiva, se emplean los diagramas tipo espagueti, graficando todos los miembros de una variable seleccionada. Una forma alterna es mostrar el valor promedio junto con todos los miembros, llamándosele *ensamble promedio* o *media del ensamble*. Algunas veces los miembros del ensamble tienden a agruparse entre ellos generando dos o más grupos de soluciones. La media del ensamble suaviza estos agrupamientos de soluciones en forma automática, generando un contorno promedio que permite al usuario, una fácil interpretación de las soluciones.

Al observar los diagramas tipo espagueti de la PRNM, se observa que en el análisis (condición inicial) sólo existen diferencias entre la posición de las isobaras (figura 3.3a), al variar los esquemas de análisis objetivo empleados. Conforme aumenta el tiempo de pronóstico, se aprecia que la dispersión igualmente aumenta, por ejemplo, a las 24 horas de pronóstico, se observa la formación de una alta presión de 1032 milibares sobre el Oeste de Nebraska (figura 3.3b), con una gran dispersión en ésta zona, indicando que cada miembro del ensamble difiere significativamente en posicionar la alta presión. A las 48 horas de pronóstico (figura 3.3c) se observa que la alta presión se ha desplazado hacia el sur, extendiéndose como un dorsal hasta la región central de México, evidenciando la señal de Norte, aunque existe dispersión entre las isobaras de 1020 y 1024 milibares sobre el norte de México, tienen una posición similar lo que hace pensar que cada miembro difiere ligeramente en posicionar éstas isolínea. La dispersión indica que tan alta o baja es la predictibilidad

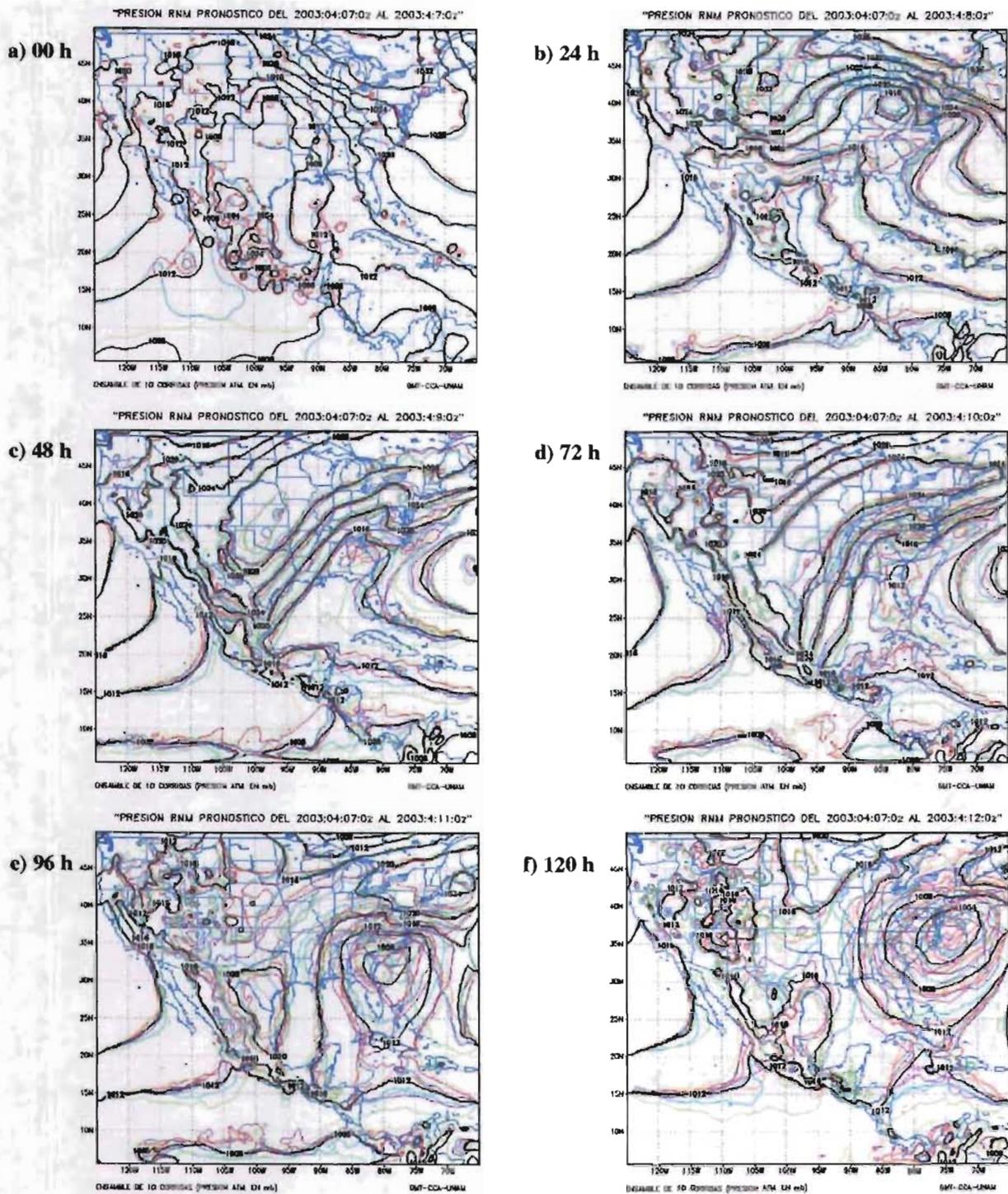


Figura 3.3 – Mapas tipo espagueti del 1er caso de Norte, pronóstico de PRNM a 24 (a), 48 (b), 72 (c), 96 (d) y 120 horas (e). El intervalo de cada línea es de 4 milibares con valor mínimo de 1016 milibares. El valor promedio lo indica el rótulo (línea negra más gruesa).

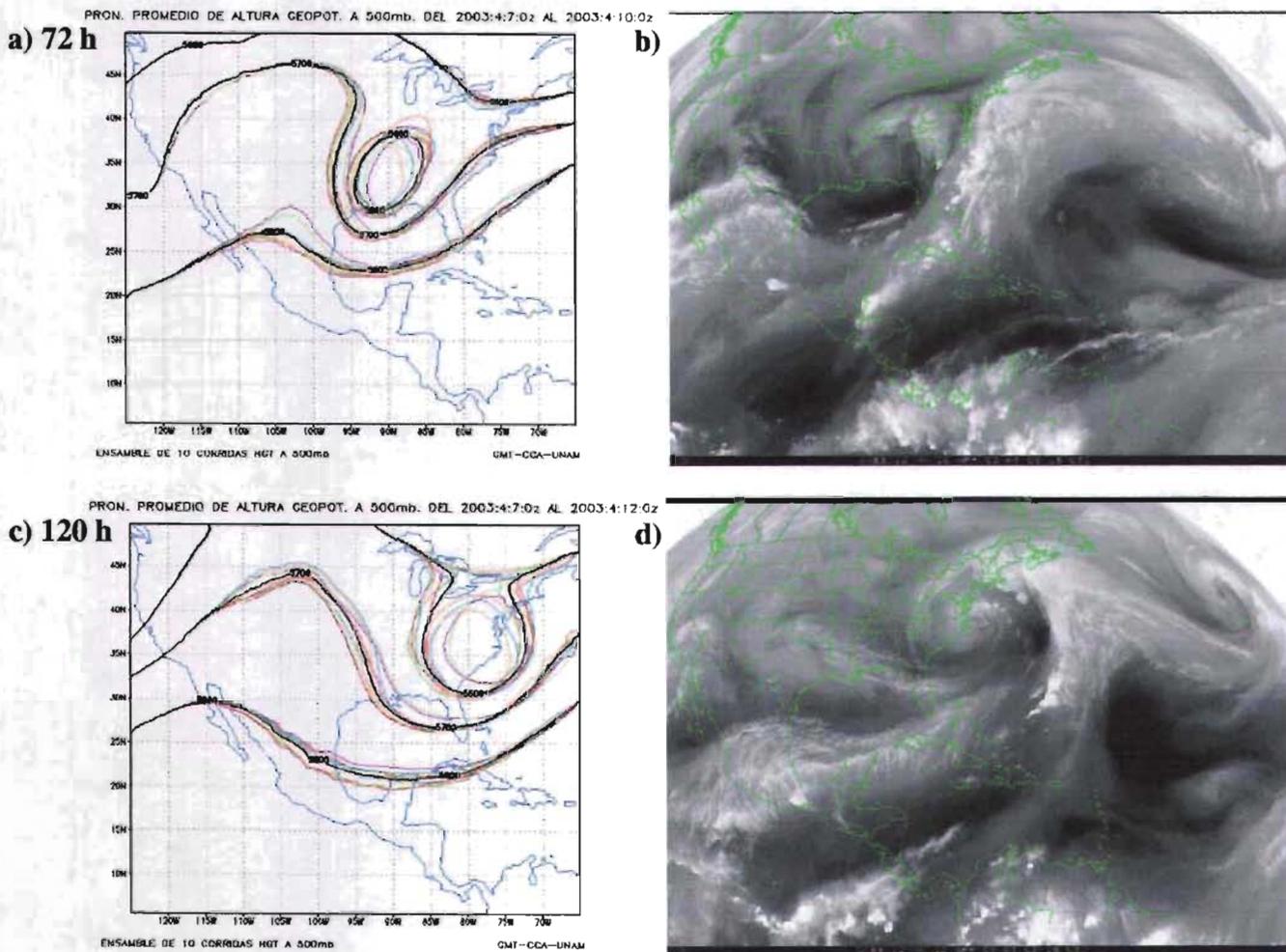
de un sistema, por lo que en éste caso, el norte de México se considera una zona de alta predictibilidad (poca dispersión). A las 72 horas de predicción (figura 3.3d), se observa el desplazamiento hacia el sur de la isobara de 1024 milibares hasta la región central de Veracruz, mientras que las isobaras de 1020 y 1016 milibares están casi paralelas a la de 1024 milibares, cruzando desde el noreste hasta el suroeste del Golfo de México (en forma similar al patrón compuesto, para la fecha principal de Norte), aunque cada miembro las posiciona en lugares diferentes, lo que crea una dispersión considerable, por lo que se deduce que la posición del frente frío y la velocidad de desplazamiento pronosticados, varían debido a las configuraciones de las parametrizaciones físicas empleadas. El ensamble promedio ubica un centro de baja presión de 1012 milibares en el Norte de Florida, mientras que los miembros del ensamble muestran una *gran dispersión* en esta zona, dificultándose la posición de ésta baja presión en cada solución, mostrando con ello la *ventaja de utilizar el ensamble promedio* ante soluciones con *incertidumbre alta (baja predictibilidad)*, con lo que se facilita la interpretación del ensamble.

En los pronósticos a 96 y 120 horas (figura 3.3e y 3.3f), se observa que la dispersión aumenta considerablemente alrededor de la baja presión que se mueve al noreste sobre la costa del Atlántico, en los EE.UU. y de la cual se desprende el frente frío. El ensamble forma agrupamientos de isobaras aislados, lo que indica más de una solución en la isobara de 1012 y 1016 milibares. Esta zona se considera por lo tanto como de *baja predictibilidad (alta dispersión)*.

Otra variable importante para el pronóstico de Nortes, es la altura geopotencial a 500 milibares con la que se observa la evolución de la onda de Rossby en Norteamérica. En el pronóstico a 72 horas (figura 3.4a), se aprecia una circulación ciclónica en niveles medios sobre el sur de los EE.UU., aunque alrededor de la circulación se observa una gran dispersión de los miembros. Al compararse con la imagen de satélite en espectro de vapor de agua y correspondiente a la fecha y hora de la predicción (figura 3.4b), se observa una circulación ciclónica sobre el noroeste de Florida, (marcada por las zonas más oscuras en la imagen), lo que indica subjetivamente la habilidad del ensamble a 72 horas, para ésta variable.

A las 120 horas de pronóstico (figura 3.4c), el ensamble promedio posiciona la circulación ciclónica sobre la región Noreste de los EE.UU. Aunque algunos miembros no detectan la circulación y ubican la isolinia (sin ondulación) de 5600 m, al este de los grandes lagos, la mayoría

de ellos sí la predicen, por lo que el ensamble promedio la ubica igualmente sobre esta región. Aquí nuevamente se muestra la utilidad de emplear los ensambles promedio en aquellos casos donde se presenta una gran dispersión entre los miembros del ensamble.



**Figura 3.4** – Ensamble de pronóstico de altura geopotencial a 500 milibares (tipo espagueti): 72 (a) y 120 (c) horas. El intervalo de cada línea es de 100 m, con valor mínimo de 5500 m. El valor promedio del ensamble lo indica el rótulo (línea negra más gruesa). Imágenes de satélite en espectro de vapor de agua (b y d) en las fechas correspondientes del pronóstico.

Con ambas variables (PRNM y altura geopotencial a 500 milibares), se observa que conforme aumentó el tiempo de pronóstico, se incrementó la dispersión de los miembros del ensamble.

En todos los pronósticos se observa que las condiciones de frontera laterales se actualizaron cada seis horas de predicción numérica, por lo que todos los miembros del ensamble parten del mismo punto en citadas fronteras, prácticamente sin dispersión. Esto debe interpretarse como simple actualización que requiere cualquier modelo de área local, con la reservas debidas, considerando que

el sistema o área de interés se encuentre en el centro del dominio o sin influencia de los puntos cercanos a la frontera lateral de la malla.

### Mapas promedio y dispersión

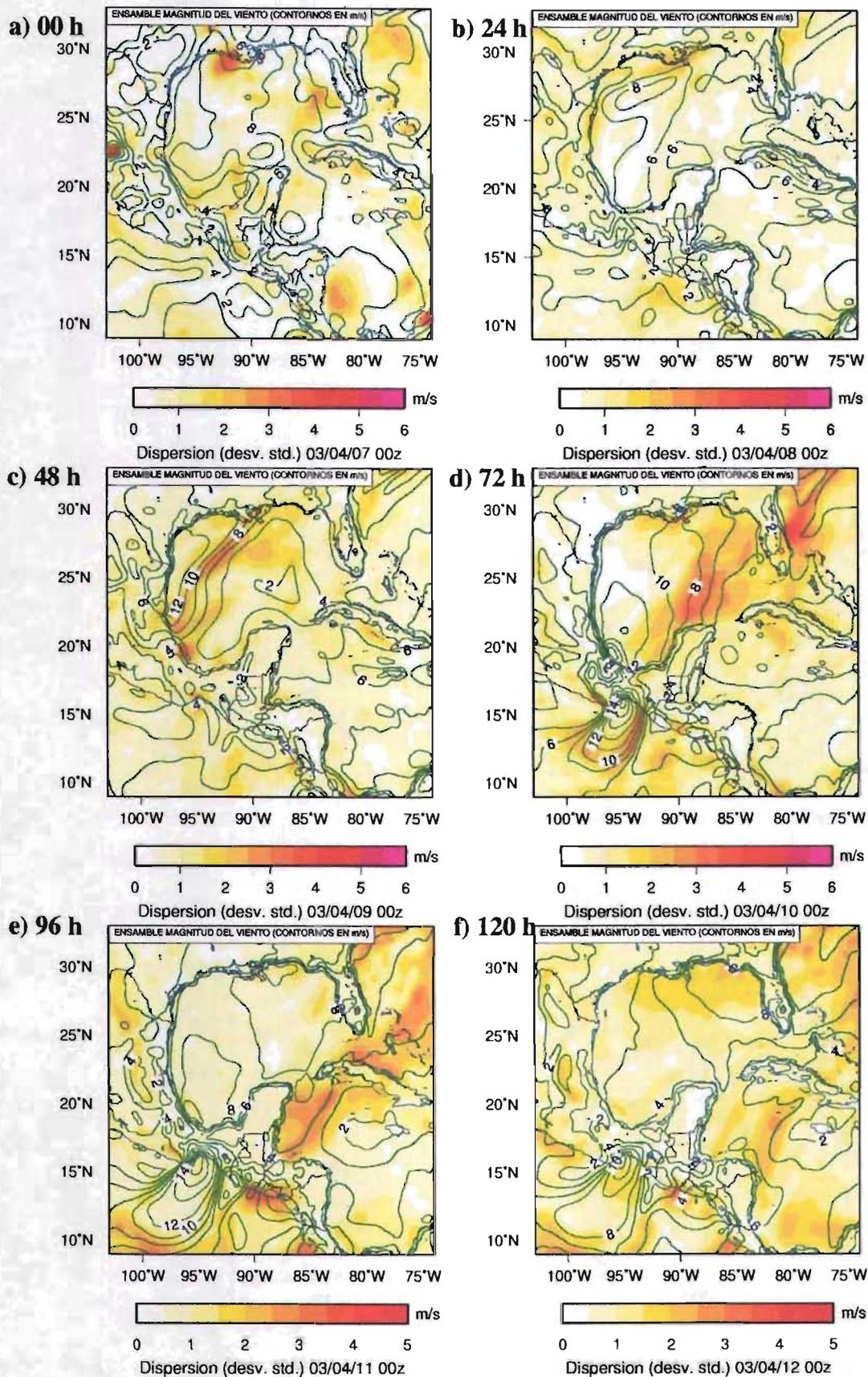
Con estos mapas se puede observar el valor promedio de los miembros del ensamble, mostrándose además la incertidumbre del pronóstico con la desviación estándar entre los miembros para cada punto de malla. Aplicando estos mapas en el esquema de predicción de Nortes, se construyeron los mapas de valores promedio de la magnitud del viento con la desviación estándar entre las salidas, conociendo con ello la incertidumbre en el pronóstico. Se calcularon empleando la ecuación 3.1:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_j^i - \bar{x}_j)^2} \quad \dots \quad (3.1)$$

donde  $N$  es el número de miembros del ensamble,  $x_j^i$  son los pronósticos individuales de cada miembro y  $\bar{x}_j$  es el promedio del ensamble. Para ésta investigación, se construyeron mapas de ensamble de pronóstico promedio de la magnitud del viento en superficie, con la dispersión (desviación estándar).

En el análisis o condición inicial (figura 3.5a), se aprecia que la dispersión (desviación estándar) alcanza valores de hasta 4 m/s en dos lugares, uno en el norte de México, alrededor de Zacatecas y otro en el norte del Golfo de México, en la costa de Louisiana, EE.UU. En ambos lugares se asimilaron datos, de radiosondeo y boyas oceánicas respectivamente, lo que indica que el campo inicial efectivamente fue modificado. Valores de 3 m/s en la desviación se aprecian en el noreste del Golfo de México y al noroeste de la Sonda de Campeche, confirmando la asimilación de los datos de boyas oceánicas y las estaciones de Cayo Arcas, Arenas e Isla Pérez.

A las 24 horas de pronóstico (figura 3.5b), se observa que la dispersión máxima es de 3 m/s en la región norte del Golfo de México, previo al ingreso del frente frío a ésta zona. La rapidez promedio del viento se pronosticaba de 8 m/s en con una varianza de +/- 3 m/s, interpretándose que los valores de la rapidez del viento para este lugar serian desde 5 a 11 m/s, con una media de 8 m/s.



**Figura 3.5** – Ensamble del pronóstico de la magnitud del viento en superficie (10 m, en contornos) y dispersión del ensamble (desviación estándar) indicado por los valores sombreados en colores: 00 (a), 24 (b), 48 (c), 72 (d), 96 (e), y 120 (f) horas.

A las 48 horas de pronóstico (figura 3.5c), la mayor incertidumbre se pronosticaba a lo largo del frente frío, desde el sur de Lousiana hasta el sur de Tamaulipas, con un aumento en la rapidez del viento de hasta 12 m/s frente a la costa sur de Texas y el norte de Tamaulipas, detrás del sistema frontal que ingresaba en el Golfo de México. Esta varianza con valores de hasta 4 m/s, está asociada a la velocidad de desplazamiento del frente frío, ya que cada configuración en las parametrizaciones físicas crea una solución diferente. Detrás del sistema frontal se observa una dispersión de 1 m/s indicando que los miembros del ensamble tienen mayor concordancia en esta zona, una vez que el Norte se establece. Una pequeña zona de dispersión de 4 m/s frente a la costa central de Veracruz, se asociaba a la varianza en la rapidez del viento previo al cruce del frente frío por este lugar, cuando la magnitud del viento promedio era de 4 m/s, interpretándose que la rapidez podía oscilar entre 0 y 8 m/s.

A las 72 horas de pronóstico (figura 3.5d), se observa que la máxima dispersión en el Golfo de México, se encuentra a lo largo de la línea frontal, desde la costa central de Florida hasta la Sonda de Campeche, con un valor máximo de 4 m/s en el centro del Golfo. Por el contrario, se aprecia que una amplia zona de baja dispersión se pronosticaba frente a la costa sur de Texas y frente a Tamaulipas, con una magnitud del viento de 10 m/s, interpretándose como una zona de alta predictibilidad una vez que el Norte se encuentra presente. En el Golfo de Tehuantepec, se predecían vientos de hasta 20 m/s en una pequeña región del norte del Golfo a la salida del Paso de Chibela y una zona más amplia de 16 m/s. La dispersión adquiere una curvatura hacia el oeste conforme se ubica al sur, recordando que en su inicio, el viento es no-geostrofico y conforme avanza al sur adquiere una trayectoria inercial. Alrededor de esta zona se pronosticaba una gran dispersión de 4 m/s, pero al centro del Golfo la dispersión es mínima, lo que indica que todos los miembros coinciden en el flujo inercial del viento, una vez que la orografía no influye en su trayectoria.

Un patrón similar al de las 48 y 72 horas de predicción, se aprecia a las 96 horas de pronóstico (figura 3.5e), con una gran dispersión a lo largo de la línea frontal pero ahora en la región noroeste del Mar Caribe. En el Golfo de Tehuantepec, se observa que la mayor dispersión se encuentra al suroeste del mismo, indicando que cada miembro difiere en la profundidad de penetración del Norte hacia el Ecuador, después de seguir su trayectoria inercial, pero con una dispersión mínima al centro de la curvatura inercial indicando que todos los miembros coinciden en

ésta región, por lo que se deduce que una vez establecido el Norte, el ensamble tiene una buena habilidad para predecir su magnitud y profundidad; ya que para todas las soluciones, influyó de la misma forma, el efecto orográfico del Paso de Chibela.

Finalmente, a las 120 horas de predicción numérica, se observa que la máxima dispersión se produce nuevamente a lo largo de la línea frontal en el Mar caribe y en el Océano Pacífico frente a la costa de Guatemala, donde el efecto orográfico crea la varianza de las soluciones.

### Mapas probabilísticos

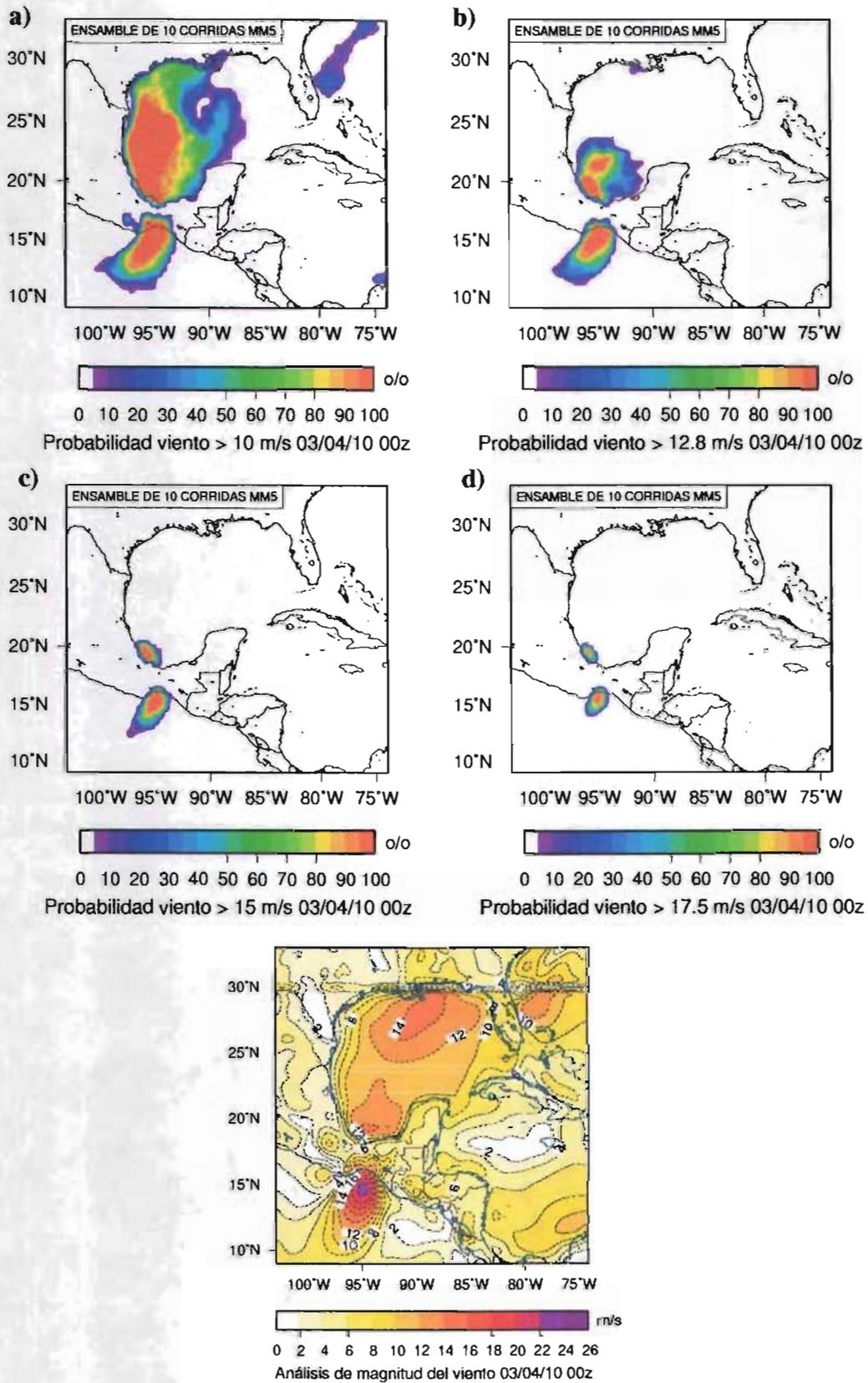
Tienen la finalidad de mostrar la probabilidad de que ocurra un evento en particular o de que se presenten valores de una variable delimitados por un umbral. Para éste estudio, se construyeron mapas de probabilidad de diferentes valores de la magnitud del viento con umbrales considerados de importancia para la navegación menor, de cabotaje y de altura.

El porcentaje de probabilidad está definido por la fórmula:

$$P = 100 \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_j^i \right) \quad . . . . . (3.2)$$

donde  $N$  es el número de miembros del ensamble y  $O_j^i$  será 1 si el evento es previsto y 0 si el evento es no previsto, acorde al umbral seleccionado. Los porcentajes de probabilidad calculados para la rapidez del viento, son los siguientes: > 10 m/s, > 12.5 m/s, > 15 m/s y > 17.5 m/s.

En los pronósticos probabilísticos para la fecha principal de Norte (72 horas), el umbral de vientos > 10 m/s (figura 3.6a), se predijo en un 100 % para la región occidental del Golfo de México, sólo de 20 a 60 % de probabilidad en la región central del mismo Golfo y 100 % de probabilidad en la totalidad del Golfo de Tehuantepec extendiéndose esta condición hasta la latitud de 11° norte, con 20% de probabilidad. Al comparar con el campo observado (figura 3.6e) se aprecia que los vientos > 10 m/s se observaron en la totalidad del Golfo de México, detrás del frente frío, desde Tampa Florida hasta Cabo Catoche, por lo que el pronóstico probabilístico en este umbral fue acertado para la



**Figura 3.6** – Pronósticos probabilísticos a 72 horas (fecha principal de Norte), para el día 10 a las 0000 Z, con magnitud del viento > 10 m/s (a), > 12.8 m/s (b), > 15 m/s (c) y > 17.5 m/s (d) y campo del viento observado (análisis) en la misma fecha y hora.

región oeste del Golfo (100 %) pero no fue preciso para la región oriental frente a Florida, donde se pronosticó 0 % de probabilidad. Para el Golfo de Tehuantepec, el ensamble acertó con probabilidades del 100 %, aunque en una región más grande que la observada.

Para las probabilidades con vientos  $> 12.5$  m/s (figura 3.6b), se pronosticaba un 100 % frente a la costa de Veracruz, y de 10 a 70 % en la región suroeste del Golfo de México; para el Golfo de Tehuantepec, se pronosticaba un 100 % de probabilidad. El campo observado mostró vientos  $> 12.8$  m/s, en la región noroeste del Golfo de México, lo que no fue pronosticado por ningún miembro del ensamble, mientras que para la región suroeste del mismo Golfo el ensamble fue acertado al presentar valores de 10 a 100 % de probabilidad. El mismo comportamiento mostró en el Golfo de Tehuantepec.

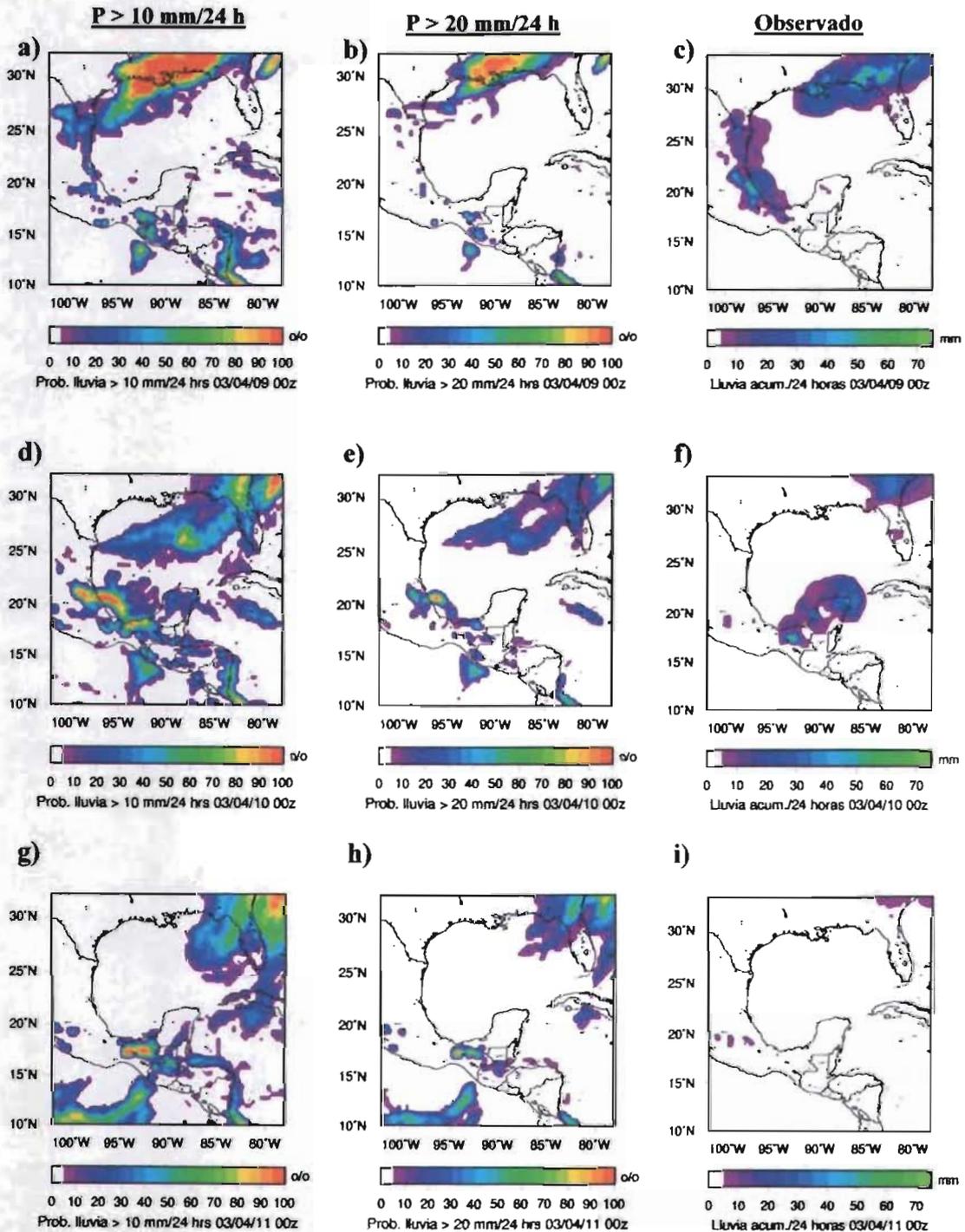
Vientos mayores a 15 m/s se observaron únicamente en la región sureste del Golfo de México, frente a la costa central de Veracruz y en el Golfo de Tehuantepec. El ensamble (figura 3.6c) acertó en ambas regiones cuando pronosticó de 40 a 100 % frente a la costa de Veracruz y 100 % de probabilidades en la región noroeste del Golfo de Tehuantepec.

Para vientos  $> 17.5$  m/s (figura 3.6d) el ensamble falló al pronosticar de 10 a 100% en una pequeña región frente a la costa central de Veracruz, cuando se observaron valores máximos de 14 m/s. En el Golfo de Tehuantepec, se pronosticaba en su región occidental del 10 a 100 %, lo que fue correcto al observarse valores máximos de hasta 22 m/s en latitud  $15^{\circ}$  N, longitud  $095^{\circ}$  W.

Las lluvias asociadas al Norte, muestran que el ensamble a 48 horas, pronosticó 100 % de probabilidad de lluvias  $> 10$  mm/24 hrs. en la región norte del Golfo de México (figura 3.7a) y 10 a 20 % de probabilidad en pequeñas regiones frente a la costa de Veracruz. Para una precipitación  $> 20$  mm/24 hrs. se predijo un 100 % de probabilidad en el norte del Golfo de México y 0% frente a la costa de Veracruz (figura 3.7b). Al comparar con el campo observado de precipitación acumulada en 24/hrs. para la fecha de pronóstico, se muestra que el ensamble fue preciso en la región norte del Golfo de México, donde precipitó de 5 a 50 mm/24 hrs., pero para la región frente a la costa desde Tamaulipas hasta el sur de Veracruz (figura 3.7c), fue impreciso ya que cayeron de 10 a 50 mm/24 hrs. en esta región y solo el umbral de lluvias  $> 10$  mm/24 pronosticó el 20 a 50 % de probabilidad,

sin que se pronosticaran probabilidades de lluvias > 20 mm/24 hrs.

A 72 horas de pronóstico, se aprecia que para los umbrales de lluvias > 10 mm/24 horas (figura 3.7d) y > 20 mm/24 horas (figura 3.7e), el ensamble fue impreciso en ambos casos ya que



**Figura 3.7** – Pronósticos probabilísticos a 48 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (a) y > 20 mm/24 hrs (b); a 72 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (d) y > 20 mm/24 hrs (e) y a 96 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (g) y > 20 mm/24 hrs (h), comparados con campos observados de lluvia para las fechas de pronóstico (c), (f) e (i). Fuente de los datos observados: NOAA/NCEP/CPC, Regional US\_Mexico, daily gridded realtime data.

únicamente ocurrieron precipitaciones en la Sonda de Campeche, norte de Yucatán y Quintana Roo (figura 3.7f).

Para las 96 horas de pronóstico, el ensamble no mostró precisión, ya que para el día 11 de abril, no se observaron precipitaciones acumuladas en las regiones del Golfo de México, Mar Caribe noroccidental y Golfo de Tehuantepec (figura 3.7i); pero con el umbral de lluvias  $> 10$  mm/24 horas, se pronosticaron probabilidades de 10 a 60% en el noroeste y 20 a 100% en el sur del Golfo de México, 10 a 70 % en el sur del Golfo de Tehuantepec y pequeñas regiones de 10 a 30% en el Mar Caribe noroccidental (figura 3.7g).

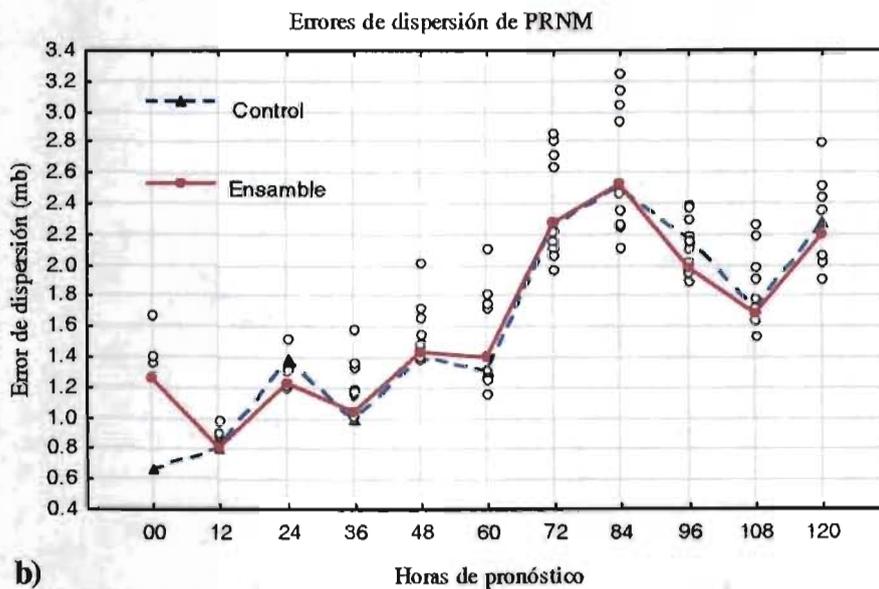
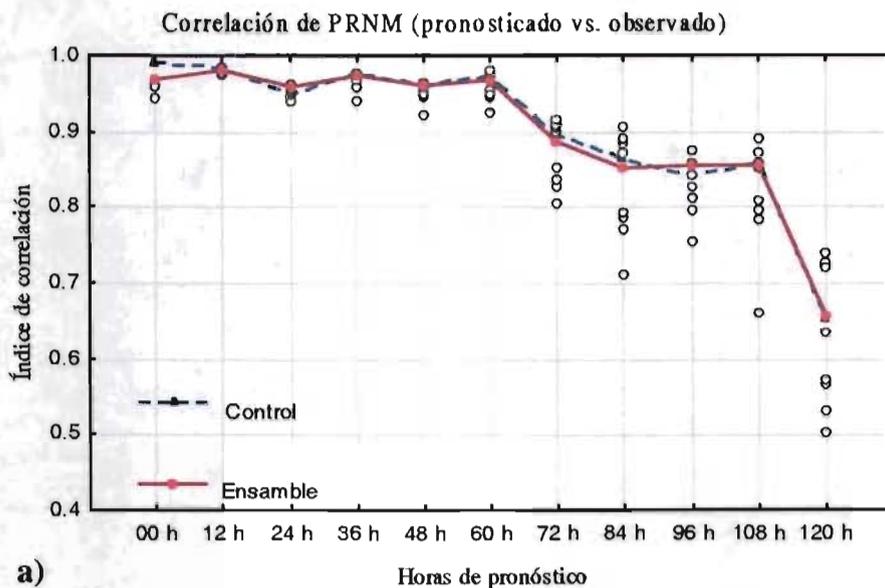
### **Evaluación del ensamble**

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo 2.5, se realizó la evaluación del ensamble de pronósticos en el área de afectación de Nortes, obteniendo la correlación entre los campos pronosticados y los de análisis, así como los errores de dispersión, con las variables de PRNM y rapidez del viento en superficie (10m).

La correlación de la PRNM muestra que el ensamble mantiene una correlación más alta con respecto a 7 de 10 miembros, incluyendo el de control (figura 3.8a), observándose una disminución significativa a partir de las 60 horas de pronóstico, la cual aumenta drásticamente a las 108 horas de predicción. En el caso del error de dispersión (figura 3.8b), el error generado por el ensamble es menor a los generados por 6 miembros del ensamble, incluyendo el de control. La habilidad de pronóstico se reduce a las 84 horas de predicción, cuando el error del ensamble alcanza su valor máximo de 2.58 mb, mientras que los miembros del ensamble fluctúan desde los 2.0 a 3.2 mb, pero a partir de este punto, el ensamble logra reducir el error de dispersión en las siguientes 24 horas de pronóstico. Al observar su valor a las 120 horas de predicción, el ensamble promedio generó un error de dispersión más bajo que 6 miembros del ensamble, mostrando una mayor habilidad de pronóstico.

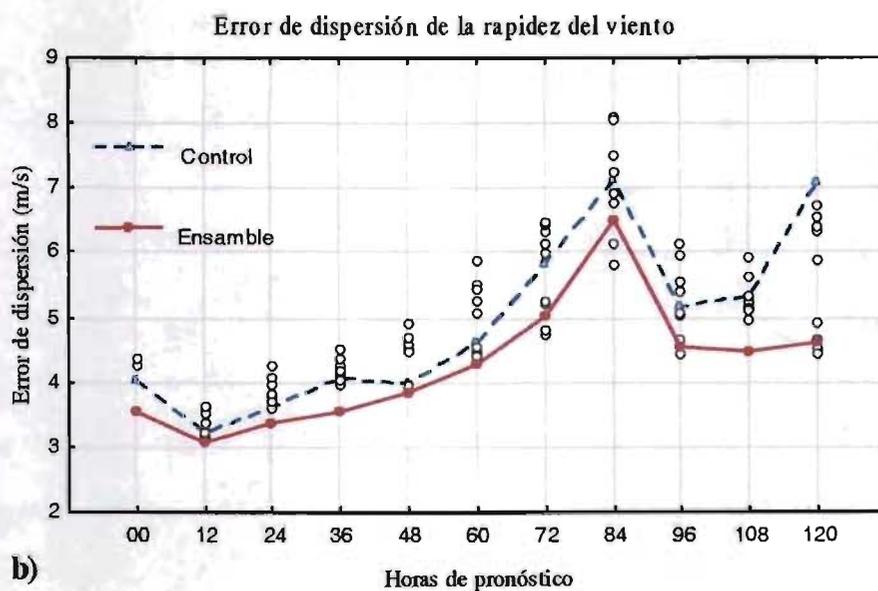
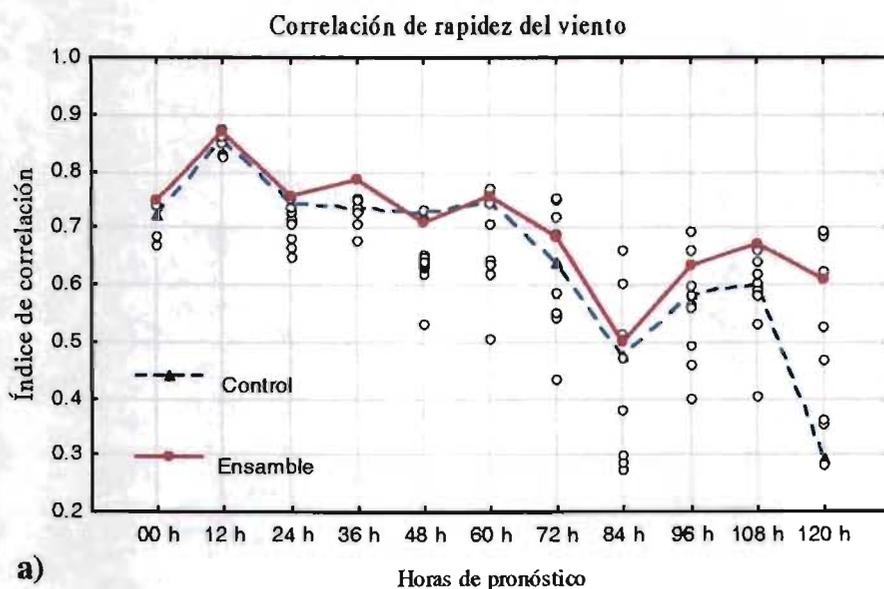
La evaluación de la rapidez del viento en superficie (10m) (figura 3.9a), muestra que la correlación entre el ensamble promedio (pronosticado) y el campo de análisis (observado), indican que inicialmente la correlación es baja, ya que las condiciones iniciales fueron modificadas por la asimilación de datos, siendo más notable con esta variable que con la PRNM. A las 12 horas de

pronóstico, alcanza su máxima correlación, lo que muestra que el modelo numérico y consecuentemente el ensamble promedio, tienden a estabilizarse después de que se alteraron los campos iniciales, minimizándose las diferencias entre los campos, antes de que inicie el crecimiento del error de dispersión por la integración numérica en el tiempo. Entre las 72 y 84 horas, se observa un descenso drástico en la correlación, alcanzando un valor mínimo de 0.50; en éste punto, se observa que 5 miembros alcanzaron valores menores a 0.5, donde el menor logró 0.28 de correlación, con respecto al campo de verificación. Posteriormente el ensamble recupera estabilidad durante las siguientes 36 horas de pronóstico, con una correlación mayor a 0.6.



**Figura 3.8** – Gráficas de correlación (a) y error de dispersión (b) de la PRNM, del 1er caso de Norte.

La evaluación del error de dispersión (figura 3.9b) muestra que, desde la condición inicial se generó un error de dispersión de 3.7 m/s como consecuencia de la modificación del campo inicial por la asimilación de datos, pero en las primeras 12 horas de pronóstico desciende este error logrando un valor mínimo de 3.1 m/s. Entre las 12 y 72 horas de pronóstico se observa un aumento paulatino del error, pero a las 84 horas de predicción, alcanza su valor máximo de 6.7 m/s. Posteriormente, el ensamble disminuye el error hasta los 4.7 m/s en las 36 horas siguientes de pronóstico. La evaluación permite apreciar que el ensamble tiene un error de dispersión menor que las soluciones determinísticas o inclusive la de control, demostrando un buen desempeño y habilidad de pronóstico.



**Figura 3.9** – Gráficas de correlación (a) y error de dispersión (b) de la rapidez del viento, del 1er. caso de Norte.

Al analizar la caída de la correlación y el aumento del error de dispersión para las 84 horas de pronóstico y al comparar con los pronósticos de altura geopotencial, PRNM y rapidez del viento promedio en superficie con la dispersión del ensamble, se observa que todos los pronósticos coinciden para este lapso de tiempo, como la mayor afectación por el Norte, creando una gran perturbación en la atmósfera, por lo que aumenta el error de dispersión y por lo tanto, disminuye la habilidad de pronóstico del ensamble promedio.

### **3.3 Segundo caso de Norte (25 al 30 de octubre 2003)**

#### **Descripción sinóptica**

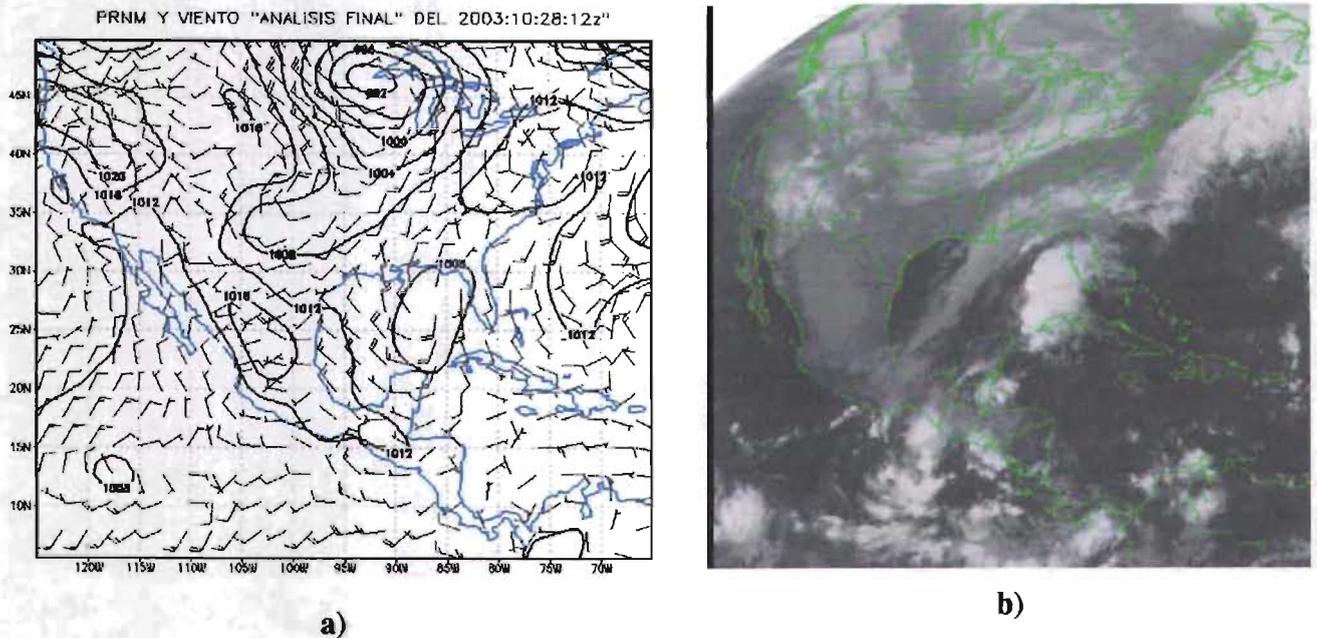
El Norte que se presentó del 26 al 28 de octubre del 2003, fue tomado como segundo caso para éste estudio. El día 25 de octubre a las 1200 Z se observaba una alta presión en superficie de 1040 milibares sobre Idaho, y desde una baja presión (relativa) de 1016 milibares sobre Virginia del Oeste, EE.UU. se desprendía un frente frío hacia el sureste, hasta una baja presión de 1010 milibares sobre Coahuila, recurvando hacia el noroeste como frente estacionario hasta el norte de Arizona.

A las 0000 Z del día 26, la línea frontal se desprendía desde una baja presión relativa de 1018 milibares sobre el sur de Indiana hacia el sureste hasta otra baja presión relativa de 1018 sobre Coahuila donde se extendía como un nuevo frente frío hasta el norte de Chihuahua, con una alta presión asociada de 1032 milibares sobre el sur de Dakota; los vientos en la región oeste del Golfo de México eran del sureste de 5.1 a 7.7 m/s. Esa noche el frente frío ingresó al Golfo de México ubicándose a las 1200 Z del día 26 desde una baja presión de 1017 milibares sobre Ohio hasta la costa de Louisiana y prolongándose sobre el Golfo de México hasta la costa norte de Tamaulipas, recurvando hacia el norte del país como frente estacionario.

A las 0000 Z del día 27 de octubre, la línea frontal se encontraba estacionaria desde una baja presión relativa de 1014 milibares sobre Alabama hasta la costa sur de Tamaulipas, con una alta presión asociada de 1035 milibares sobre el este de las Rocallosas en Colorado. Detrás del frente estacionario, se observaron vientos del noroeste de 12.8 m/s en Matamoros, Tamps., de 9.7 m/s en La Pesca, Tamps., y la boyas oceánica 42002 de la NOAA registró vientos del norte de 7.2 m/s.

Para las 1200 Z se había formado una baja presión de 1010 milibares en el noreste del Golfo de México y de ésta se desprendía hacia el sureste el frente frío hasta la costa central de Veracruz, prolongándose hacia el noroeste hasta el sur de Zacatecas; la alta presión asociada era de 1027 milibares sobre Coahuila; el frente frío generó lluvias a su paso registrando Matamoras 39.14 mm acumulados en 24 horas con vientos del norte de hasta 17.5 m/s y en La Pesca 7.9 mm acumulados en 24 horas, con vientos del norte de 14.4 m/s.

El día 28 a las 0000 Z el frente se encontraba estacionario, se desprendía desde la baja presión de 1006 milibares en el noreste del Golfo de México hasta la costa sur de Veracruz, extendiéndose hasta el oriente de Jalisco; la alta presión asociada era de 1016 milibares sobre el sur de Coahuila. A las 1200 Z el frente frío había avanzado hacia el sureste y se encontraba desde la baja presión ahora de 1005 milibares en el noreste del Golfo de México hasta la costa oriental de Yucatán, prolongándose hasta el norte de Oaxaca (figura 3.10 a y b); en el oeste del Golfo de México, aún se registraban vientos del norte y noroeste de 10.3 m/s.



**Figura 3.10** – Condiciones sinópticas de Norteamérica durante el segundo caso de Norte, el 28 de octubre del 2003 a las 1200 Z. En a) se muestra la PRNM (milibares) y viento en superficie (nudos) y en b) la imagen del satélite GOES-12 en espectro infrarrojo 4, del 28 de octubre del 2003 a las 1215 Z. Fuente: Final Analysis, NCAR / Historical Goes Browse Server - NOAA.

A las 0000 Z del día 29, el frente frío se desprendía desde una baja presión de 1001 milibares en el noroeste de Florida, hasta la costa de Belice, detrás de esta se observaron vientos del norte y noroeste en las regiones central y oriental del Golfo de México y en su región occidental habían

cambiado al sureste; la alta presión asociada se debilitaba y era de 1016 milibares sobre el centro de Veracruz. Al sur del Golfo de Tehuantepec se había formado una baja presión de 1008 milibares en latitud 10° N longitud 095° W, manteniendo un ligero gradiente de presión (de 8 milibares), respecto al suroeste del Golfo de México, esto favoreció para que el viento cambiara al noroeste con una rapidez de 5.1 m/s. Finalmente a las 1200 Z el frente frío se ubicaba desde el sur de Florida hasta la costa sur de Belice, afectando con vientos del norte a la región occidental del Mar Caribe y al Canal de Yucatán.

En el Golfo de Tehuantepec, quikscat registró vientos del norte de 10.3 a 12.8 m/s los días 28 y 29 de octubre.

Las fechas seleccionadas para el pronóstico a 120 horas son del día 25 a las 0000 Z al día 30 a las 0000 Z.

### **Descripción del pronóstico numérico**

El segundo caso de Norte únicamente empleó 10 experimentos de pronóstico, con las configuraciones de parametrizaciones físicas descritas en el capítulo 3.2, conformando con ello los miembros del ensamble.

En la condición inicial, el diagrama tipo espagueti (figura 3.11a), muestra tres isobaras diferentes a la del promedio, lo que indica tres condiciones iniciales (control, análisis objetivo Cressman y análisis objetivo multicuadrático).

A las 24 horas de pronóstico (figura 3.11b), se aprecia la formación de una alta presión de 1032 milibares sobre Colorado, indicando la génesis de Norte; las isobaras de 1016 a 1032 milibares sobre el área continental están muy juntas respecto a las isobaras de 1012 y 1016 milibares sobre el Océano Pacífico ecuatorial, Golfo de México y Mar Caribe que están más separadas, lo que indica mayor sensibilidad con las parametrizaciones físicas seleccionadas para cada miembro del ensamble sobre las áreas tropicales, por lo que cada solución determinística posiciona éstas isobaras en un lugar diferente.

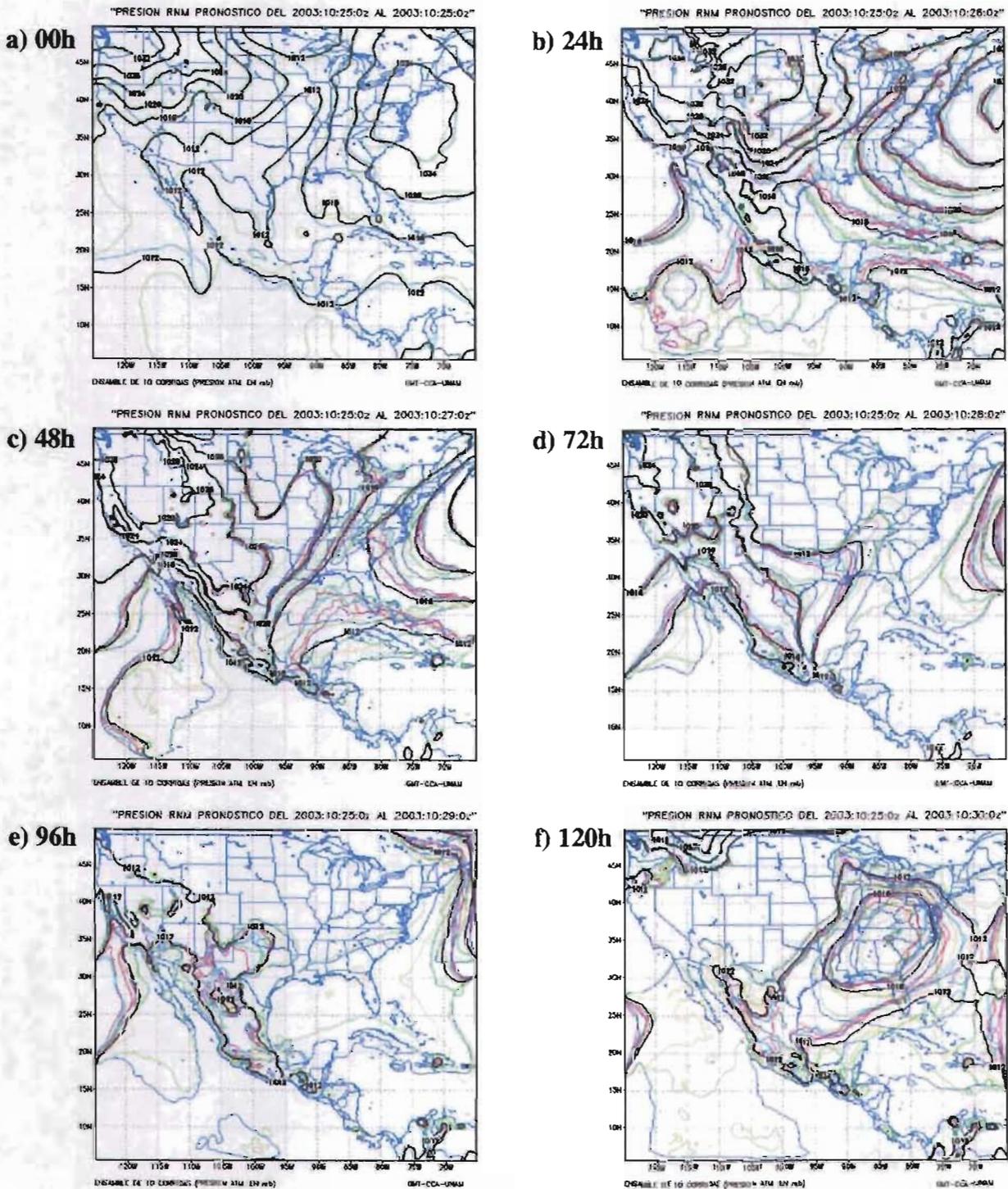


Figura 3.11 – Mapas tipo espagueti del 2° caso de Norte, desde la condición inicial el 25 de octubre a las 0000 Z (a) con pronóstico de PRNM a 24(b), 48(c), 72(d), 96(e) y 120(f) horas. El intervalo de cada línea es de 4 milibares con valor mínimo de 1012 milibares y el valor promedio lo indica el rótulo (línea negra más gruesa).

En el pronóstico a 48 horas (figura 3.11c), se observa que la alta presión sobre Colorado ha disminuido a 1028 milibares y se extiende como una cuña hacia el norte de México, la isobara de

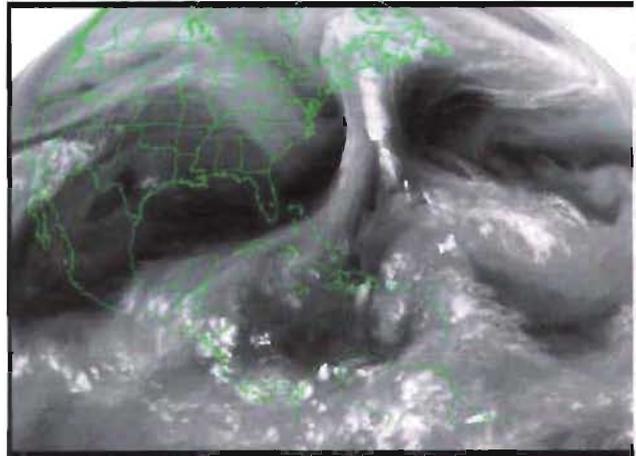
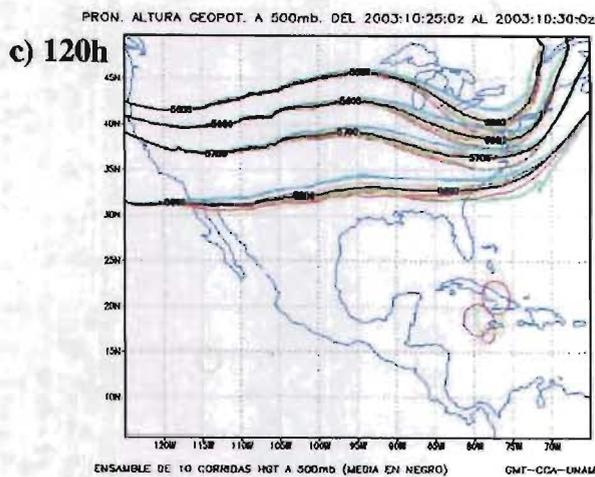
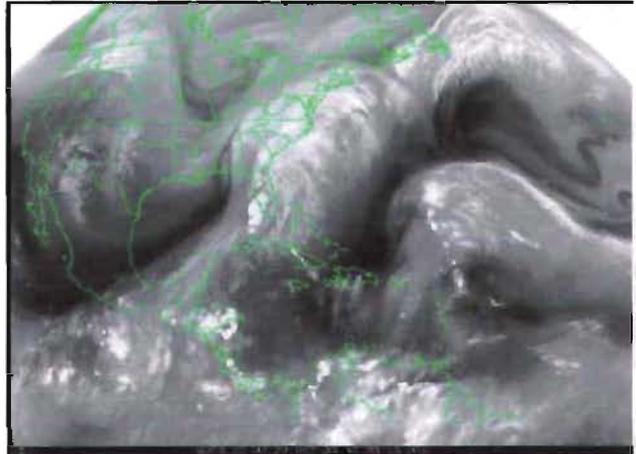
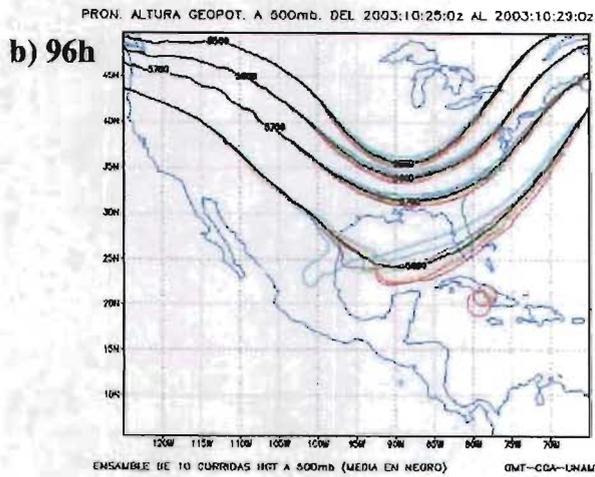
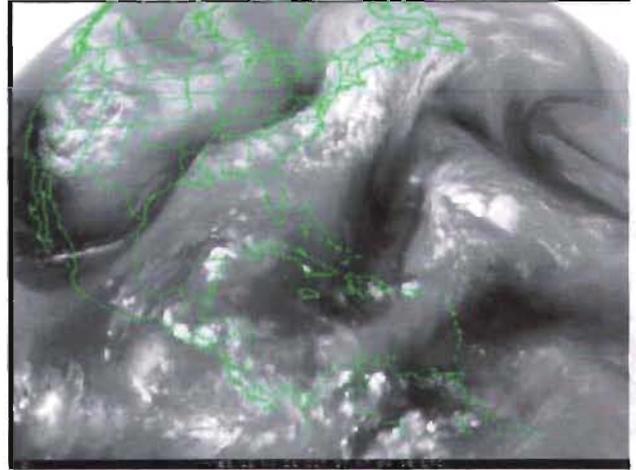
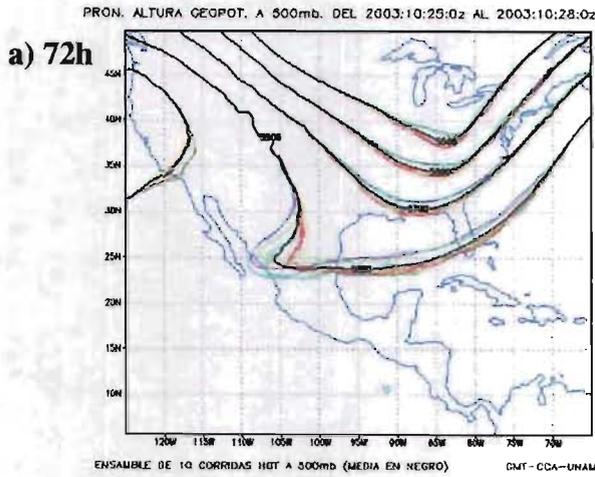
1016 milibares se internaba hasta el norte de Oaxaca, ocasionando que el gradiente de presión entre el norte del Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec fuera de sólo 8 milibares. Sobre el Golfo de México, la isobara de 1012 milibares genera una gran dispersión entre los miembros, indicando una alta sensibilidad a las parametrizaciones físicas empleadas en áreas tropicales, por lo que esta zona tiene baja predictibilidad.

A las 72 horas de pronóstico (figura 3.11d), se aprecia que sobre el norte de México, la PRNM era de 1016 milibares con una amplia dispersión entre los miembros del ensamble, además de que en el sur y sureste de los EE.UU. se formaba una amplia región con valores de 1012 milibares. El pronóstico a 96 horas (figura 3.11e), tiene una mayor dispersión en los miembros al posicionar la isobara de 1012 milibares sobre el norte de México, donde se forman dos grupos de soluciones con el ensamble promedio, indicando una gran incertidumbre en el pronóstico para ésta fecha y región. A las 120 horas de pronóstico (figura 3.11f), en el este de los EE.UU. se forma una amplia zona de alta presión (1016 milibares), pero con una dispersión aún mayor; mientras que en el sur del Golfo de México, la isobara de 1012 milibares tiene una gran dispersión entre los miembros, que inclusive es difícil distinguir con el ensamble promedio, indicando una gran incertidumbre en el pronóstico y por lo tanto baja predictibilidad para esta región a las 120 horas.

El ensamble de la PRNM no predijo la alta presión de 1035 milibares al este de las rocallosas en Colorado, a sólo 48 horas de pronóstico. Este caso de Norte no presenta un comportamiento como el del patrón compuesto de Nortes, estando más influenciado por las condiciones tropicales que por las de latitudes medias, recordando que es el inicio de la temporada de Nortes.

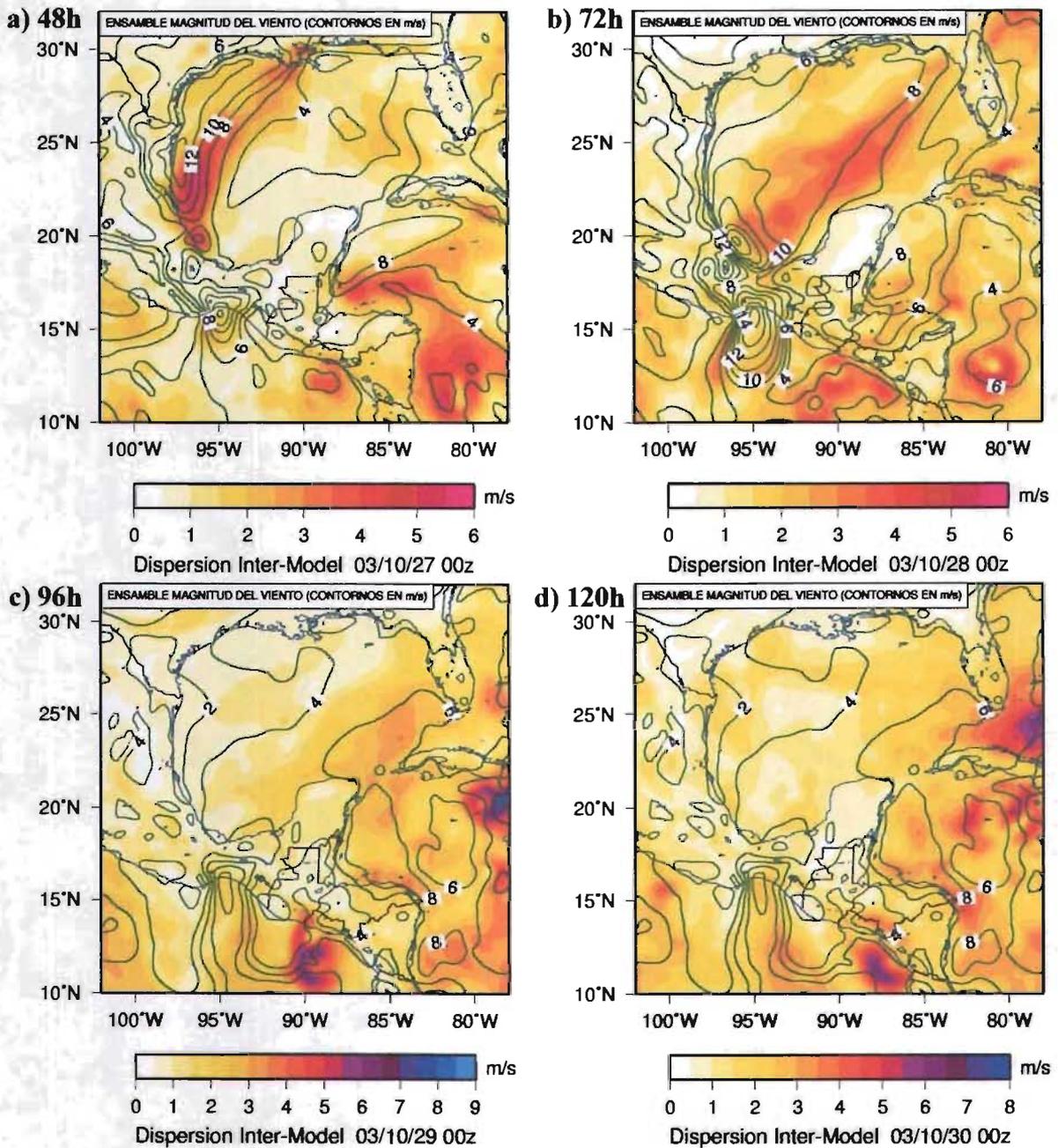
Al analizar la evolución de la Onda de Rossby en latitudes medias con el pronóstico por ensambles de altura geopotencial a 500 milibares, se aprecia que a las 72 horas de predicción (figura 3.12a), sobre el norte de México existía una gran dispersión entre los miembros del ensamble, pero la imagen de satélite en el espectro de vapor de agua, muestra que la corriente de chorro subtropical se encontraba sobre esa región. A las 96 horas de predicción, (figura 3.13b), se observa que la onda se ha movido al este, mostrando una circulación ciclónica en niveles medios al sur de los grandes lagos, confirmado con la imagen satelital en vapor de agua para esa fecha y hora. Con el pronóstico a 120 horas, se pronóstico que la onda continuaba su movimiento hacia el este, aunque el ensamble mostraba la mayor dispersión entre los miembros sobre la costa oriental de los EE.UU. La imagen de

satélite en vapor de agua correspondiente a la fecha y hora del pronóstico, muestra que efectivamente se posicionaba sobre ésta región (zona más oscura).



**Figura 3.12** – Pronóstico de altura geopotencial a 500milibares (espagueti): 72(a), 96(b) y 120(c) hrs. El intervalo de cada línea es de 100 m, con valor mínimo de 5500 m. El valor promedio del ensamble lo indica el rótulo (línea negra más gruesa).

Con éste segundo caso de Norte, se vuelve a confirmar que con ambas variables, los miembros del ensamble aumentan la dispersión entre ellos, conforme aumenta el tiempo de pronóstico.



**Figura 3.13** – Ensamble del pronóstico de la magnitud del viento en superficie (10 m, en contornos) y dispersión del ensamble (desviación estándar) indicado por los valores sombreados en colores: 48 horas (a), y 72 horas (b), 96 horas (c) y 120 horas (d). El intervalo entre líneas del valor promedio es de 2 m/s.

Al observar los pronósticos de la magnitud del viento en superficie con la dispersión (desviación estándar), se observa que a las 48 horas de pronóstico, la mayor dispersión entre los

miembros (figura 3.13a), se encuentra frente a la costa sur de Tamaulipas, detrás de la línea frontal, indicando que cada solución determinística difiere en la posición de la línea frontal y en los valores de la magnitud del viento una vez que cruza la línea frontal.

En el pronóstico a 72 horas (figura 3.13b), se observa una situación similar en el centro del Golfo de México, con valores de desviación estándar de 4 m/s, interpretándose que la rapidez del viento para esta zona es de 8 m/s en promedio  $\pm$  4 m/s, o sea con un rango desde 4 a 12 m/s. A las 96 horas de pronóstico (figura 3.13c), la mayor dispersión se ubica en una región adyacente a la línea frontal en el sureste de Cuba con desviación estándar de hasta 6 m/s ( $\pm$  6) y una magnitud del viento promedio de 8 m/s, o sea con valores de 2 a 14 m/s y en el Océano Pacífico, frente a la costa de El Salvador, donde la orografía y las condiciones tropicales cercanas crean estas diferencias, tal como sucede en el Golfo de Tehuantepec, pero desfasado en el tiempo, conforme avanza la línea frontal sobre el Mar Caribe Noroccidental.

A 120 horas de pronóstico (figura 3.13d), la mayor incertidumbre se ubica al oriente del Canal de Florida, coincidiendo con la ubicación de la línea frontal. En el Océano Pacífico frente a la costa de Nicaragua, también se observa una gran dispersión asociada al Norte, ya que por la orografía cercana a la costa y por el gradiente de presión entre ésta zona y el Mar Caribe, se pronostica una gran incertidumbre, en forma similar al Golfo de Tehuantepec, tal como lo indica Schultz et., al., (1998), para el Golfo de Papagayo. Cada miembro difiere en el resultado de la rapidez del viento.

En general se aprecia que la mayor incertidumbre se pronostica en las regiones con mayor perturbación atmosférica, a lo largo o en regiones adyacentes a la posición del frente frío pronosticado por el ensamble, así como en aquellas donde la orografía juega un papel preponderante como se observa a los costados del Golfo de Tehuantepec, Golfo de Fonseca y Golfo de Papagayo, en el Pacífico Nororiental.

Los pronósticos probabilísticos a 72 horas para el día 28 de octubre a las 0000 Z de la magnitud del viento, indicaban para el umbral de 10 m/s (figura 3.14a), se pronosticaba una amplia zona con 100% de probabilidad en el oeste del Golfo de México detrás de la línea frontal y las probabilidades disminuyen hasta un 10 %, conforme aumenta la distancia a la costa. Probabilidades

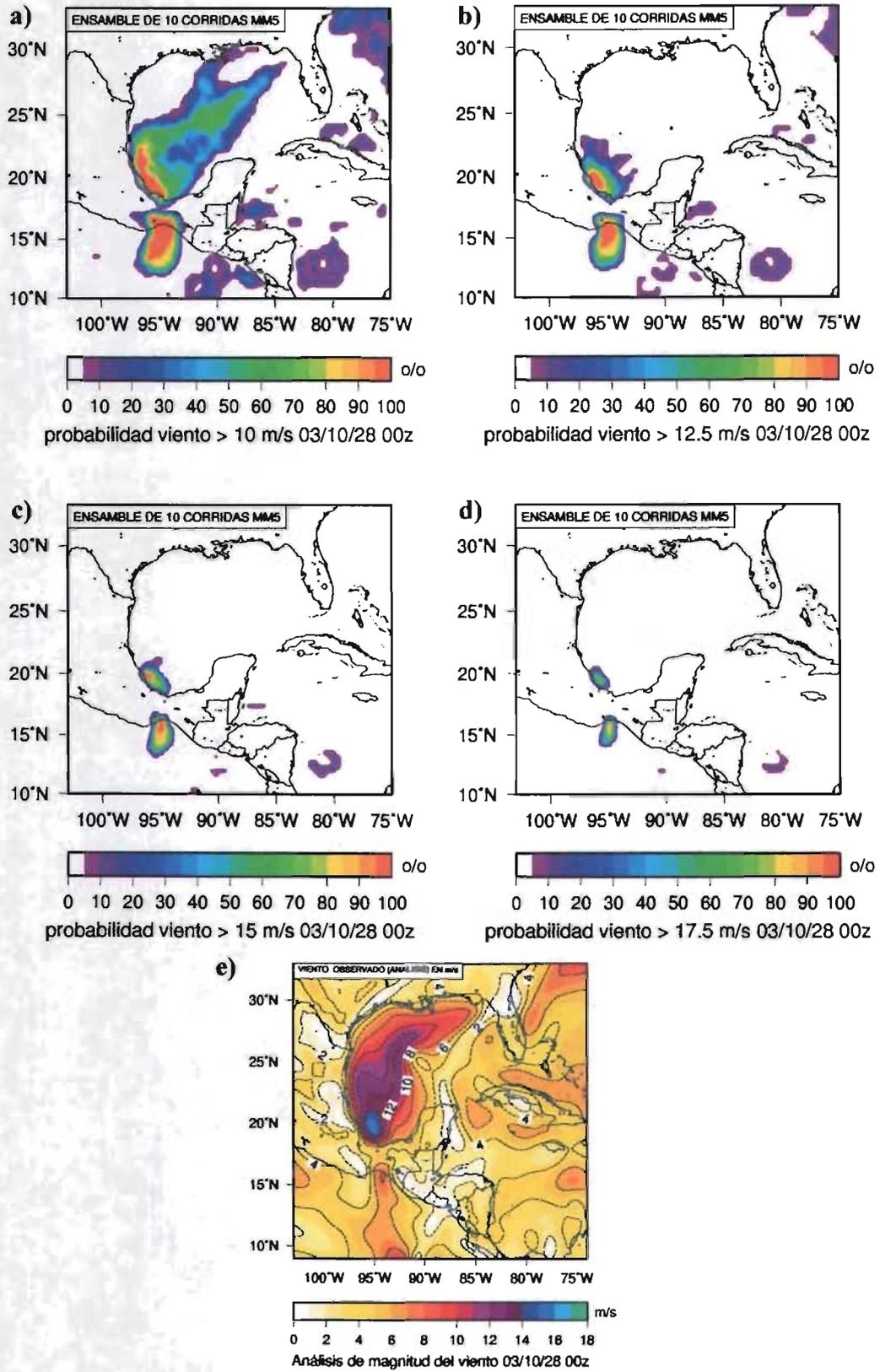


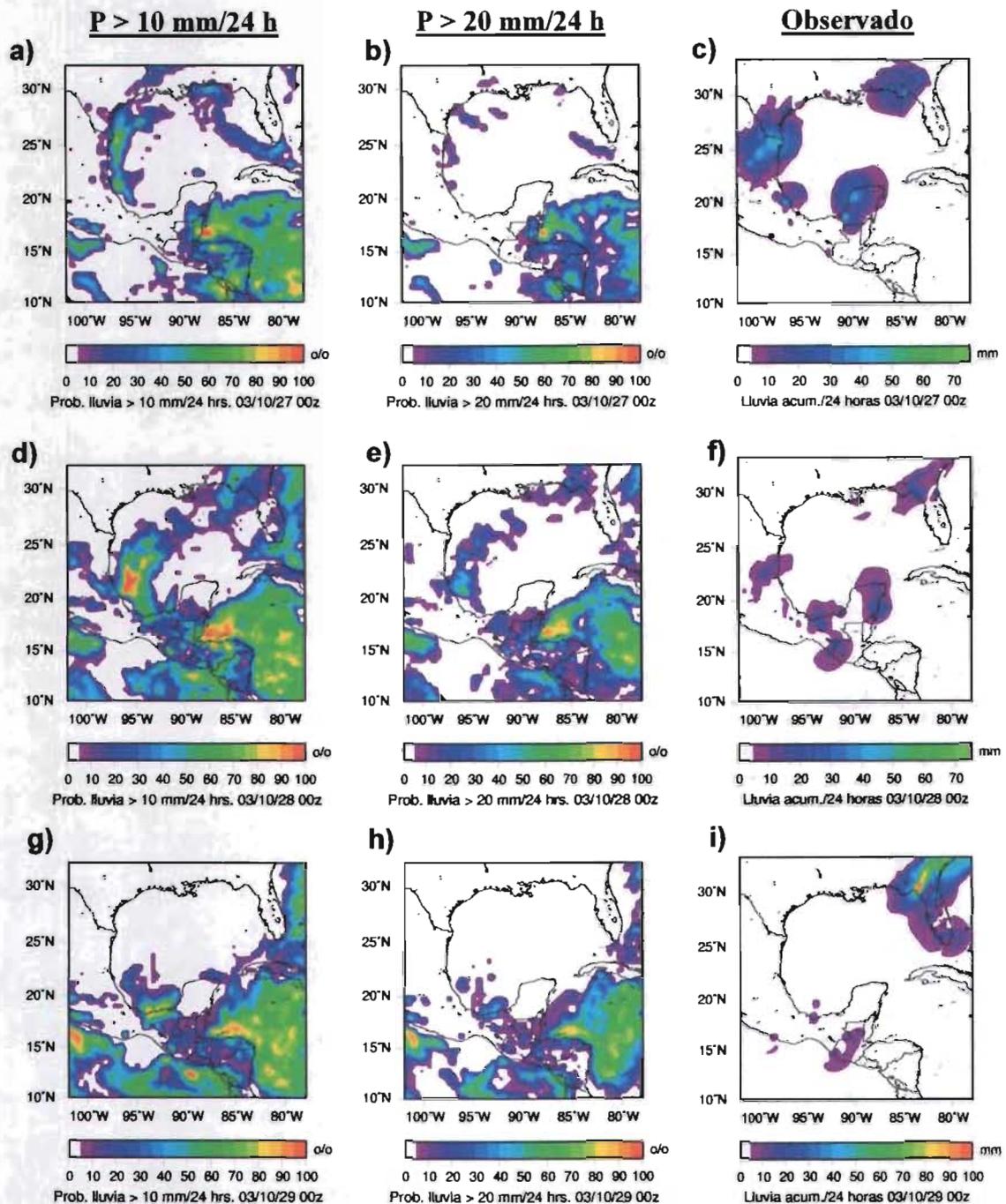
Figura 3.14 – Mapas probabilísticos para el día 28 de octubre 2003 a las 0000 Z, para magnitudes del viento >10 m/s (a), > 12.5 m/s (b), > 15 m/s (c) y >17.5 m/s (d).

de 100 % se pronosticaron en la totalidad del Golfo de Tehuantepec y éstas disminuían a ambos costados del Golfo, indicando la diferencia existente entre los miembros del ensamble.

La probabilidad de viento  $> 12.5$  m/s (figura 3.14b), era de 100% únicamente en una pequeña región frente a la costa central y sur de Veracruz y casi en la totalidad del Golfo de Tehuantepec. Las probabilidades de viento  $>$  a 15 m/s (figura 3.14c), sólo se pronosticaban en una región más reducida del suroeste del Golfo de México frente a Veracruz con probabilidades de 10 a 100 % así como en las regiones central y oeste del Golfo de Tehuantepec. Finalmente la probabilidad de magnitudes  $>$  17.8 m/s (figura 3.14d), se pronosticaron por 5 miembros del ensamble (50 %) frente a la costa sur de Veracruz y en la región noroeste del Golfo de Tehuantepec se mostraban valores de 10 a 80 %, indicando que 2 soluciones determinísticas no sobrepasaban este umbral.

Al comparar con el campo de análisis (figura 3.14e) se aprecia que el pronóstico probabilístico para el Golfo de México fue preciso con el umbral de viento  $>$  a 10 m/s, para vientos  $>$  12.5 m/s no fue preciso para la región central y norte, con vientos  $>$  15 m/s fue preciso ya que coincide con lo observado frente a la costa central y sur de Veracruz y finalmente con el umbral de 17.5 m/s (categoría 8 en la escala de Beaufort) no fue preciso, ya que para esa fecha y hora, el análisis muestra valores máximos de 16 m/s. Con respecto a lo pronosticado en el Golfo de Tehuantepec, fue impreciso con los 4 umbrales, ya que se observaron valores máximos de 8 m/s. Esto indica que en general el ensamble y todos los miembros pronosticaron que ya a las 72 horas estaría el Norte afectando el sur del Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec, pero se observa que el frente frío se desplazó más lento de lo pronosticado.

El pronóstico a 48 horas indicaba que con el umbral de lluvias  $>$  10 mm/24 horas, (figura 3.15a) el ensamble predecía una probabilidad de 70 % frente a la costa desde el sur de Texas hasta la región central de Veracruz , 50 % de probabilidad en el norte y hasta un 100 % frente a la costa de Belice. Para el umbral de lluvias  $>$  20 mm/24 horas (figura 3.15b), se pronosticó de 10 a 30 % de probabilidad frente a la costa en el sur de Texas y en el norte de Tamaulipas e igualmente 100 % frente a la costa de Belice. El campo de precipitación observado para esa fecha y hora (figura 3.15c), mostró lluvias de 40 mm en el norte de Tamaulipas, 20 mm en el noreste del Golfo de México, por lo que el ensamble fue preciso para esas dos regiones pero impreciso para el oeste de la Península de



**Figura 3.15** – Pronósticos probabilísticos a 48 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (a) y > 20 mm/24 hrs (b); a 72 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (d) y > 20 mm/24 hrs (e) y a 96 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (g) y > 20 mm/24 hrs (h), comparados con campos observados de lluvia para las fechas de pronóstico (c), (f) e (i). Fuente de los datos observados: NOAA/NCEP/CPC, Regional US\_Mexico, daily gridded realtime data.

Yucatán, donde precipitaron 40 mm que no fueron pronosticados por el ensamble.

El campo de precipitación acumulada en 24 horas para el día 28 de octubre a las 00Z, muestra lluvias de 25 mm en el norte de Florida, 10 mm frente a la costa sur de Tamaulipas, 20 mm en el sur

del Golfo de México y en el sur de Quintana Roo y en la región central de Chiapas (figura 3.15d), por lo que se observa que el pronóstico probabilístico a 72 horas sobreestimó la lluvia con los umbrales de lluvias  $> 10$  mm/24 horas (figura 3.15d) y  $> 20$  mm/24 horas (figura 3.15e).

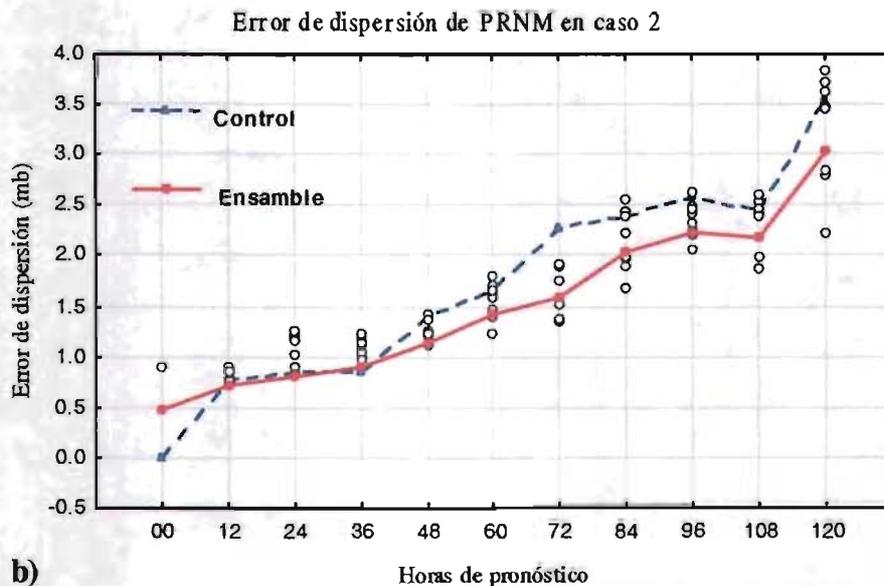
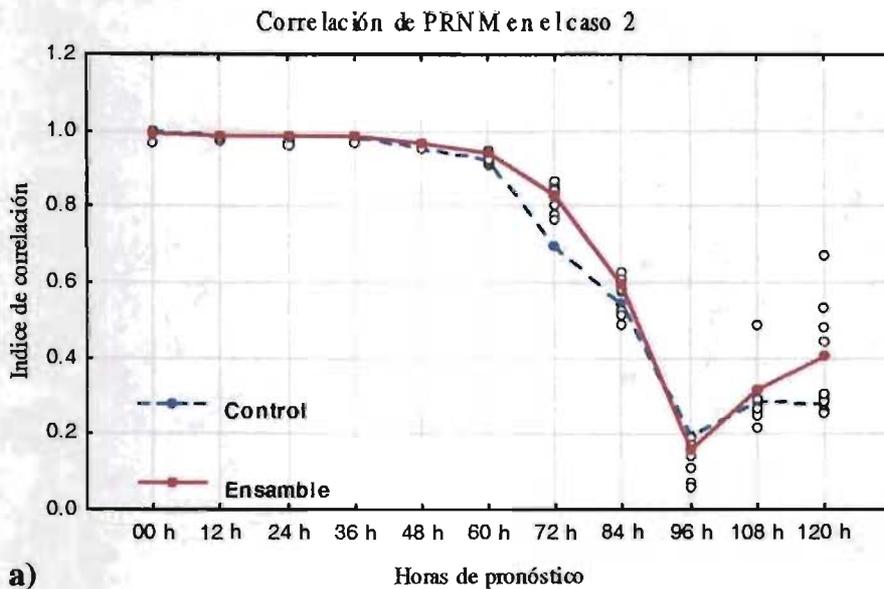
El mismo comportamiento tuvo el ensamble para los pronósticos probabilísticos a 96 horas, ya que se observaron precipitaciones de 90 mm en el norte de Florida que no fueron pronosticados por ambos umbrales y lluvias de 10 a 15 mm en pequeñas regiones frente a la costa sur de Veracruz y sobre una amplia zona de Guatemala (figura 3.15i), cuando con el umbral de lluvias  $> 10$  mm/24 horas, se pronosticaba de 60 a 100 % en la costa de Tabasco, 20 a 40 % en el Canal de Yucatán, 60 a 100 % en la totalidad de la región noroccidental del Mar Caribe y de 10 a 60 % de probabilidades en sobre el área continental desde Chiapas hasta Nicaragua.

Al comparar los resultados de ambos casos de Norte, se aprecia que los pronósticos probabilísticos tanto de magnitud de viento como de precipitación acumulada en 24 horas, fueron menos precisos en el segundo caso, mostrando que el ensamble tiene menos habilidad en el pronóstico ante un caso de inicio de temporada de Nortes, y aún influenciado por las condiciones tropicales.

### **Evaluación del ensamble**

La correlación de PRNM (figura 3.16a), muestra que para el punto inicial de verificación (condición inicial a 00 horas de pronóstico), la correlación de todos los miembros y por consecuencia la del ensamble es muy alta, indicando que la asimilación de datos de ésta variable no fue muy significativa durante el análisis objetivo, por lo que las condiciones iniciales creadas posteriormente no difieren mucho de la inicial. De las 00 a las 60 horas de predicción, se observa un descenso paulatino en la correlación donde las soluciones están muy agrupadas, pudiendo interpretarse como condiciones de alta predictibilidad. A partir de las 60 horas, la correlación desciende drásticamente desde 0.97 hasta 0.18 para el ensamble durante las siguientes 36 horas. En el valor mínimo de 0.18 a las 96 horas de pronóstico, se observa una mayor dispersión de los miembros con valores entre 0.2 a 0.04, posteriormente el ensamble gana correlación en las últimas 36 horas de predicción, alcanzando un valor de 0.4 a las 120 horas. En este periodo de tiempo, se puede apreciar que las soluciones tienen una dispersión mayor entre 0.64 y 0.24, donde el miembro de control tiene 0.26 de

correlación. Con ésta evaluación, se observa que el ensamble tiene una correlación más alta que el miembro de control, pero para éste caso en particular, solo superó a 5 de 10 miembros. La predictibilidad se limita hasta las 84 horas de pronóstico ya que posteriormente la correlación del ensamble cae por debajo de 0.6 en el índice de correlación.



**Figura 3.16** – Correlación (a) y error de dispersión (b) de la PRNM, al evaluar el caso 2 de Norte.

El error de dispersión de la PRNM (figura 3.16b), muestra que en la condición inicial el miembro de control tiene 0.0 de error de dispersión, mientras que el ensamble comienza su evolución con un valor de 0.5. El error crece paulatinamente de 0 a 108 horas de pronóstico y posteriormente en las últimas 12 horas, la tendencia de crecimiento aumenta. El ensamble concluye su evolución con

un error de dispersión de 3.0 milibares, superando a 7 de 10 miembros, incluido el de control.

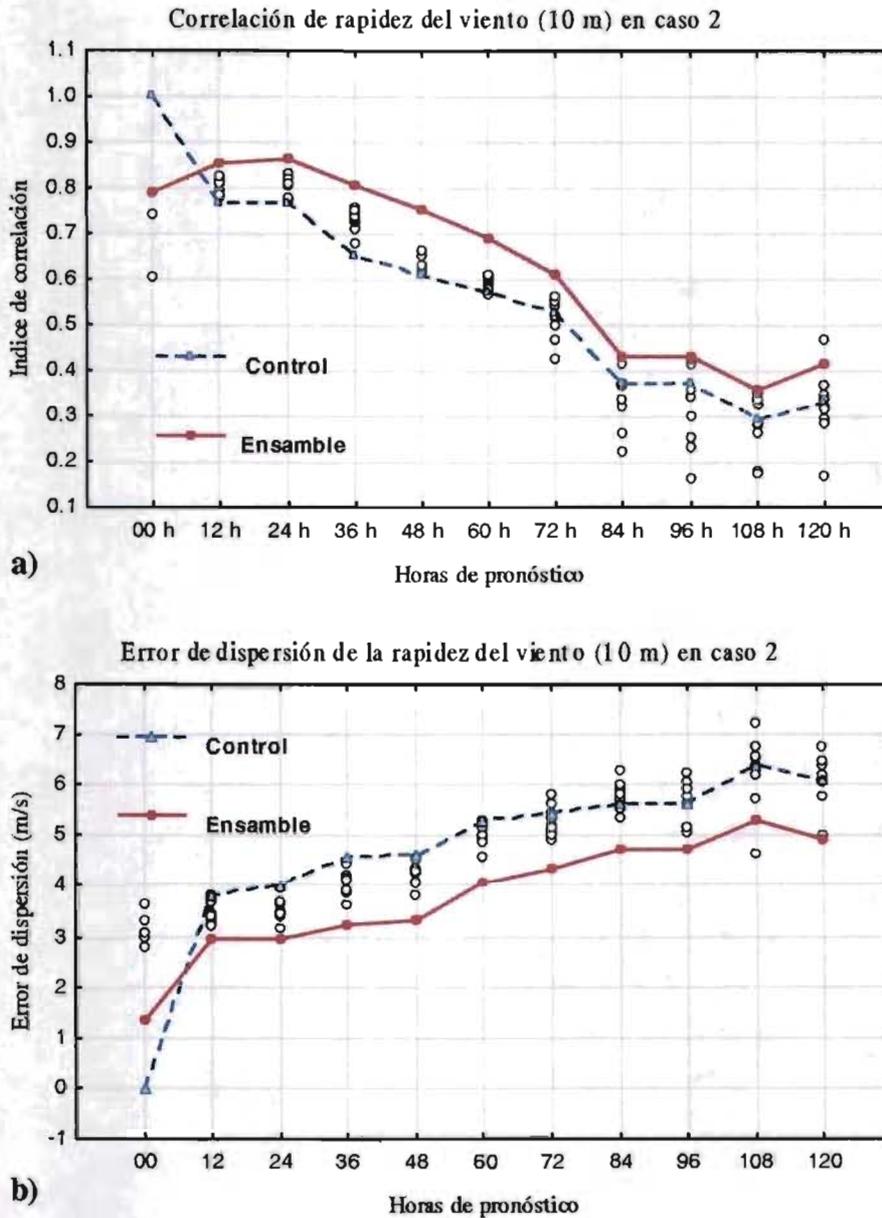


Figura 3.17 – Correlación (a) y error de dispersión (b) de la rapidez del viento, al evaluar el caso 2 de Norte.

La gráfica de la correlación de la rapidez del viento (figura 3.17a), muestra que en la condición inicial, el campo de control tiene un valor de 1.0, y los campos de condición inicial modificada muestran valores de 0.77 hasta 0.61, lo que indica que para la rapidez del viento, el análisis objetivo sí modificó en buena medida la condición inicial, mediante los esquemas de Cressman y multicuadrático, lo que puede inducirse al gran número de datos de viento (incluidos los de quikscat) en comparación con la cantidad de datos asimilados de PRNM. El ensamble parte su evolución en la gráfica con un valor de 0.81 (promedio de los 3 campos iniciales). En las primeras 24

horas de predicción, el ensamble gana correlación alcanzando su máximo de 0.88, posteriormente descendiendo paulatinamente hasta las 72 horas de pronóstico cuando tiene una correlación de 0.62, y la tendencia de disminución aumenta hasta las 108 horas de pronóstico cuando alcanza su mínimo valor 0.37, concluyendo con un valor de 0.41. Se observa que el ensamble tiene la correlación más alta desde las 12 hasta las 108 horas de pronóstico y sólo en el último tiempo de evaluación es superado por un miembro. El límite de predictibilidad para éste caso y variable es de 72 horas, cuando la correlación es aún ligeramente superior a 0.6.

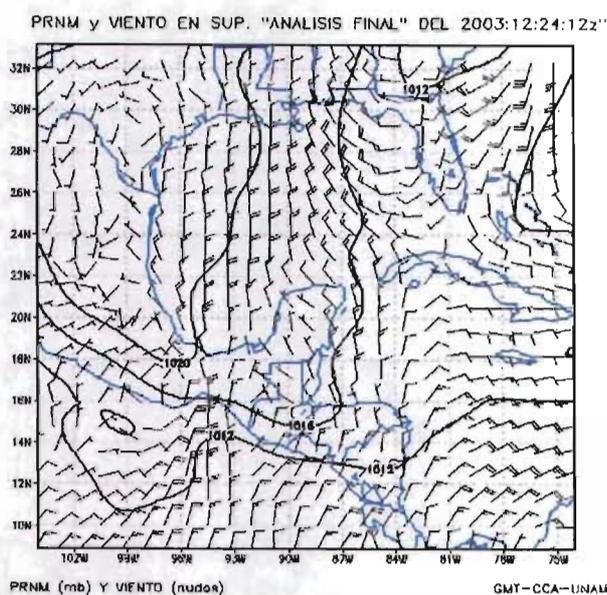
El error de dispersión de la rapidez del viento (figura 3.17b), exhibe que el ensamble también es superior a todos los miembros, excepto en la evaluación a 108 horas de predicción, cuando es superado únicamente por un miembro, notándose que para éste tiempo, el ensamble alcanza su valor máximo de 5.3 m/s de error de dispersión.

### **3.4 Tercer caso de Norte (21 al 26 de diciembre de 2003)**

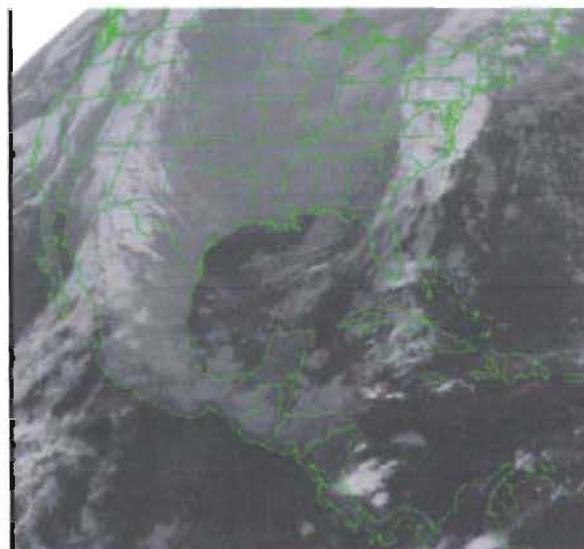
Este caso de Norte muestra la evolución de un sistema típico de la temporada invernal en México, por lo que fue seleccionado para éste estudio, con fecha principal de Norte el 23 de diciembre del 2003. El día 22 de diciembre a las 0000 Z se observaba una baja presión de 1006 milibares sobre el norte de Texas y una alta presión de 1016 milibares en el este de Utah, en Zacatecas se encontraba una baja presión de 1008 milibares; los vientos en la totalidad del Golfo de México y el Mar Caribe eran del este y sureste de 5.1 a 7.7 m/s. A las 1200 Z, una alta presión en superficie de 1032 milibares se ubicaba sobre Colorado y desde una baja presión de 1007 milibares sobre el norte de Texas se desprendía un frente frío hacia el oeste hasta Chihuahua, mientras una amplia zona sobre el centro de México tenía presiones de 1023 milibares.

El día 23 a las 0000 Z la baja presión en Texas era de 1006 milibares, el frente frío se extendía hasta el norte de Coahuila, la alta presión asociada era de 1030 milibares sobre Colorado y las altas presiones sobre el centro de México se disipaban. A las 1200 Z, desde una baja presión de 1003 milibares ubicada en el norte de Mississippi, se desprendía la línea frontal hacia el suroeste hasta la costa norte de Tamaulipas, recurvando hacia el noroeste hasta el norte de Chihuahua, la alta presión asociada se había reforzado con valor de 1036 milibares ubicada sobre Utah.

A las 0000 Z del día 24 de diciembre, el frente frío se ubicaba desde la baja presión de 1009 milibares sobre Alabama, hasta la costa central de Veracruz, recurvando hacia el noroeste como frente estacionario hasta el sur de Chihuahua; la alta presión asociada era de 1029 milibares sobre Colorado. Isla Lobos y Antón Lizardo, Ver., registraron el cruce de la línea frontal a las 18:30 Z y 21:30 Z, respectivamente, con vientos del norte de 14.9 m/s, tres horas después en ambas estaciones. A las 1200 Z el frente frío se ubicaba desde una baja presión de 1012 milibares en el noreste del Golfo de México hasta el este de Chiapas (figura 3.18), la alta presión que impulsaba al sistema, se ubicaba en el sur de Colorado con 1028 milibares; quikscat calculó vientos de 12.8 a 15.4 m/s en el Golfo de México detrás de la línea frontal y de 15.4 a 18 m/s en el Golfo de Tehuantepec.



a)



b)

**Figura 3.18** – Condiciones sinópticas de Norteamérica durante el segundo caso de Norte, el 24 de diciembre del 2003 a las 1200 Z. En a) se muestra la PRNM (milibares) y viento en superficie (nudos) y en b) la imagen del satélite GOES-12 en espectro infrarrojo 4, del 24 de diciembre del 2003 a las 1215 Z. Fuente: Final Analysis, NCAR / Historical Goes Browse Server - NOAA.

Para el día 25 a las 0000 Z, el frente frío continuaba su avance hacia latitudes tropicales, ubicándose desde una baja presión de 1006 milibares sobre New Jersey, cruzaba el centro de Florida y el Canal de Yucatán hasta el norte de Chiapas; su alta presión asociada era de 1024 milibares sobre Missouri; los vientos del Norte se presentaban solamente en las regiones central y este del Golfo de México, detrás de la línea frontal y en el en el Golfo de Tehuantepec, donde quikscat calculó vientos de 18 a 20.5 m/s en su región norte. A las 1200 Z, la baja presión en el este de los EE.UU. se ubicaba sobre Vermont con 1004 milibares, de donde se extendía el frente frío hasta la región central de Cuba, cruzando el noroeste del Mar Caribe hasta la costa central de Honduras; los vientos del Norte

se observaban en la región este del Golfo de México y en el Caribe detrás de la línea frontal, mientras que en el Golfo de Tehuantepec aún persistían del norte de 15.4 a 18 m/s.

A las 0000 Z, del 26 de diciembre, el frente frío se había internado en el Mar Caribe, ubicándose desde una baja presión de 1000 milibares en el sureste de Canadá hasta el Cabo Gracias a Dios en Honduras, cruzando por el centro de Cuba. Las afectaciones del Norte sólo se observaban en el noroeste del Mar Caribe detrás del frente frío, con vientos de 10.2 a 12.8 m/s y continuaban en el Golfo de Tehuantepec de la misma magnitud.

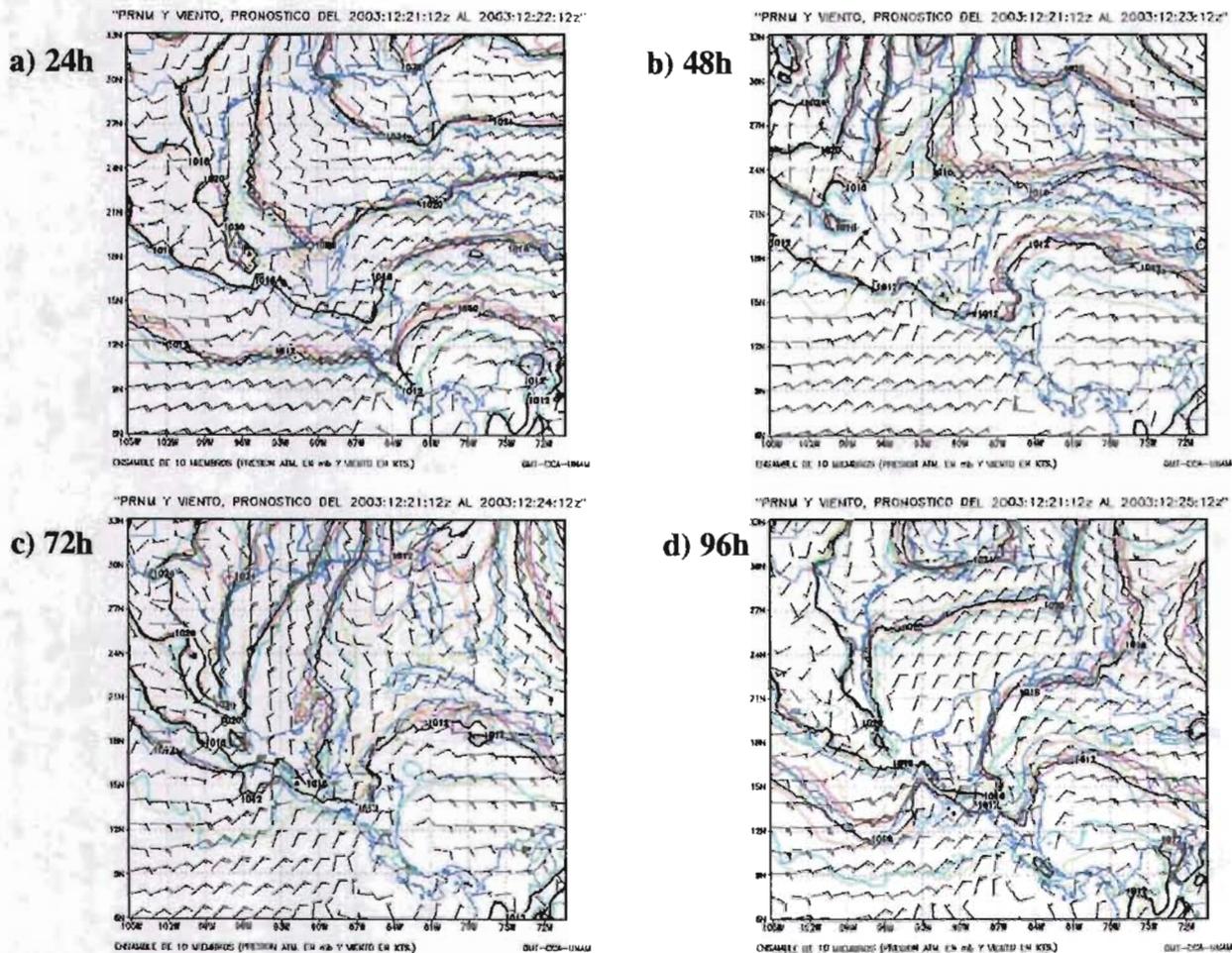
Las fechas seleccionadas para el pronóstico a 120 horas fueron del día 21 a las 12:00 Z al día 26 a las 12:00 Z.

### **Pronóstico numérico**

Para este 3er. caso de Norte, se muestra el ensamble con los diagramas tipo espagueti de la PRNM y el promedio del viento, como una alternativa de presentar los resultados.

A las 24 horas de pronóstico (figura 3.19a), se ubicaba una isobara de 1020 milibares cruzando de norte a sur el Golfo de México (posicionada por todos los miembros del ensamble), además de que en toda ésta zona se pronosticaban vientos del este y sureste en forma similar al patrón compuesto de Nortes. El pronóstico a 48 horas (figura 3.19b), muestra que la PRNM disminuye en la región suroeste del Golfo de México, los vientos en la región noroeste del Golfo de México han rolado al suroeste mientras que en el sur de Texas ya se fijaban del noroeste, apreciándose que la línea frontal se encuentra entre estas dos zonas. A 72 horas de predicción (figura 3.19c), la línea frontal continuó su avance hacia el sureste, ubicándose desde la región noroeste de Florida hasta la región occidental de Yucatán; detrás de la línea frontal se pronosticaron vientos del norte de 10.3 m/s (20 nudos) en las regiones oeste y central del Golfo de México; en el Golfo de Tehuantepec se pronosticaba que la isobara de 1012 milibares se ubicaba en la región sur debido a la penetración de la masa de aire frío proveniente del Golfo de México, además de que la dispersión entre cada solución era mínima, los vientos promedio eran del norte y noreste de 12.8 a 15.4 m/s (25 a 30 nudos) debido al gradiente de presión de 12 milibares con respecto al sur de los EE.UU. A las 96 horas de pronóstico (figura 3.19d), se observaba que la isobara de 1012 milibares al sur del Golfo

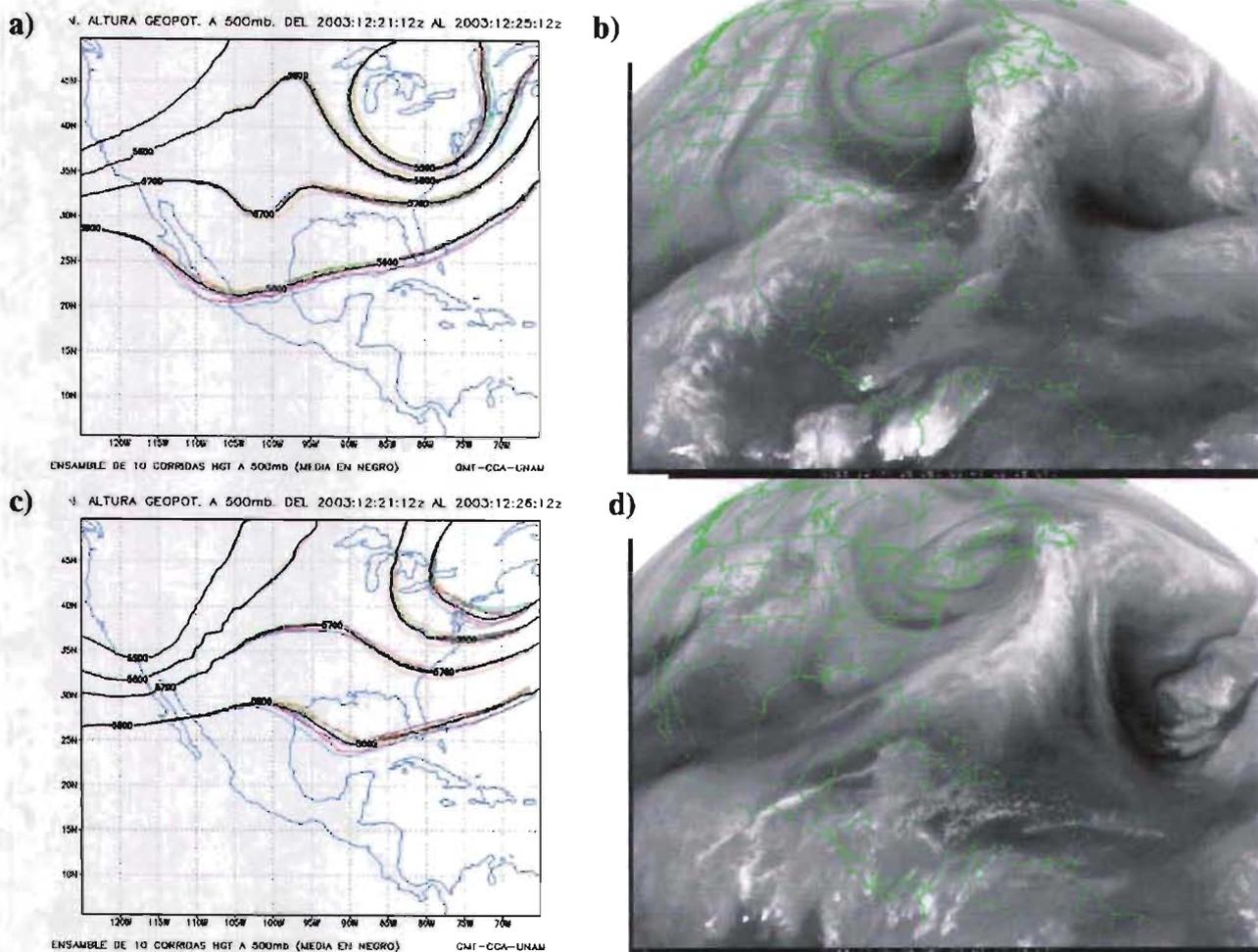
de Tehuantepec, se había desplazado aún más hacia el sur, el ensamble la posicionaba hasta la latitud de 12° norte con una gran dispersión entre los miembros (sensibilidad a las parametrizaciones físicas en latitudes tropicales), los vientos promedio en el Golfo de Tehuantepec se pronosticaban de 12.8 a 15.4 m/s (25 a 30 nudos).



**Figura 3.19** –Diagramas tipo espagueti del 3er. caso de Norte, pronóstico de PRNM (espagueti) y vectores promedio del viento a 24(a), 48(b), 72(c) y 96 horas (d). El intervalo de cada línea es de 4 milibares con valor mínimo de 1016 milibares. El valor promedio del espagueti lo indica el rotulo (línea negra más gruesa) y los vectores indican el viento promedio de las 10 soluciones en nudos.

Los pronósticos de altura geopotencial a 500 milibares a 96 horas (figura 3.20a) y a y 120 horas (figura 3.20b), mostraban en niveles medios de la tropósfera, una circulación ciclónica asociada a la onda de Rossby, en el noreste de los EE.UU., la cual fue pronosticada en ambos casos por todas los miembros del ensamble, aunque con una dispersión considerable entre cada una de las soluciones, precisamente sobre la zona donde existe la mayor perturbación atmosférica. Al comparar las imágenes de satélite en el espectro de vapor de agua (figura 3.20c) y (figura 3.20d), se observa que para cada hora de pronóstico del ensamble, coincide para la misma región la circulación

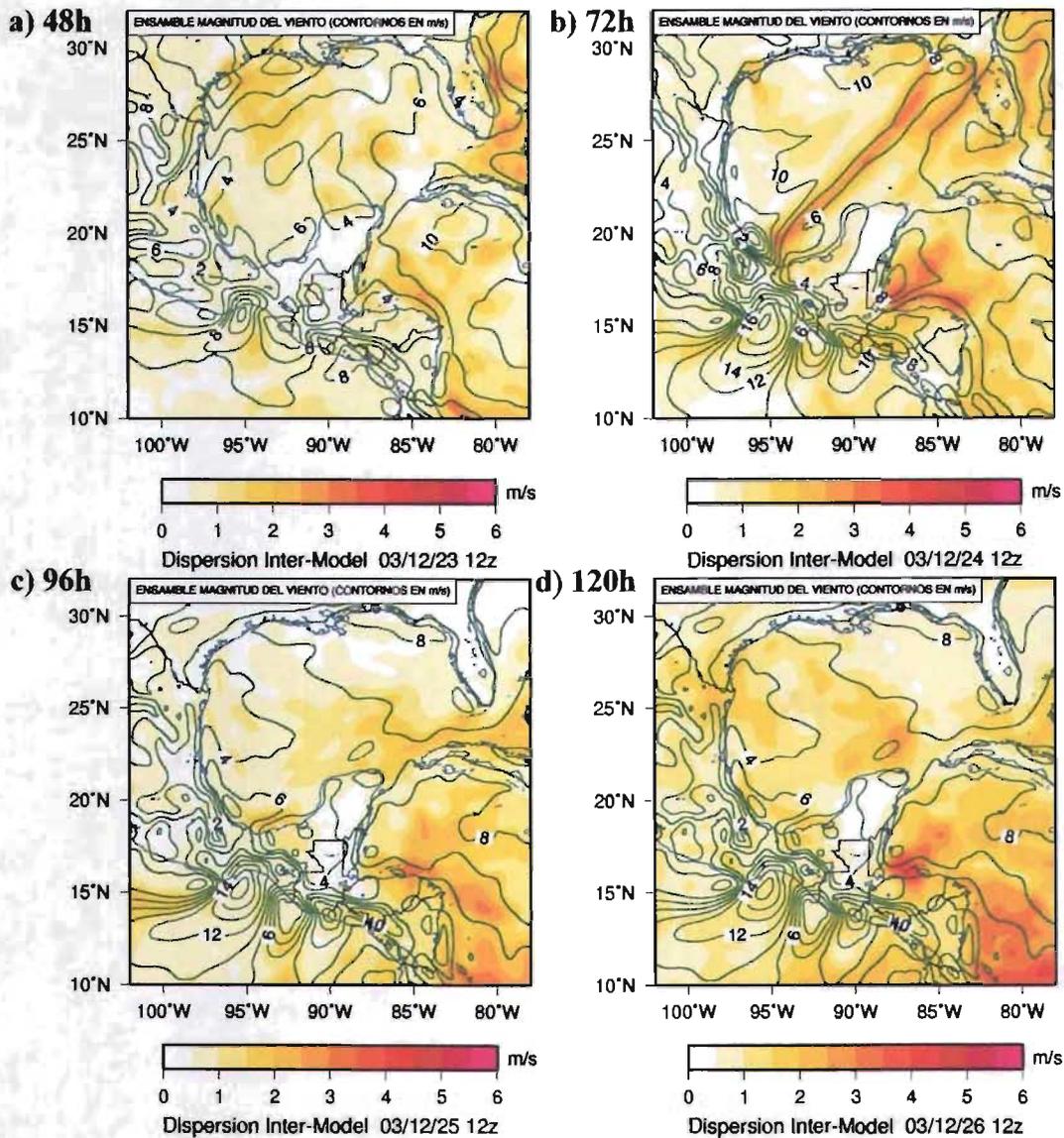
ciclónica en niveles medios, marcada por las zonas más oscuras en la imagen de satélite, sobre el noreste de los EE.UU. (figura 3.20b) y sobre la península de Labrador en Canadá (figura 3.20d), respectivamente.



**Figura 3.20** – Pronóstico de altura geopotencial a 500milibares a 96 (a) y 120 (b) horas en diagramas tipo espagueti del 3er. caso de Norte, e imágenes del satélite GOES-12 en espectro de vapor de agua, para las correspondientes horas de pronóstico (b y d).

El ensamble del pronóstico a 48 horas de la magnitud del viento en superficie (figura 3.21a) muestra que la dispersión (desviación estándar) es mínima, unas horas antes de que ingrese el frente frío al Golfo de México. A 72 horas de predicción (figura 3.21b), la mayor dispersión se vuelve a observar a lo largo de la línea frontal, o sea en los puntos de la malla donde existía la perturbación atmosférica (en forma similar que en los casos anteriores); en el Golfo de Tehuantepec se observa una dispersión mínima, demostrando lo explicado en los casos números 1 y 2. A las 96 horas de pronóstico, se observa que la mayor dispersión de las soluciones determinísticas, están relacionadas con la posición de la línea frontal, en la región noroeste del Mar Caribe y en el canal de Florida. A

las 120 horas de pronóstico, una gran dispersión se apreciaba en el mar Caribe asociándose al grado de penetración del Norte a esta zona, indicando una baja predictibilidad del Norte a las 120 horas de pronóstico (figura 3.21d).



**Figura 3.21** – Ensamble del pronóstico de la magnitud del viento en superficie (a 10 m, en contornos) y dispersión del ensamble (desviación estándar) indicado por los valores sombreados en colores: 48 horas (a), 72 horas (b), 96 horas (c) y 120 horas (d). El intervalo entre líneas del valor promedio de la magnitud del viento es de 2 m/s.

Los pronósticos probabilísticos a 72 horas para el día 24 de diciembre a las 0000 Z de la magnitud del viento, indicaban para el umbral de 10 m/s (figura 3.22a), se pronosticaba una amplia zona con 100% de probabilidad en el oeste del Golfo de México detrás de la línea frontal y las probabilidades disminuyen hasta un 10 %, conforme aumenta la distancia desde la costa hacia la región noreste del Golfo. Probabilidades de 100 % se pronosticaron en la totalidad del Golfo de

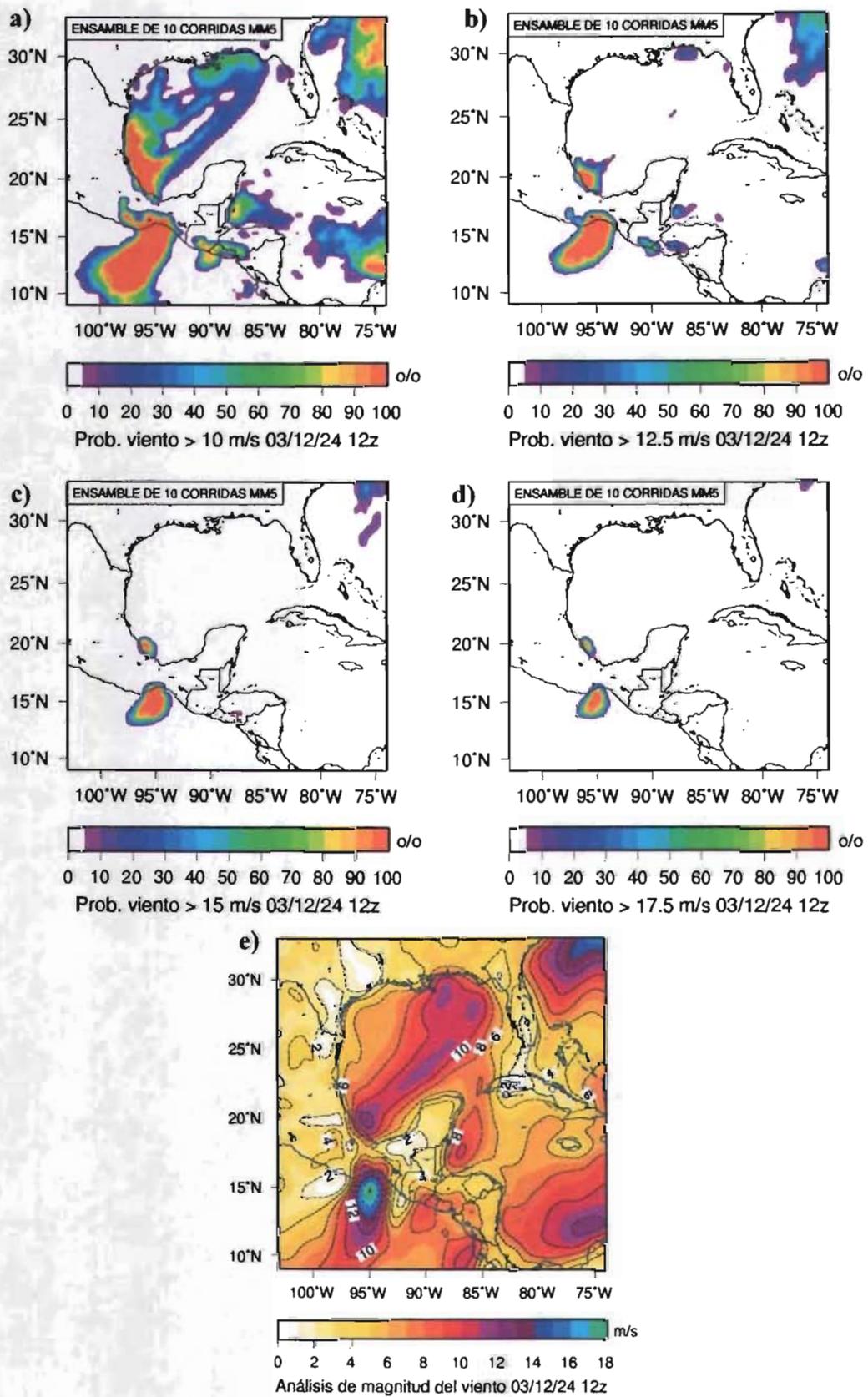


Figura 3.22 – Mapas probabilísticos para el día 24 de diciembre de 2003 a las 0000 Z, para magnitudes del viento >10 m/s (a), > 12.5 m/s (b), > 15 m/s (c) y >17.5 m/s (d) y campo observado (análisis) (e).

Tehuantepec. La probabilidad de viento  $> 12.5$  m/s (figura 3.22b), era de 100% únicamente en una pequeña región frente a la costa central y sur de Veracruz y en la totalidad del Golfo de Tehuantepec. Las probabilidades de viento  $> 15$  m/s (figura 3.22c), sólo se pronosticaban en una región más reducida del suroeste del Golfo de México frente a Veracruz con probabilidades de 10 a 100 % así como en las regiones central y oeste del Golfo de Tehuantepec. Las probabilidades de vientos  $> 17.8$  m/s (figura 3.22d), eran de 10 a 100 % en una región muy pequeña en el suroeste del Golfo de México, frente a la costa sur de Veracruz, mientras que en la región noroeste del Golfo de Tehuantepec se mostraban valores de 10 a 100 %.

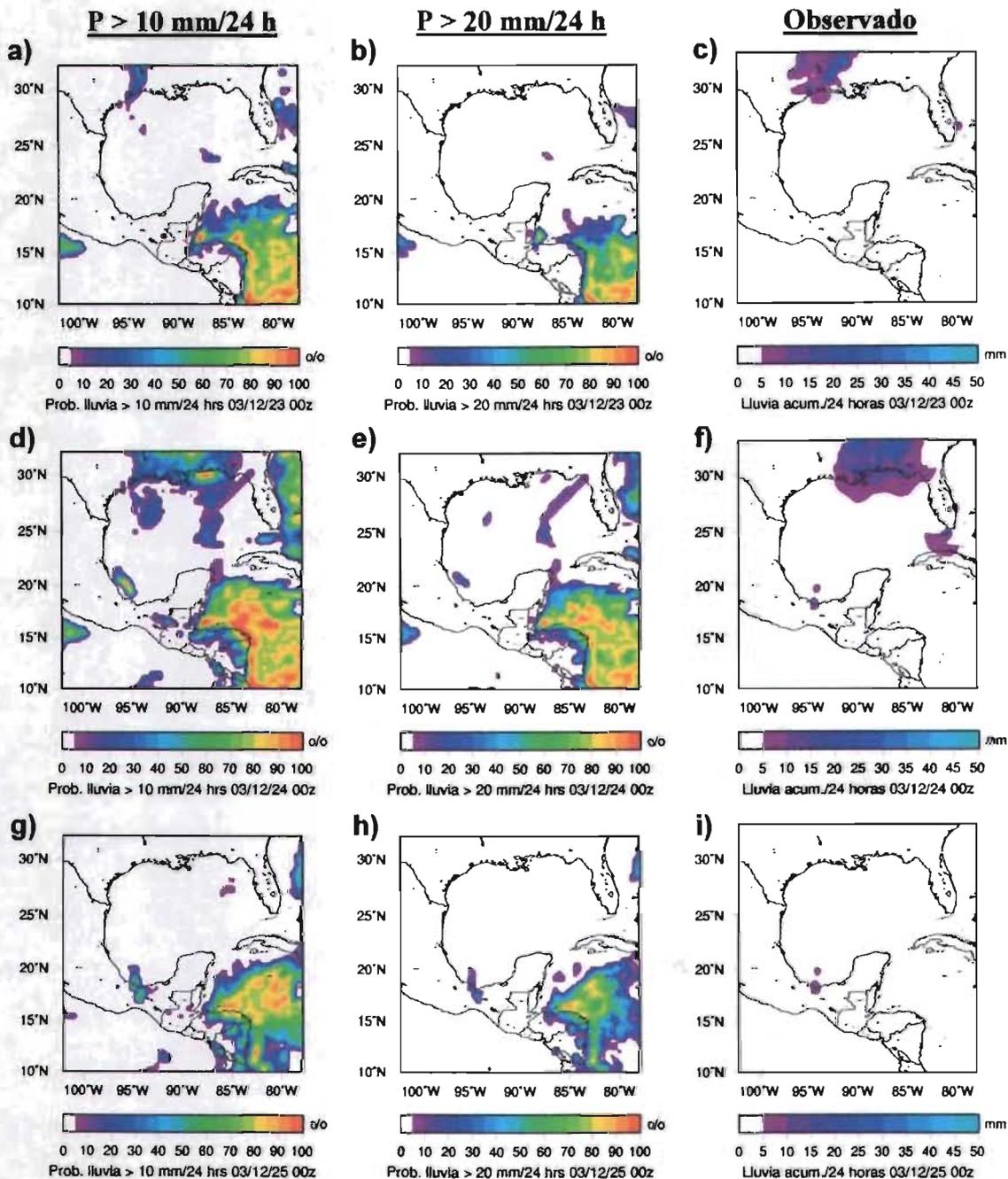
Al comparar con el campo de análisis (figura 3.22e) se aprecia que el pronóstico probabilístico para el Golfo de México también fue preciso con el umbral de viento  $> 10$  m/s, para vientos  $> 12.5$  m/s no fue preciso para la región noreste del Golfo de México, con vientos  $> 15$  m/s no fue preciso frente a la costa central y sur de Veracruz y finalmente con el umbral de 17.5 m/s, no fue preciso frente a la costa central y sur de Veracruz, ya que el análisis muestra valores máximos de 14 m/s. Con respecto a lo pronosticado en el Golfo de Tehuantepec, fue preciso con los 4 umbrales, ya que se observaron valores máximos de 18 m/s.

En éste tercer caso de Norte, el ensamble demostró la mejor habilidad de pronóstico, en comparación con los otros dos casos de Nortes.

El ensamble pronóstico probabilidades de 20 a 30 % con lluvias  $> 10$  mm/24 hrs (figura 3.23a) en la costa de Texas, mientras que solo un 10 % con lluvias  $> 20$  mm/24 hrs (figura 3.23b) en una área pequeña en la región central del Golfo de México, siendo acertado en ambos casos al comparar con el campo de lluvias observadas para esa fecha (figura 3.23c), pero en la región central y en el noroeste del Mar Caribe, el ensamble pronostico hasta un 100 % de probabilidades para el umbral de lluvias  $> 20$  mm/24 hrs, cuando en realidad no se presentaron lluvias.

Para las 72 horas de predicción, la probabilidad de lluvias  $> 10$  mm/24 hrs (figura 3.23d) era de 20 a 100 % frente a la costa central y sur de Veracruz, 10 a 100 % en el noreste del Golfo de México, frente a Florida y frente a la costa de Quintana Roo y en el sur del canal de Yucatán, hasta un 100 % en el noroeste del Mar Caribe, producto de la línea frontal. Las probabilidades de lluvias  $> 20$  mm/24 hrs (figura 3.23e) eran de 10 a 20 % a lo largo de una línea diagonal desde el noreste del

Golfo de México, hacia el sur del mismo, asociándose a la línea frontal pronosticada, y de 10 a 60 % en la costa de Quintana Roo, pero hasta un 100 % en la región central del Mar Caribe. En realidad, las lluvias observadas (figura 3.23f) fueron de 10 a 20 mm en la costa norte y noreste del Golfo de



**Figura 3.23** – Pronósticos probabilísticos a 48 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (a) y > 20 mm/24 hrs (b); a 72 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (d) y > 20 mm/24 hrs (e) y a 96 hrs. de lluvias > 10 mm/24 hrs (g) y > 20 mm/24 hrs (h) comparados con campos observados de lluvia para las fechas de pronóstico (c), (f) e (i). Fuente de los datos observados: NOAA/NCEP/CPC, Regional US\_Mexico, daily gridded realtime data.

México, de 5 a 15 mm en el canal de Florida y 5 mm en una pequeña región del sur del Golfo de México; por lo que el pronóstico probabilístico fue acertado para la región norte y noreste del Golfo

de México y completamente impreciso para el Mar Caribe y resto del Golfo de México.

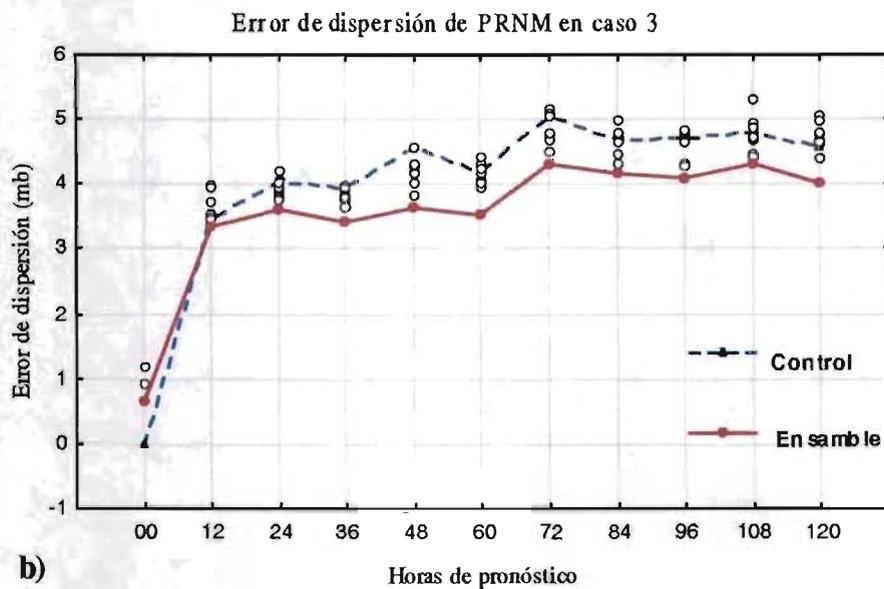
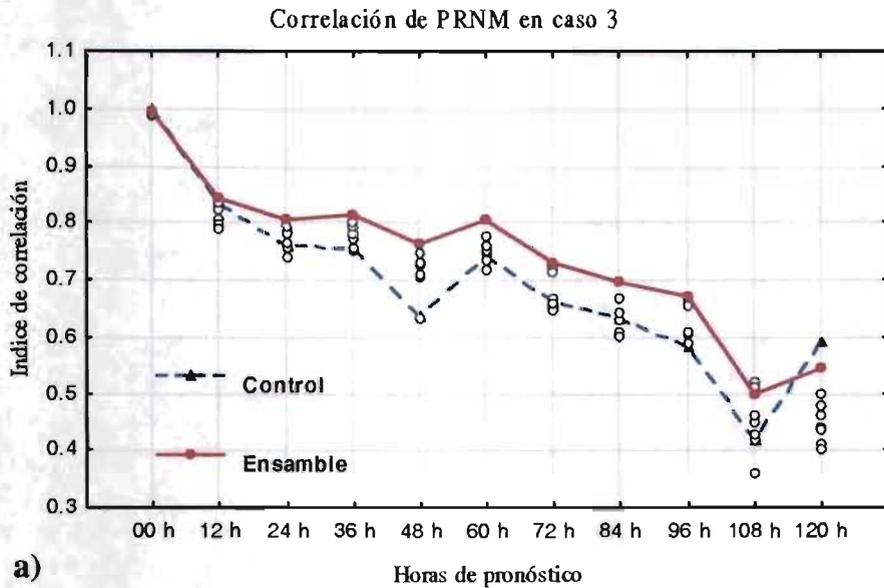
El pronóstico probabilístico a 96 horas, predecía hasta un 50 % de probabilidades de lluvias > 10 mm/24 hrs (figura 3.23g) frente a la costa sur de Veracruz y de 10 a 100 % en el noroeste del Mar Caribe; las probabilidades de lluvias > 20 mm/24 hrs (figura 3.23h) eran de 20 % frente a la costa sur de Veracruz y de 10 a 100 % en el noroeste del Mar Caribe; cuando se observaron lluvias de solamente 5 a 10 mm en la costa sur de Veracruz (figura 3.23i), por lo que el ensamble fue impreciso para el umbral de lluvias > 20 mm/24 hrs en el Golfo de México, y en ambos casos muy impreciso para el Mar Caribe.

### **Evaluación del 3er caso de Norte**

Para la evaluación del tercer caso de Norte, la correlación de PRNM (figura 3.24a), indica que las condiciones iniciales de todos los miembros y del ensamble es cercana a 1.0, lo que comprueba lo explicado anteriormente con respecto a la modificación de las condiciones iniciales con ésta variable. Nuevamente se observa que el ensamble tiene una correlación más alta que todos los miembros, excepto durante las últimas 24 horas de pronóstico donde un miembro le supera al tiempo 108 y 120. También se observa que la dispersión entre cada miembro aumenta en mayor proporción a partir de las 108 horas, donde la correlación del ensamble desciende hasta 0.5, lo que se interpreta como una baja predictibilidad del ensamble, a partir de este punto.

Al calcular el error de dispersión de la PRNM (figura 3.24b) se aprecia que durante las 120 horas de pronóstico, el ensamble genera los menores errores de dispersión con respecto a todos los miembros, alcanzando un valor de 4 milibares al final del tiempo de verificación, con lo que se demuestra la potencialidad de esta técnica de pronóstico en comparación con las predicciones determinísticas tradicionales de la modelación numérica.

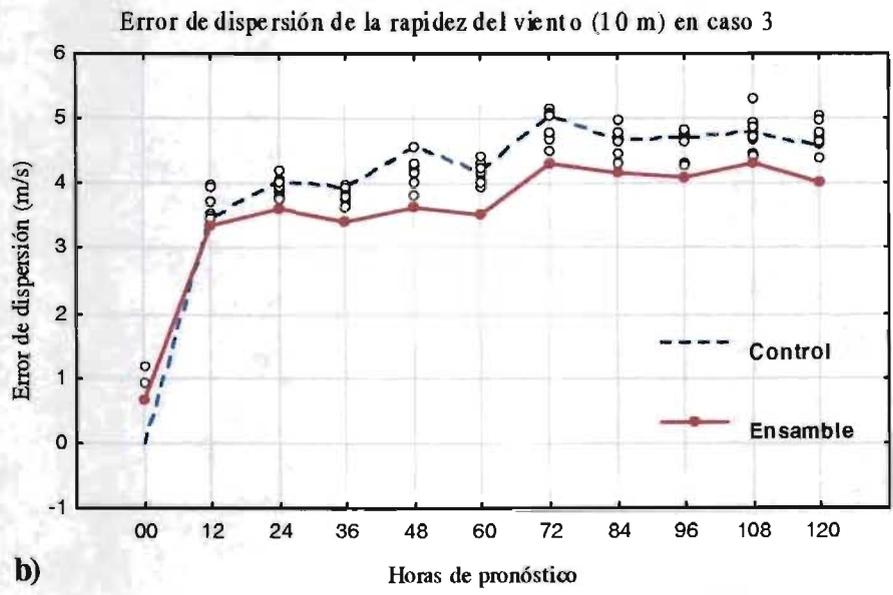
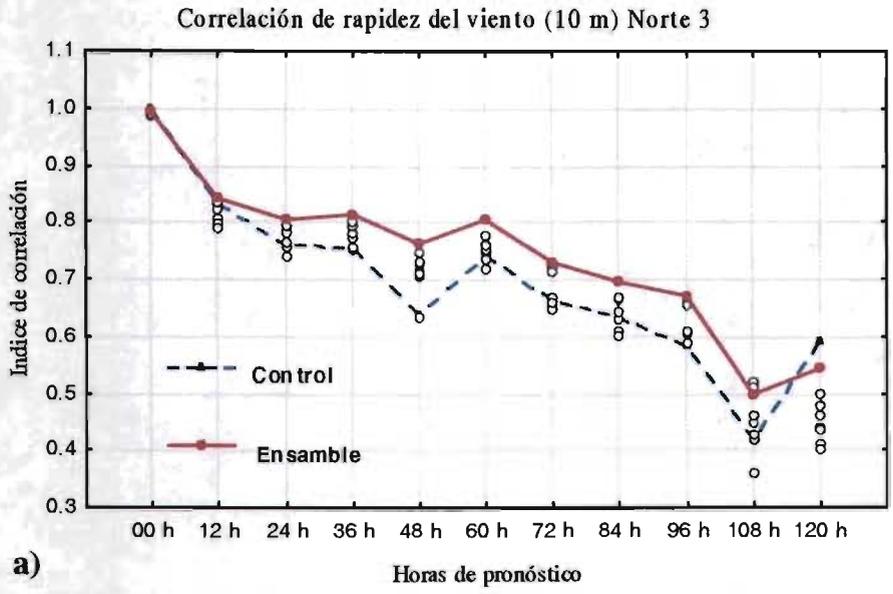
La correlación de la rapidez del viento, (figura 3.25a) muestra que el ensamble tiene una correlación más alta que todos los miembros, excepto a las 108 horas de pronóstico donde es superado por un sólo miembro, coincidiendo con una caída de la correlación hasta un valor de 0.5, donde se considera pierde confianza en la predicción. La evaluación del error de dispersión de la



**Figura 3.24** – Gráficas de correlación (a) y error de dispersión (b) de la PRNM, del tercer caso de Norte.

rapidez del viento (figura 3.25b), muestra que en forma similar al patrón de correlación de la misma variable, el ensamble es superior a todos los miembros, generando los valores más pequeños del error de dispersión a lo largo de las 120 horas de pronóstico.

En comparación con los dos casos anteriores de Nortes, este caso de Norte es mejor pronosticado por el ensamble, ya que muestra una mejor habilidad de pronóstico, al generar una mayor correlación y un menor error de dispersión, con las dos variables evaluadas.



**Figura 3.25** – Gráficas de correlación (a) y error de dispersión (b) de la rapidez del viento, del tercer caso de Norte.

## Capítulo IV

### Conclusiones

#### 4.1 Importancia de la metodología de ensambles aplicada a Nortes

Los Nortes son eventos extremos que aquejan al país durante 7 meses al año, causando pérdidas económicas a diversos sectores estratégicos de México y afectaciones a la población. Actualmente, la información meteorológica está limitada a pronósticos válidos por 72 horas, del tipo determinístico sin conocerse su incertidumbre. Aunque existen importantes centros de pronóstico en EE.UU. que aplican en forma operativa la metodología de ensambles, los productos disponibles en Internet, no son de la completa utilidad para los tomadores de decisiones en México.

La metodología de ensambles de pronóstico puede ser una herramienta mucho más útil para los usuarios de la información meteorológica, principalmente por dos razones:

- 1.- Genera estándares de incertidumbre, pudiendo estimar la confiabilidad de los pronósticos.
- 2.- Mejora la habilidad en el pronóstico numérico significativamente, en comparación con soluciones determinísticas.

En el presente estudio, se utilizó como herramienta principal el modelo numérico de mesoescala MM5 y se demostró que es una buena alternativa para la generación de ensambles de pronósticos en México, con capacidad de predicción a mediano plazo (120 horas).

Para las condiciones iniciales y de fronteras laterales, se emplearon datos meteorológicos que se generan en tiempo real, los cuales no se habían empleado anteriormente en el pronóstico numérico, mostrando que tienen un potencial para su empleo en la predicción numérica del tiempo a mediano plazo.

Los ensambles de pronósticos aplicados a Nortes, demuestran ser una herramienta muy útil para la generación de pronósticos probabilísticos y mapas con valores promedio y dispersión de la rapidez de viento. Tienen importancia para una futura aplicación en la comunidad marítima en México, con capacidad de predicción hasta las 120 horas de pronóstico.

Al observar los ensambles en los tres casos de Norte, se observa que los diagramas tipo espagueti de la PRNM aumentan la dispersión de los miembros conforme aumenta el tiempo del pronóstico, pero ubican las posiciones de las isobaras en forma similar al patrón compuesto de Nortes (figura 1.1), con la ventaja que el ensamble promedio ayuda a una fácil interpretación de los diagramas, principalmente en aquellas zonas donde existe una gran dispersión de los miembros e inclusive más de un agrupamiento en las soluciones determinísticas.

En el caso del pronóstico de rapidez del viento promedio y dispersión (desviación estándar), se observa en los tres casos, que existe una gran incertidumbre en aquellas zonas adyacentes a la posición de la línea frontal, lo que indica que cada miembro del ensamble posiciona el frente frío en un lugar ligeramente diferente. Se puede aprovechar éste comportamiento, para generar la posición de la línea frontal como un promedio de los 10 miembros. La rapidez del viento promedio, es muy útil para los usuarios de la comunidad marítima, aunque se considera que debe ser empleada con cautela ya que es una solución suavizada de los 10 miembros, lo que puede subestimar los resultados máximos o sobreestimar los mínimos.

Los pronósticos probabilísticos demuestran ser de gran aplicación para los usuarios, al contemplar umbrales de la rapidez del viento con diversos valores, los cuales afectan la navegación para todo tipo de embarcaciones y el consecuente cierre de puertos. Como ejemplo, al observar la figura 3.25, se pronosticó el umbral de vientos mayores a 17.5 m/s, correspondiente a vendaval (categoría 8) en la escala Beaufort del viento. Para éste tercer caso de Norte se observa que solo en algunas áreas del Golfo de México, existían probabilidades de que la rapidez del viento sobrepasara éste umbral, lo que favorece a aquellos usuarios que pueden navegar con precaución en mares con vientos menores de 17.5 m/s.

En el caso de la precipitación, es sabido que los Nortes son causantes de lluvias en la temporada invernal, pero las soluciones determinísticas difieren con respecto a la precipitación pronosticada. El pronóstico probabilístico de precipitación acumulada puede dar una idea más clara en la cantidad de lluvia que puede esperarse, al interpretar las probabilidades de que rebasen ciertos umbrales de referencia, con las consecuentes medidas que podrían aplicarse en sectores como Protección Civil, Comunicaciones, Energía, Turismo y Defensa.

## 4.2 Resultados de la evaluación de los ensambles

Al evaluar en forma objetiva los campos pronosticados de PRNM y rapidez del viento, contra campos de análisis, se concluye lo siguiente:

Los patrones de correlación son un indicativo del tiempo al cual, se puede extender la predictibilidad de un evento de Norte. En éste estudio se evaluaron dos variables y cada una determina un límite de predictibilidad ligeramente diferente, por lo que una buena estimación de la predictibilidad de un Norte, puede ser un promedio de las soluciones en cada caso.

Los diagramas de los errores de dispersión, demuestran que estos crecen paulatinamente conforme se incrementa el tiempo de pronóstico, pero ante una perturbación atmosférica, como un Norte, los errores de dispersión se incrementan significativamente. En algunos eventos, los errores disminuyen, sugiriendo que el ensamble gana estabilidad después de encontrar una perturbación atmosférica. Un comportamiento similar se aprecia con los patrones de correlación, donde la correlación disminuye significativamente durante una perturbación atmosférica y posteriormente aumenta.

En conclusión, ambos índices estadísticos demuestran que los ensambles tienen un patrón de correlación más alto y generan un error de dispersión menor con respecto a la mayoría de los miembros del ensamble (soluciones determinísticas). Al comparar el desempeño del ensamble en los tres casos, se aprecia que el tercero, a mitad de la temporada invernal, es el que muestra una mejor habilidad de pronóstico, mientras que el segundo caso, muestra la menor habilidad de pronóstico, ya que la región de ocurrencia de Nortes ésta aún influenciada con sistemas tropicales, ocasionando que se generen los mayores errores de dispersión del ensamble y las menores correlaciones entre los campos pronosticados y los observados. Se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en el “Experimento de ensamble de tormentas y mesoescala” en 1998, (Hou, et. al.) donde se demuestra que la técnica de ensambles tiene una mejor habilidad de predicción que las predicciones numéricas determinísticas, aunque aquí se ha aplicado para la predictibilidad de Nortes.

### 4.3 Trabajo a futuro

A pesar de que se han dado los primeros pasos para establecer un esquema de predicción numérica del tiempo aplicado a la predictibilidad de Nortes, aún faltan tareas por realizar para mejorar la técnica de ensambles de pronósticos en México, con el fin de incrementar la habilidad de pronóstico y el tiempo de predicción, lo que indudablemente ayudará a los tomadores de decisiones en los diferentes sectores socioeconómicos, al contar con mejores herramientas para sus labores de operación y prevención.

El trabajo a futuro que se puede desprender de la presente investigación, es el siguiente:

- Emplear fuentes de datos disponibles en México, que se generan en tiempo real y que no se ocupan aún para la predicción numérica en el país, como los generados por CFE, PEMEX, SCT.
- Emplear datos de modelos globales como el NOGAPS, ECMWF o de modelos regionales como el NAM, con el fin de generar diferentes condiciones iniciales y de frontera laterales para conformar ensambles multimodelos, evaluando su desempeño y habilidad de pronóstico.
- Evaluar objetivamente el desempeño de cada miembro del ensamble con el objetivo de determinar su habilidad de pronóstico. Los que resulten mejores, pueden emplearse en el ensamble promedio con una media ponderada, es decir, con más peso que los miembros de más pobre habilidad.
- Generar estadísticas de las salidas del ensamble, a fin de encontrar los errores sistemáticos durante temporadas (invierno, verano y transición), y mediante un post-procesamiento de las salidas del ensamble, se incrementaría la habilidad de pronóstico.
- Emplear las salidas del ensamble para alimentar modelos oceánicos, como el WW3, con el fin de generar pronósticos y ensambles de viento y oleaje.
- Llevar éste esquema de predicción a una forma operativa en los centros de pronóstico en el país, a fin de que los usuarios de la información meteorológica, cuenten con productos con validez de hasta 120 horas, que mejoren su toma de decisiones en la vida diaria y se reduzcan las pérdidas ocasionadas por Nortes.

## Anexo 1

### Escala “Beaufort” del viento

Número	Descripción OMM	Rapidez del viento		Estado de la mar	Altura de las olas	
		m / s	Nudos		metros	pies
0	Calma	< 0.5	< 1	Calma, como un espejo.	0	0
1	Aire ligero	0.5 – 1.5	1 - 3	Crestas con la apariencia de escamas de pescado, no se forman crestas de espuma	0 – 0.07	0.25
2	Brisa ligera	2 - 3	4 - 6	Olas muy pequeñas, crestas de apariencia vítrea sin romper.	0.15 - 0.30	0.5 - 1
3	Brisa agradable	3.6 – 5.1	7 - 10	Olas pequeñas, las crestas empiezan a romper, capas de espuma blanca dispersa.	0.60 - 0.91	2 – 3
4	Brisa moderada	5.6 – 8.2	11 - 16	Olas menos pequeñas creciendo y comienzan a alargarse, numerosas capas de espuma blanca.	1.1 - 1.5	3.5 - 5
5	Brisa fresca	8.7 – 10.8	17 - 21	Olas moderadas, les toma tiempo tomar forma, muchas capas de espuma blanca, dispersión de gotas pequeñas de agua.	1.8 - 2.4	6 - 8
6	Brisa fuerte	11.3 – 13.9	22- 27	Se forman olas más grandes, capas de espuma blanca por todas partes, mayor dispersión de gotas pequeñas de agua.	2.7 - 4.1	9 – 13.5
7	Casi vendaval	14.4 – 17.0	28 - 33	El mar se agita; se dispersa espuma blanca por rompimiento de olas y por el viento, reduciendo la visibilidad.	4.1 - 5.8	13.5 - 19
8	Vendaval	17.5 – 20.6	34 - 40	Olas moderadamente altas y de mayor longitud, los filos de las crestas comienzan a romper dentro del remolino; espuma soplando en rompimientos bien definidos.	5.5 - 8.5	18 - 28
9	Vendaval fuerte	21.1 – 24.2	41 - 47	Olas altas, fuertes estelas de espuma, las crestas de las olas se rompen en rollos, la dispersión de gotas pequeñas de agua reducen la visibilidad.	7.0 - 9.7	23 - 32
10	Tormenta	24.6 – 28.3	48 - 55	Olas muy altas con crestas sobrepuestas en forma de penachos, el mar toma una apariencia blanca debido a la espuma que es arrastrada en gran medida, el enrollamiento de las crestas es grande con mayor reducción de visibilidad.	8.8 - 12.5	29 - 41
11	Tormenta violenta	28.8 – 32.4	56 - 63	Olas excepcionalmente altas (pueden perderse de vista tras ellas barcos de tonelaje pequeño y medio); el mar se cubre de parches blancos debido a la espuma arrastrada por el viento; la visibilidad es más reducida.	11.9 - 14.0	39 - 46
12	Huracán	≥32.9	≥64	El aire se mezcla con la espuma, el mar está completamente blanco con dispersión y suspensión de pequeñas gotas de agua, visibilidad muy reducida.	11.3 - 15.8	37 - 52

Fuente: Organización Meteorológica Mundial, (1998b) y Oficina de Pronóstico Marítimo, Chicago, IL, EE.UU., 2005.

## Anexo 2

### Terminología empleada

A continuación se describe alguna terminología empleada en los ensambles de pronósticos, aplicada en este estudio:

**Análisis:** Es una descripción completa del estado de la atmósfera normalmente derivada de alguna combinación del campo de primera conjetura (de un modelo numérico) y las observaciones. Este define valores para las variables, en todos los puntos de malla. También se conoce como “first guess”.

**Condiciones iniciales:** Es el punto de inicio de la predicción numérica del tiempo, empleada por los modelos para el comienzo de la integración en el tiempo. Generalmente son derivadas del análisis (primera conjetura) de un modelo global o de área limitada.

**Condiciones de frontera lateral:** Es el estado de las variables que son periódicamente actualizadas (normalmente por datos de un modelo global o regional) en los límites del dominio de un modelo de área local. Comúnmente llamadas condiciones de frontera.

**Dispersión:** Es el incremento de la incertidumbre del ensamble, partiendo de las incertidumbres de la condición inicial. En este estudio, se considera como la desviación estándar de las soluciones determinísticas en cada punto de malla.

**Ensamble promedio:** Valor de la media de las soluciones determinísticas en cada punto de malla.

**Función de Densidad de Probabilidad (FDP):**- (Devore, 1995; Wilks, 1995) Es la función  $f(x)$  tal que para cualquiera de los dos números  $a$  y  $b$  con  $a \leq b$ , la probabilidad  $P$  que para una variable continua aleatoria  $X$  tome los valores entre  $a$  y  $b$ . Está definida por:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx$$

**Habilidad de pronóstico:** Capacidad de un modelo numérico para predecir el estado futuro de la atmósfera, considerando los errores generados en las condiciones iniciales y los que se producen por la formulación del modelo.

**Miembros del ensamble:** Cada una de las soluciones determinísticas que entregan los modelos numéricos.

***Miembro de Control:*** Miembro del ensamble al cual se configuraron ciertas parametrizaciones físicas considerándolo como el mejor modelo disponible, pero al que no se le asimilaron datos en la condición inicial. Sirve como patrón de comparación entre los demás miembros y el ensamble. En este estudio se le denomina ***control***.

***Parametrizaciones físicas:*** Es una cantidad, factor o proceso atmosférico que no es completamente conocido y/o de muy pequeña escala, que no está propiamente representado a una resolución dada, en la predicción numérica del tiempo de un modelo.

***Soluciones determinísticas:*** Cada una de las soluciones generadas por cada pronóstico numérico ya sea del mismo modelo al variar las condiciones iniciales y parametrizaciones físicas o por diferentes modelos.

## Referencias

- Anthes, R.A., and T.T. Warner (1978): Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045-1078.
- Arfken, George B. and Weber, Hans J. (2001). *Mathematical Methods for Physicists*. Fifth Edition. Harcourt Academic Press. Academic Press, Inc. San Diego, Ca. USA.
- Alvarez, L. G., A. Badan-Dangon, and A. Valle, (1989). On coastal currents off Tehuantepec. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, **29**, 89-96.
- Barton, E. D. and Coauthors, (1993). Supersquirt: Dynamics of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Oceanography*, **6**, 23-30.
- Bitran Bitran Daniel. (2001). Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99. CENAPRED, SEGOB, México. 7-68.
- Bourassa, M., L. Zamudio, and J. O'Brien, (1999). Noninertial flow in NSCAT observations of Tehuantepec. *J. Geophys. Res.*, **104**, 11,311-11,319.
- Bowditch Nathaniel, LL.D. (1995) *The American Practical Navigator (An epitome of navigation)* 1995 Edition, Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center, Bethesda, Maryland, USA.
- Bluestein, H. B. (2000). *Synoptic Dynamic Meteorology in Midlatitudes*, vol. 2 Observations and Theory of Weather Systems. New York, Oxford University Press, pag. 267.
- Blumen, W. (2003). *Fronts – Encyclopedia of Atmospheric Sciences Vol. 2*. Academic Press, Inc. London, UK. pag. 805.
- Buizza, R. (1997): Potential forecast skill of ensemble prediction, and skill distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System. *Mon. Wea. Rev.* **125**, pp. 99-119.
- (2001), Weather risk management with the ECMWF ensemble prediction system , *ECMWF Newsletter No.92, Autumn 2001*, pp 7-12. (Available from ECMWF).
- Calderón, A. F. (2003). Comentarios sobre la selección de una plataforma para la ejecución del modelo de simulación del tiempo a escala regional MM5 del NCAR. *Simbiosis Ltda.*, Colombia, pp. 1-10.
- Chelton Dudley B., Freilich Michael H., and Esbensen Steven (2000a), Satellite Observations of the Wind Jets off the Pacific Coast of Central America. Part I: Case Studies and Statistical Characteristics, *Mon. Wea. Rev.* Vol. **128**, Num. 6., pp. 1993-2018.
- , ----, and ---- (2000b), Satellite Observations of the Wind Jets off the Pacific Coast of Central America. Part II: Regional relationships and dynamical considerations. *Mon. Wea. Rev.* Vol. **128**, Num. 6., pp. 2019-2043.

- Clarke, A.J. (1988). Inertial wind path and sea surface temperature patterns near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo. *J. Geophys. Res.*, **93**, 15,491-15,501.
- Cressman, G.P., (1959). An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.* **87**, 367-374.
- Colle, B.A. and Mass, C.F. (1995). The structure and evolutions of cold surges east of the Rocky Mountains. *Mon. Wea. Rev.* **123**:2577-2611.
- Devore J.L. (1995): Probability and statistics for engineering and the sciences, Fourth Edition, Belmont, CA: Wadsworth Press, 743 pp.
- Dickinson Michael J., Bosart Lance F., Bracken W. Edward, Hakim Gregory J., Schultz David M., Bedrick Mary A. and Tyle Kevin R. (1997), The March 1993 Superstorm Cyclogenesis: Incipient Phase Synoptic and Convective-Scale Flow interaction and Model Performance, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 125, **9**, pp. 3041-3072.
- DiMego, G.J.; Bosart, L.F. y Endersen, G.W. (1976). An Examination of the Frequency and Mean Conditions Surrounding Frontal Incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Mon. Wea. Rev.* **104**:709-719.
- Dudhia, J., Gill D., Manning K., Wei Wang, and Bruyere, C. (2005) PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 3), Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, USA.
- Eckel, F. A. (2003), Effective Mesoscale Short-Range Ensemble Forecasting, Dissertation Thesis of Ph. D. Department of Atmospheric Sciences, Univ. of Washington. USA. –2003.
- Ehrendorfer, M., and R. Errico (1995): Mesoscale predictability and the spectrum of optimal perturbations. *J. Atmos.Sci.* 52, 3475-3500.
- Epstein, E.S., (1969): Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, **21**, 739-759.
- Garcia I. P., (1996): Major cold air outbreaks affecting coffee and citrus plantations in the eastern and northeastern México. *Atmósfera*, **9**, pp. 47-68.
- Gallegos, A.; and J. Barberan (1998). Surgencia Eólica. El Golfo de Tehuantepec: El Ecosistema y sus recursos. T. García, Ed., *Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa* 27-34.
- Geer, I. W., 2003, Glossary of Weather and Climate, American Meteorological Society, (GLOSSARY OF METEOROLOGY, Second Edition).
- Grimit, E.C. and Mass, C. (2004): Forecasting Mesoscale Uncertainty: Short-Range Ensemble Forecast error predictability. *Memories (24.3) from 16th NWP / 20th Conference; Seattle, WA, USA*, 2004.

Hamill, T. M., Multen, S. L.; Snyder, C.; Toth, Z. and Baumhefner, D. P. (2000): Ensemble Forecasting in the short to medium range: Report from a workshop. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **81**, 2653-2664.

Hou, D.; Kalnay, E.; Kelvin, K. Droegemeier (2001). Objective verification of the SAMEX'98 Ensemble Forecasts. *Mon. Wea. Rev.* **129**, 73-91.

Houtekamer, P. L.; and H. L. Mitchel (1998): Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. *Mon. Wea. Rev.* **126**, pp. 796-811.

Hurd W.E., (1929). Northers of the Gulf of Tehuantepec. *Mon. Wea. Rev.* **57**:192-194.

Kalnay Eugenia (2003): Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability, First Edition, Cambridge University Press. Cambridge,UK.

Krishnamurti, T.N., Vijaya Kumar, T.S.V., Yun, W.T., Chakraborty, A., Stefanova, L., Cubukcu, N., Williford, E., Mackey, B. and Sanjay, J. (2002). Superensemble Forecast for Weather and Climate. Memories from *Seminar on Predictability of weather and climate*. 9-13 september 2002, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. pp. 171-194.

Krishnamurti, T.N.; Bounoua, L. (1996). An Introduction to Numerical Weather Prediction Techniques, CRC Press Inc. Boca Raton Florida, USA. pp 96.

Leith, C.E., (1974). Theoretical skill of Monte Carlo forecast. *Mon. Wea. Rev.* **102**: 409-418.

McQueen, J., Du Jun, Zhou B., Dimego G., Juang H., Ferrier, B., Manikin G., Rogers E., Black T., Toth Zoltan (2004). Overview of the NOAA/NWS/NCEP Short Range Ensemble Forecast (SREF) system. NOAA/NWS/NCEP/Environmental Modeling Center, USA.

Magaña V. y Pérez J. L. (1998), Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional de México. *Revista GEOUNAM*, **Vol. 5 Num. 1** pp 33-39.

--- ---, J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrisoza y J.B. Pérez (1999). El Niño y el Clima. Los Impactos de El Niño en México. *V. Magaña, Ed.*, 23-66.

--- ---, Vázquez, Jorge L; Pérez, José L; Pérez, J. B; (2003), "Impact of El Niño on precipitation in México", *Geofísica Internacional*, **Vol. 42, Num. 3**, pp. 313-330.

Mass C.F., Ovens D., Westrick K. and Colle B.A. (2002) Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **3-2002**, pp. 407-430.

Müller-Karger, F. E. and, and C: Fuentes-Yaco, (2000):Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **105**, 1271-1284.

Nuss W.A. and Titley D. W. (1994). Use of Multiquadratic Interpolation for Meteorological Objective Analysis. *Mon. Wea. Rev.* **122**, 1611-1631.

- Organización Meteorológica Mundial (1998a): - Pub. No. 182. *Meteorological Vocabulary*, second edition., Geneva, Switzerland. pp. 470-471.
- Organización Meteorológica Mundial (1998b): - Pub. No. 702. *Guide to wave analysis and forecasting*, second edition., Geneva, Switzerland. pp. 17-41.
- Orlansky I. (1975), A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. Bulletin American Meteorological Society, **Vol. 56, Num. 5**, pp. 527-530.
- Palmer T.N. (1999), Predicting uncertainty in forecast of weather and climate, *ECMWF Technical memorandum No. 294 & Meteorological training Course Lecture Series*, ECMWF –2003.
- (2002), The economic value of ensemble forecast as a tool for risk assessment: From days to decades. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 747-774.
- Parmenter F.C., (1970). Picture of the month: A “Tehuantepecer” *Mon. Wea. Rev.* **98**:479.
- Reding, P.J. (1992). The Central American cold surge: An observational analysis of the deep south-ward penetration of North American cold fronts. M.S. thesis, Dept. of Meteorology, Texas A&M University. 177 pp.
- Roden G.I., (1961). On the wind driven circulation in the Gulf of Tehuantepec and its effect upon surface temperatures. *Geofis. Inter.* **1(3)**: 55-76.
- Sansón, Leodegario (2004). Comunicación personal. Jefe del Departamento de Hidrometeorología, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Comisión Federal de Electricidad, México.
- Schultz, D.M.; Bracken, W.E.; Bosart, L.F.; Hakim, G.J.; Bedrick, M.A.; Dickinson, M.J. and Tyle K.R. (1997). The superstorm Cold Surge: Frontal Structure, Gap Flow, and Tropical Impact. *Mon. Wea. Rev.* **125**:5-39; Corrigendum, **125**, 662.
- Schultz, D.M., Bracken, W.E. and Bosart, L.F. (1998). Planetary and Synoptic Scale Signatures Associated with Central American Cold Surges. *Mon. Wea. Rev.* **126**:5-27.
- Steenburgh, W.J.; Schultz, D.M. and Colle, B. (1998). The structure and Evolution of Gap Outflow over the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Mon. Wea. Rev.* **126**:2673-2691. October.
- Stumpf, H. G., (1975). Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *J. Phys. Oceanogr.* **5**, 383-388.
- Takacs, L., (1985): A two-step scheme for the advection equation with minimized dissipation and dispersion errors. *Mon. Wea. Rev.* **113**, 1050-1065.
- Talagrand, O. (1997), Assimilation of observations, an introduction. *J. Met. Soc. Japan Special Issue* **75, 1B**, 191-209.

Trasviña, A., E.D. Barton, J. Brown, H.S. Velez, P.M. Kosro, and R.L. Smith, (1995) Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico; The asymmetric circulation. *J. Geophys Res.*, **100**:20,649-20,663.

Trasviña, A. y Barton, E.D. (1997). Los Nortes del Golfo de Tehuantepec: la circulación costera inducida por el viento. Contribuciones a la Oceanografía Física de México, Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana. M.F. Lavín (editor), pp, 25-44.

Vázquez, A. J. L. (2000) “Caracterización objetiva de los nortes del Golfo de México y su variabilidad interanual” Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, México. 31 pp.

Vázquez, F. D., (2005). Afectación por Nortes en la Sonda de Campeche. Memorias del XI Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y XIV Congreso Mexicano de Meteorología. Cancún, Q. Roo, 2005.

Weickmann, K.; Whitaker, J.; Roubicek A.; and Smith, C.; (2004), The use of ensemble forecasts to produce improved medium range (3-15 days) weather forecasts. NOAA-CIRES-Climate Diagnostic Center. Página web, 2004

Weisberg J.S. (1976) Meteorology. The Earth and its Weather. Houghton Mifflin Company, Boston, USA. 241 pp.

Wilks, D.S. (1995). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences An Introduction. Academic, Press, San Diego, CA, USA. pp. 77, 235.

Zhang, F.; Sneyder, C. and Rotunno R. (2002): Mesoscale predictability of the “surprise” snowstorm of 24-25 January 2000. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1617-1632.

Zhu, Y.; Toth, Z.; Wobus, R.; Richardson, D. and Mylne, K. (2002): The Economic Value of Ensemble Forecasts. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, 73-83.

### **Paginas web consultadas:**

Centro de Ciencias de la Atmósfera, 2004. Pagina web con los pronósticos del MM5:  
<http://pembu.atmosfcu.unam.mx/macuca/>

Datos de TSM diaria, desarrollados por NCEP: <ftp://polar.wwb.noaa.gov/pub/history/sst>

Datos de radiosondeo de la NOAA: <http://raob.fsl.noaa.gov/>

European Center Medium – Range Weather Forecast: <http://www.ecmwf.int>

Environmental Modeling Center, National Centers of Prediction, National Weather Service, NOAA, USA <http://www.emc.ncep.noaa.gov/>

Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC), USNAVY, DOD, USA. 2004, <https://www.fnmoc.mil>

Imágenes históricas de los satélites GOES: <http://cdo.ncdc.noaa.gov/GOES/Browser>

Jet Propulsion Laboratory – NASA:.- <http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/index.cfm>

Modelo numérico GFS: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/STATS/maps/avn/avn.html>.

Modelo numérico NOGAPS: <https://www.fnmoc.navy.mil/PUBLIC/>.

Modelo numérico ECMWF: <http://www.ecmwf.int/>.

Modelo numérico NAM: <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/nwprod/analysis/>

Modelo numérico NGM: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbpll/etapl/index.html>

Modelo numérico RUC: <http://maps.fsl.noaa.gov/>

National Data Buoy Center – NWS - NOAA:.- <http://www.ndbc.noaa.gov>

National Weather Service (NWS), NOAA, DOC, USA. 2004. <http://www.nws.noaa.gov>

NOAA Forecast Systems Laboratory, RUC development group: <http://www.fsl.noaa.gov/>

Marine Weather Office, Chicago, IL, USA: <http://www.crh.noaa.gov/lot/webpage/beaufort/>

Organización Meteorológica Mundial: <http://www.wmo.ch/index-en.html>

Proyecto PACS-SONET: <http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/>

Servicio Meteorológico Nacional, 2004. Pagina web con los pronósticos del MM5: <http://smn.cna.gob.mx/cartas/mm5/htm/cmm5.html>

Servidor de almacenamiento de datos de NCAR: <http://dss.ucar.edu/datasets/>