

03060



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

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

PRONÓSTICO NUMÉRICO DEL TIEMPO PARA EL VALLE DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)

PRESENTA:
JOEL BERNARDO PÉREZ FERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. VÍCTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

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

PRONÓSTICO NUMÉRICO DEL TIEMPO PARA EL VALLE DE MÉXICO

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

Joel Bernardo Pérez Fernández

Director de tesis:
Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a:

mis padres y hermanos, por la confianza e incondicional apoyo que en todo momento me han brindado.

mi tutor, director de tesis y amigo, el Dr. Víctor Magaña Rueda, por todas sus enseñanzas e invaluable consejos a lo largo de mi formación tanto profesional como personal.

mis asesores y sinodales, por sus valiosas aportaciones y atinadas sugerencias que sin duda enriquecieron el trabajo de tesis.

todos mis compañeros y amigos del CCA-UNAM: Rosa, Caro, Alejandro, *Los Marinos*: Juan y Arturo, Miguel A., Gustavo, y en particular a Matías, José Luis y Baldemar, por haberme ayudado en el proceso de elaboración del trabajo.

y a ti Maty, por inspirarme, apoyarme y hacerme la vida mas llevadera ...

Además, agradezco sinceramente a la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular al Centro de Ciencias de la Atmósfera donde llevé a cabo mi estancia y estudios de maestría.

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de los proyectos CONACYT-No. 32516, IAI-CRN73-No. 1091 y PAPIIT-No. IN-122001 , a cargo del Dr. Víctor Magaña Rueda.

Por último, deseo agradecer el apoyo económico mediante el Programa de Becas del Centro Nacional de Previsión de Desastres y de la Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM.

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

NOMBRE: Joel Bernardo

Pérez Fernández

FECHA: 12 de enero de 2004

FIRMA: 

*A Menan^t,
donde quiera que
te encuentres ...*

Indice de tablas y figuras

-Tablas

Capítulo III

Tabla 1 Número de eventos de precipitación extrema en 5 estaciones sobre le Distrito Federal

-Figuras

Capítulo I

Fig. 1 Número de desastres en el mundo asociados a fenómenos naturales durante el periodo 1991-2000. (OMM, 2002).

Fig. 2 Escala espacio-temporal de fenómenos meteorológicos.

Fig. 3 Posición geográfica del Valle de México y principales accidentes orográficos. 1. S. de la Cruces, 2. S. Chichinautzin, 3. S. del Ajusco, 4. S. De Guadalupe, 5. Valle de Toluca, 6. Volcán Popocatépetl y 7. Volcán Iztaccíhuatl

Fig. 4 Temperatura media anual en la Cuenca de México. Periodo: 1941-1995. (Tomada de Jáuregui, 2000)

Fig. 5 Precipitación media anual en la Cuenca de México. Periodo: 1941-1995. (Tomada de Jáuregui, 2000)

Fig. 6 Frecuencia decadal de la precipitación máxima en 24 horas mayor a 30 mm en la estación Tacubaya. Periodo: 1900-97. (tomada de Jáuregui, 2000)

Fig. 7 Distribución Gamma para lluvia acumulada en 24 hrs. La región sombreada corresponde al 10 % de probabilidad y denota un evento de lluvia extrema.

Fig. 8 Calidad del pronóstico del campo de geopotencial al nivel de 500 milibares a 36 horas como función del tiempo para Estados Unidos. (tomado de Bushby, 1986)

Capítulo II

Fig. 9 Distribución de las estaciones pluviométricas de la DGCOH.

Fig. 10 Distribución de las estaciones meteorológicas de la RAMA en el Distrito Federal y sus alrededores.

Fig. 11 Esquema del modelo de mesoescala MM5.

Fig. 12 Malla Arakawa tipo-B.

Fig. 13a Uso de suelo utilizado en el MM5 en la versión 2 (arriba) y versión 3 (abajo).

Fig. 13b Topografía utilizada en el MM5 versión 2 (arriba) y versión 3 (abajo).

Fig. 14 Dominio a) madre y b) anidado en puntos de malla con resolución de 24 y 8 km utilizados en el MM5.

Fig. 15. Comparación del patrón del viento para el día 29 de julio de 2002. a) sin asimilar y b) asimilado en la condición inicial (6 TL). Los vectores gruesos corresponden a observaciones de la RAMA.

Fig. 16 Esquema de análisis objetivo tipo Cressman. Los puntos representan el arreglo en malla, mientras que las cruces son los datos observados distribuidos aleatoriamente.

Fig. 17. Estaciones meteorológicas de la DGCOH. Los círculos corresponden a la estación 3-Lindavista, 22-La Venta, 27-Xotepingo, 31-Santa Catarina y 39-Caseta Forestal, utilizadas para las comparaciones puntuales.

Capítulo III

Fig. 18 Climatología de la precipitación en a) mayo, b) junio, c) julio, d) agosto, e) septiembre y f) octubre en la Cuenca de México con datos de la DGCOH. Periodo (1993-2002).

Fig. 19 EOF de precipitación observado (arriba) y simulado (abajo) de mayo a octubre. Periodo 2000-02.

Fig. 20 Coeficientes de precipitación observado (arriba) y simulado (abajo) de mayo a octubre. Periodo 2000-02.

Fig. 21 Patrón compuesto del viento a 700 mb. con las fechas en las que el coeficiente 1 es el dominante.

Fig. 22 Distribución media diaria de precipitación observado y hora de ocurrencia para la estación Caseta Forestal (izq.), Xotepingo (centro) y Santa Catarina (der.) en el periodo 2000-02.

Fig. 23 Climatología de la cantidad promedio (mm) de precipitación horaria en el periodo mayo-octubre en la Cuenca de México con datos de la DGCOH. Periodo (1993-2002).

Fig. 24 Valores de precipitación que determinan un evento extremo (Tomada de Magaña et. al, 2001).

Capítulo IV

Fig. 25 Comportamiento de la temperatura el 10 y 11 de julio del 2001 en las estaciones Tacuba, Merced y Tlalpan.

Fig. 26 Diferencias de temperaturas debido a diferencias de altura (izq.) y diferencias de altura (der.) en los datos de topografía utilizados en el modelo de mesoescala MM5.

Fig. 27 Representación del uso de suelo en el Distrito Federal utilizado por el MM5 v2. la zona coloreada de blanco (13) corresponde a terreno agrícola o para cultivos.

Fig. 28 Series de tiempo de simulaciones a 24 horas y valores observados de a) temperatura mínima, y b) temperatura máxima en el 2000, 2001 y 2002 en la estación Tacuba.

Fig. 29 rmse de las predicciones a 24 horas entre mayo y octubre respecto a lo observado de temperatura mínima (arriba) y temperatura máxima (abajo), y considerando la asimilación de datos de superficie (gráficos de la derecha).

Fig. 30 Errores promedio mensuales de simulaciones a 24 horas de precipitación acumulada. Periodo: 2000-2002.

Fig. 31 rmse promedio de las simulaciones de lluvia acumulada a 24 hrs. de mayo a octubre de 2000- 2001 y 2002.

Fig. 32 Porcentaje de mejora respecto al rmse de 2002 en comparación con el obtenido en 2000-2001.

Fig. 33 Comparación de la lluvia acumulada en mayo (arriba) y julio (abajo) de 2001 en la estación 27 (Cd. Universitaria) de la DGCOH. Los datos negativos indican la inexistencia de simulación u observación.

Fig. 34 Confianza (%) en las simulaciones de lluvia acumulada a 24 hrs. Periodo: mayo-octubre de 2000-2002.

Fig. 35 Eventos de lluvia intensa observado (izquierda) y simulados (derecha) en el Distrito Federal para a) el 27 de junio y b) el 10 de septiembre de 2002.

Fig. 36 Comparación entre lo observado y lo simulado de lluvia acumulada a 24 hrs. en septiembre. La figura a) corresponde al 2001 y b) al 2002 que considera la asimilación de datos.

Fig. 37 Simulaciones horaria del viento en superficie, en puntos donde se encuentran estaciones de la RAMA para el 5 de septiembre de 2002.

Fig. 38 Comparación entre las predicciones a 24 horas de precipitación acumulada y lo observado en julio de 2000 en las estaciones 3 (a) y 39 (b) (en el sur y norte de la Ciudad, respectivamente) de la DGCOH.

Fig. 39 rmse de precipitación acumulada a 24 hrs. a 8, 15 y 20 km respecto a lo observado en junio-agosto de 2000.

-INDICE-

Agradecimientos
Lista de tablas y figuras

Introducción

Objetivo del estudio 2

Capítulo I

Eventos hidrometeorológicos extremos en la Cuenca de México

1.1- ¿Qué es un desastre? 4
1.2- El clima en la Cuenca de México 7
 1.2.1- Eventos de lluvia intensa 10
1.3- Los modelos numéricos en la Meteorología 12
 1.3.1- Algunas técnicas de evaluación utilizadas 13

Capítulo II

Datos y Metodología

2.1- Datos 16
 2.1.1- Datos de precipitación 16
 2.1.2- Datos de temperatura y vientos 17
2.2- El modelo de mesoescala MM5 18
2.3- Datos meteorológicos para el MM5 21
2.4- Metodología 22
 2.4.1- Criterios utilizados en el experimento de control del modelo MM5 22
 2.4.2- Consideraciones para el caso de la Cd. de México 27
2.5- Esquemas y estrategias de evaluación de pronósticos utilizados 29
 2.5.1- Evaluación de la temperatura 29
 2.5.2- Evaluación de la precipitación 30

Capítulo III

Análisis observacional de las lluvias en la Cuenca de México

3.1- Ciclo interanual de las lluvias 34
 3.1.1- Modos de variabilidad en precipitación (EOF's) 35
 3.1.2- Ciclo diario de las lluvias 39

Capítulo IV

Resultados del estudio

4.1- Los Esquemas tradicionales de evaluación: rmse 43
 4.1.1- Evaluación de la temperatura 43
 4.1.2- Evaluación de la precipitación 49

4.1.3- El método de 3 puntos	51
4.1.4- Casos particulares de lluvia extrema	54
4.1.5- Evaluación del viento	57
4.2- Máxima resolución espacial	60
4.3- La importancia de la asimilación de datos en el pronóstico de lluvias	62

Capítulo V

Conclusiones del trabajo de estudio

5.1- Conclusiones	63
-------------------	----

Referencias	67
-------------	----

Introducción

La década de los noventa fue una de las más cálidas desde que se tienen registros instrumentales. Se caracterizó por un número elevado de desastres asociados a lluvias torrenciales e inundaciones que provocaron cuantiosas pérdidas en el mundo, tanto materiales como de vidas humanas. Es por ello que los desastres asociados a hidrometeoros se han convertido en uno de los temas de mas relevancia en las agendas de política pública, pues la combinación del incremento de los asentamientos humanos irregulares con eventos hidrometeorológicos extremos ha elevado el riesgo para la población. En la Ciudad de México, los fenómenos hidrometeorológicos son los que causan mayores pérdidas, tanto económicas como humanas (GDF, 2000). Tal situación podría empeorar de no tomarse medidas preventivas estructurales, pues el número de eventos hidrometeorológicos extremos en las últimas décadas ha ido en aumento (Jáuregui, 2000).

Los procedimientos operativos de prevención y atención de situaciones de desastre en temporada de lluvias se ven en ocasiones limitados por factores técnicos y presupuestales. En el caso del problema técnico, este se relaciona a la poca o nula confianza de las autoridades sobre la información meteorológica, por lo que un pronóstico del tiempo rara vez apoya en la toma de decisiones. Esto es en realidad un problema de capacidad y conocimiento. Por lo anterior, la mayor parte del tiempo se trabaja en la atención de la emergencia más que en acciones preventivas. Por desconocimiento o conveniencia, muchos hablan de que las lluvias intensas son fenómenos impredecibles. Sin embargo, en muchos países, la situación es distinta, pues el pronóstico del tiempo es un elemento esencial de las actividades de protección civil.

En la actualidad, tanto el Servicio Meteorológico Nacional como algunas universidades dedicadas a la investigación en Meteorología hacen uso de modelos de pronóstico numérico del tiempo para generar información meteorológica. Los modelos son capaces de simular la dinámica atmosférica de mesoescala de una región en particular, incluyendo aspectos del ciclo diurno, de la circulación de vientos superficiales, de las lluvias e incluso de algunos eventos hidrometeorológicos extremos. A pesar de que los modelos tienen aciertos en pronósticos de lluvia y temperatura a escala sinóptica, existen algunas limitaciones cuando

se trata de predicciones locales. Esto es, al aumentar la resolución espacial algunas parametrizaciones físicas dejan de ser válidas. Por ello, los pronósticos locales del tiempo en zonas tropicales con accidentes orográficos, como los de nuestro país, resultan un verdadero reto. Pero, ¿hasta qué punto se puede reducir la escala espacial de un pronóstico manteniendo un adecuado nivel de acierto?

Definir límites en la resolución espacial y en el tiempo de pronóstico de forma tal que éstos sean útiles en sectores como protección civil, es de fundamental importancia. Las predicciones meteorológicas poseen un gran valor cuando se conoce el peso que se le puede dar en la toma de decisiones.

El presente trabajo analiza este problema de forma objetiva, definiendo esquemas de verificación de la calidad del pronóstico numérico de mesoescala para la Cuenca de México, con el fin de que en centros operativos se determine la confianza que en ellos pueden tener.

Objetivo del estudio

El objetivo de este trabajo es de evaluar objetivamente las predicciones numéricas a 24 horas de condiciones de tiempo meteorológico, esto es, precipitación, temperatura y viento en superficie sobre la Cuenca de México. Las evaluaciones permitirán definir algunas características de un modelo de mesoescala cuando se usa de forma operativa. Por ejemplo, una evaluación sistemática de las predicciones permitirá:

- Definir la máxima resolución espacial con la que es posible obtener predicciones del tiempo útiles.
- Conocer los errores sistemáticos de dichos pronósticos para corregirlos o eliminarlos, y
- Analizar el potencial de un modelo de mesoescala para pronosticar eventos extremos de precipitación.

Las respuestas a los planteamientos anteriores sentarán las bases para que el pronóstico operativo del tiempo pueda ser implementado y utilizado como una herramienta de planeación y prevención de desastres en la Cuenca de México.

El presente estudio está estructurado de la siguiente forma: en el capítulo 1 se mencionan los antecedentes relacionados con el trabajo de investigación. En el capítulo 2 se describen los datos y la metodología utilizados en el estudio. En el capítulo 3 se analizan las lluvias en el Valle de México, así como sus variaciones espaciales y temporales. La discusión de los resultados sobre la evaluación del pronóstico se da en el capítulo 4. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo con énfasis en la relevancia de predicciones del tiempo para las actividades relacionadas con la protección civil.

Capítulo I

Eventos hidrometeorológicos extremos en la Cuenca de México

1.1 ¿Qué es un desastre?

En las ciencias naturales, los desastres son considerados como el fenómeno, repentino o progresivo, que afecta al medio ambiente y a la sociedad, la cual tiene que reaccionar con medidas extraordinarias (Ortíz y Oropeza, 1992). Otros, hablan de desastre como la materialización del riesgo (Rodríguez, 1999). Los fenómenos de tipo hidrometeorológico intensos que potencialmente son más desastrosos incluyen:

- ciclones tropicales
- lluvias torrenciales, trombas o aguaceros
- nevadas, granizadas o heladas atípicas
- inundaciones
- sequías

Según Maskey (1989), el riesgo se puede definir como una combinación entre la amenaza y la vulnerabilidad. Así, el riesgo corresponde a la probabilidad de que una amenaza provoque efectos potencialmente desastrosos que afecten a la sociedad. Estos efectos dependerán principalmente del grado de vulnerabilidad, que es la incapacidad de una sociedad de soportar la ocurrencia de fenómenos peligrosos (Rodríguez, 1999). La vulnerabilidad depende principalmente de factores sociales, económicos, culturales o políticos.

En el mundo, el número de desastres, principalmente de tipo hidrometeorológico ha crecido en los últimos años (Fig. 1), por lo que la Organización de las Naciones Unidas declaró la década de los 90 como el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres. La ocurrencia en años recientes de deslaves, inundaciones, lluvias intensas y granizadas, es más frecuente y costosa que las que se tienen de otros fenómenos geofísicos.

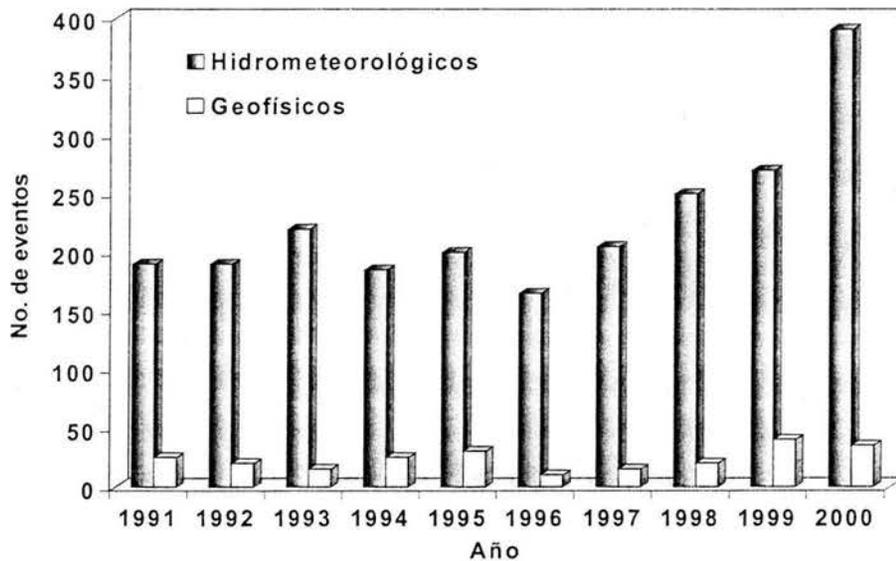


Fig. 1 Número de desastres en el mundo asociados a fenómenos naturales durante el periodo 1991-2000. (OMM, 2002).

De los más de 16,000 desastres que ocurrieron por algún fenómeno natural en países como México, El Salvador, Guatemala, Colombia, Ecuador, Costa Rica, Argentina y Panamá entre 1988 y 1998, un alto porcentaje fueron de origen hidrometeorológico. Tan sólo en México, los desastres causaron más de 1,600 muertes con un costo por afectación superior a los 2,500 millones de dólares (Velásquez, 1999). Es por ello que muchos países trabajan en materia de prevención, pues el incremento en el costo de los desastres lleva a retrocesos en los niveles de vida, pues se sabe que la reducción de la vulnerabilidad mediante medidas estructurales resulta más económica que pagar por la recuperación después del desastre.

Dados los avances en el entendimiento de estos fenómenos, la ocurrencia de un evento hidrometeorológico extremo no debiera llevar necesariamente a la ocurrencia de un desastre. Sin embargo, la prevención no sólo depende de nuestro entendimiento de la amenaza, sino de la decisión de reducir la vulnerabilidad por parte de las autoridades y la sociedad.

Hoy en día, se tienen sólidos esquemas de pronósticos operativos del tiempo, suficientemente confiables para apoyar acciones de prevención. Magaña (1998) sugiere que la conjunción de sofisticadas herramientas de pronóstico con adecuados programas de

prevención para enfrentar las condiciones extremas del tiempo, pueden aminorar en gran medida los impactos negativos de fenómenos hidrometeorológicos extremos, evitando o disminuyendo la magnitud de los desastres. El Sistema de Alerta Temprana (SiAT) ante huracanes es una muestra de la utilidad de los pronósticos meteorológicos en el campo de la Protección Civil.

Los fenómenos hidrometeorológicos ocurren en distintas escalas espaciales y temporales (Fig. 2). Condiciones del tiempo y clima pueden afectar al medio ambiente, a sectores sociales y económicos. Sin embargo, en la mayoría de los casos el problema de pérdidas de cosecha, disminución en la disponibilidad de agua, contaminación de ríos y costas, muertes y daño o destrucción de viviendas por eventos hidrometeorológicos extremos, reflejan el grado de vulnerabilidad de una sociedad.

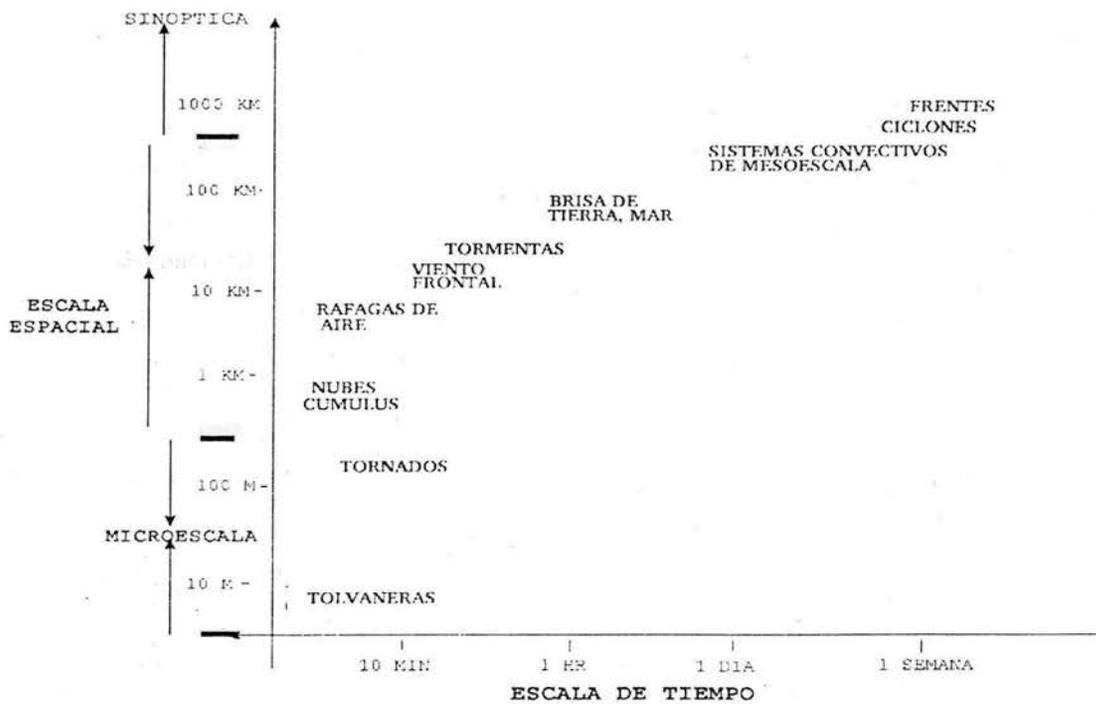


Fig. 2 Escala espacio-temporal de fenómenos meteorológicos.

1.2 El Clima en la Cuenca de México

La Cuenca de México está situada aproximadamente a 2200 msnm, en la parte centro-sur del país, con una posición geográfica de 19° N y 99° W. Se encuentra rodeada de montañas importantes entre las que destacan: al sur, la Sierra Chichinautzin y la Sierra del Ajusco; al suroeste, la Sierra de las Cruces, hacia el norte, la Sierra de Guadalupe; al oeste se encuentra el Valle de Toluca y al sureste los Volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl (Fig. 3). El relieve juega un papel importante como modulador de circulaciones atmosféricas en el Valle de México, por lo que existen diversos climas en una región relativamente pequeña. Por otro lado, una amplia variedad de uso de suelo, que va desde el tipo urbano, al bosque de coníferas y al de cubierta de hielo en la montaña (Pérez, 2001), también actúa como forzante de la circulación atmosférica local.

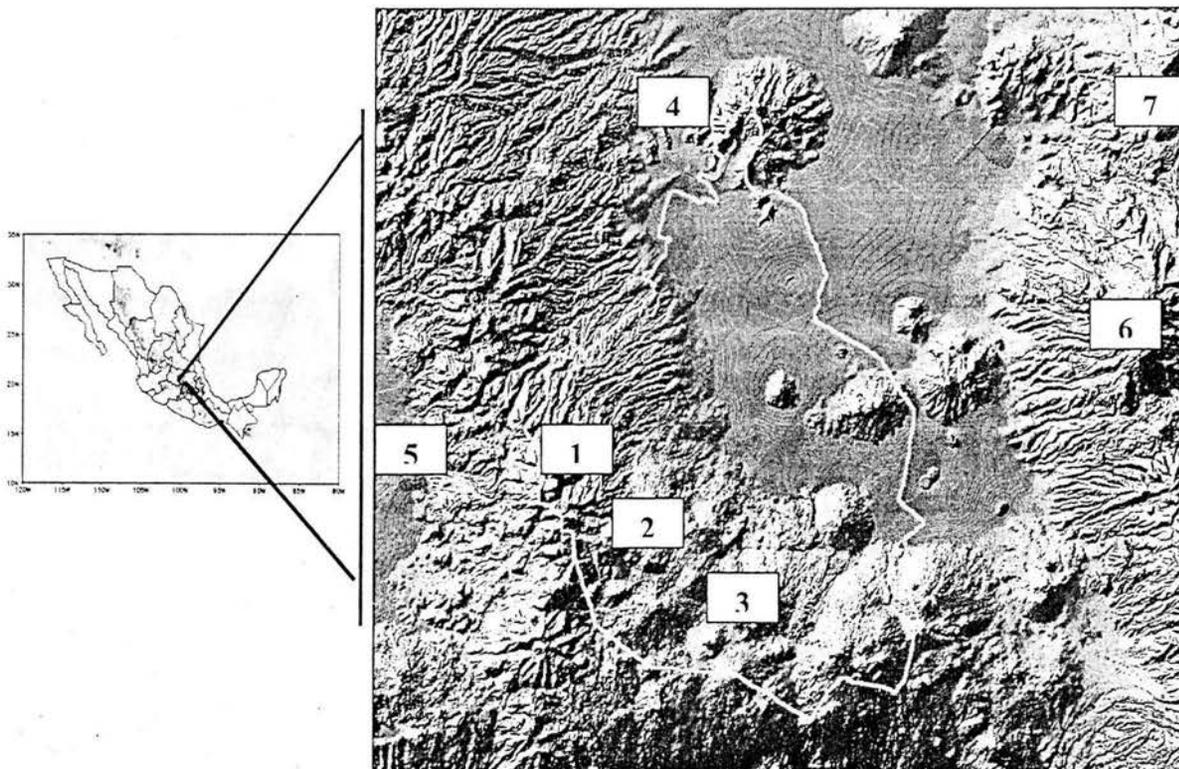


Fig. 3 Localización geográfica del Valle de México y principales accidentes orográficos. 1. S. de las Cruces, 2. S. Chichinautzin, 3. S. del Ajusco, 4. S. De Guadalupe, 5. Valle de Toluca, 6. Volcán Popocatepetl y 7. Volcán Iztaccihuatl

La temperatura media anual de la cuenca varía entre 15° y 16° C, valores considerados como ideales para el confort humano. En la parte montañosa la temperatura media anual está entre 12° y 14° C, siendo un poco más fría (1° o 2°C) la zona del sur (Fig. 4) (Jáuregui, 2000).



Fig. 4 Temperatura media anual en la Cuenca de México. Periodo: 1941-1995.
(Tomada de Jáuregui, 2000)

Con respecto a condiciones de temperatura extrema, los valores mínimos en los meses más fríos (diciembre y enero) llegan a alcanzar los 0° C en los alrededores de la Ciudad, mientras que sobre la región de la mancha urbana el valor es más elevado (4° o 5° C). Al fenómeno que consiste en la presencia de aire más cálido sobre las ciudades con respecto a sus alrededores se le conoce como *Isla de Calor* (Jáuregui, 1995), y está directamente relacionado a la razón de crecimiento de la población respecto a los alrededores (Oke, 1973). En cuanto a los valores de temperatura máxima, los sitios más calurosos se sitúan en el centro y norte de la Cuenca, alcanzando temperaturas promedio de 29° C en los meses de

abril o mayo. En años recientes, se han alcanzado temperaturas máximas superiores a los 35° C, quizás como señal de un calentamiento global.

El régimen de lluvia característico de la región de la Cuenca de México, exhibe un comportamiento del tipo monzónico con una temporada de lluvias de verano bien definida entre mayo y septiembre. En invierno, entre noviembre y abril aparece una temporada de secas. En esta temporada sólo se presentan lluvias esporádicas relacionadas con el paso de frentes fríos o *nortes* (Vázquez, 2000). En comparación con la zona norte y oriente de la Ciudad, las zonas sur y suroeste presentan tanto el mayor número de días con lluvias (alrededor de 110 días) como la mayor cantidad de lluvia acumulada (- 900 mm/año) (Fig. 5). Las montañas del poniente y sur de la Ciudad, en combinación con el flujo de humedad provocan que, además de tener el mayor número de días con lluvias, también se presenten mas aguaceros (> 20 mm/hr).



Fig. 5 Precipitación media anual en la Cuenca de México. Periodo: 1941-1995.
(Tomada de Jáuregui, 2000)

1.2.1. Eventos de lluvia intensa.

Durante el periodo de las lluvias de verano se presentan aguaceros (precipitación > 20 mm/hr), los cuales ocurren con mayor frecuencia durante la tarde o noche. Se ha encontrado que en la parte oeste y suroeste de la Ciudad hay un aumento en el número de aguaceros en décadas recientes (Fig. 6) (Jáuregui y Romales, 1996), es decir, hay una tendencia al aumento de eventos de precipitación extrema o intensa.

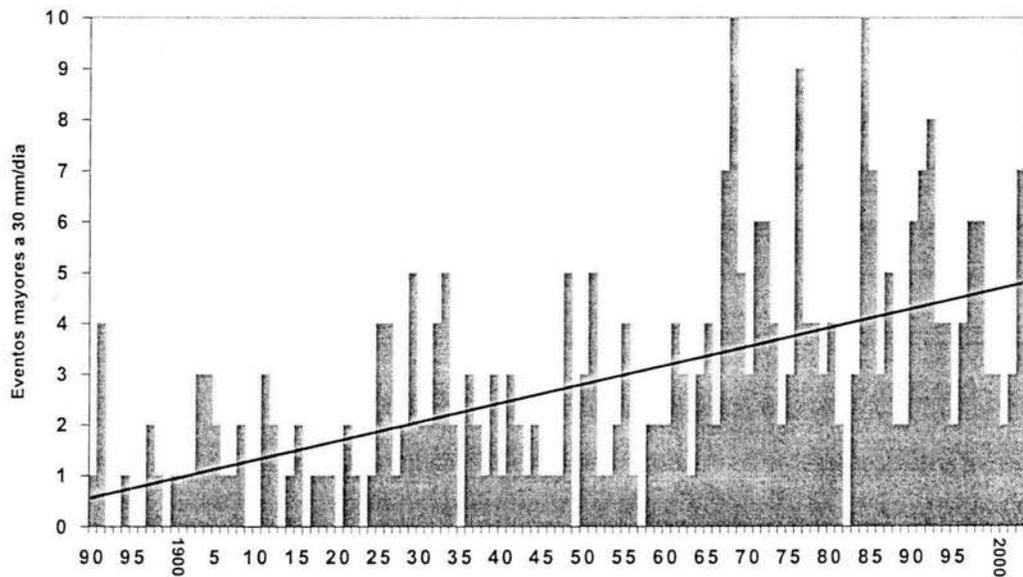


Fig. 6 eventos de precipitación en 24 horas mayores a 30 mm. en la estación Tacubaya. Periodo: 1890-2003.

Estadísticamente, un evento de precipitación extrema se define como aquellos casos lo suficientemente improbables de ocurrir. Al analizar la función de distribución de probabilidad de la lluvia en 24 hrs, mediante la distribución Gamma, el 90 % de la probabilidad puede ser considerada como casos de lluvia normal, y sólo el 10% restante corresponde a eventos de precipitación extrema (Fig. 7) (Magaña, et al., 2002).

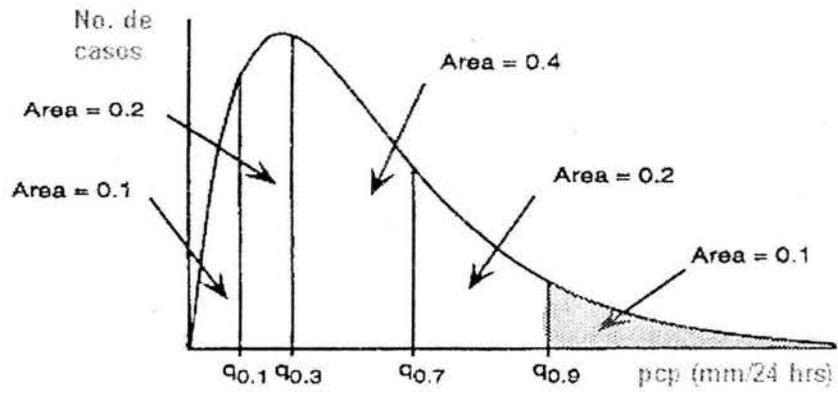


Fig.7 Distribución Gamma para lluvia acumulada en 24 hrs. La región sombreada (q) corresponde al 10% de probabilidad y denota un evento de lluvia extrema.

1.3 Los modelos numéricos en la Meteorología

La idea del pronóstico numérico del tiempo surgió a principios del siglo XX (Richardson, 1916). Sin embargo, los modelos numéricos lograron ser prácticos sólo hasta la segunda mitad del siglo XX (Charney et al, 1950) gracias al desarrollo de la computación que permitió reducir los tiempos de procesamiento y mejoras en sus resultados (Fig. 8) (Bushby, 1986). Los esquemas numéricos de los modelos, sus parametrizaciones y la visualización de los resultados han mejorado notablemente en la última década, lo que permite convertir los pronósticos en verdadera información para los tomadores de decisiones.

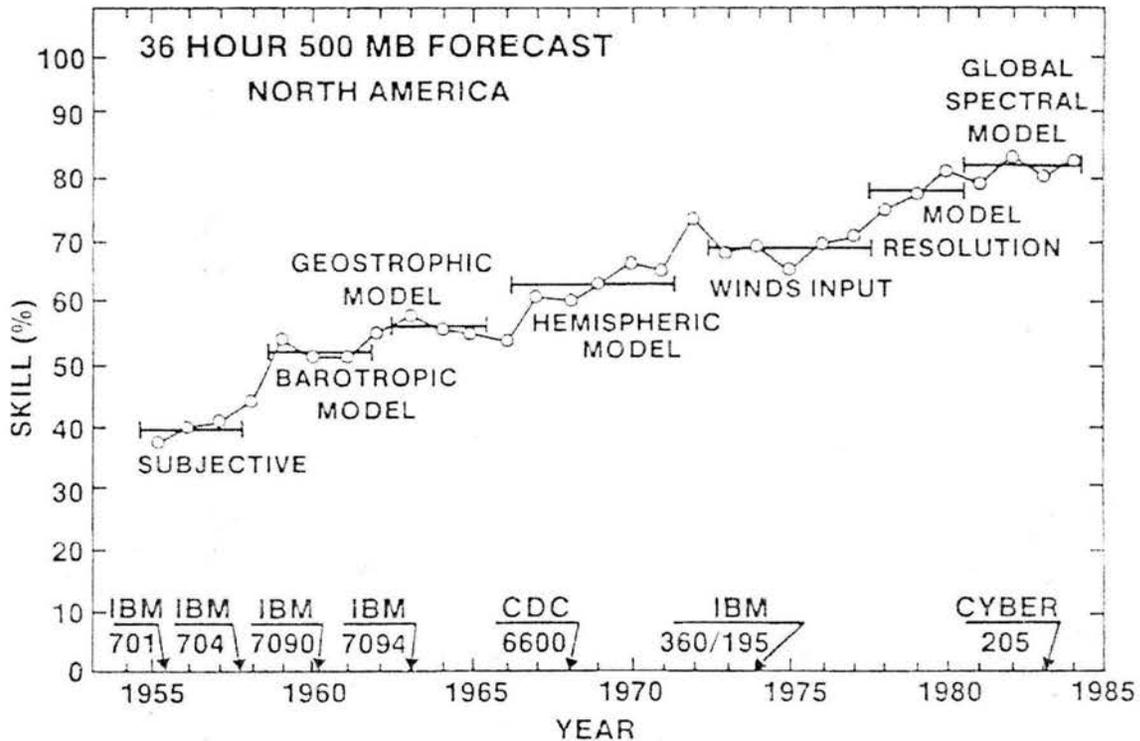


Fig. 8 Calidad del pronóstico del campo de geopotencial al nivel de 500 milibares a 36 horas como función del tiempo, para Estados Unidos. (Tomado de Bushby, 1986)

En las últimas décadas, la capacidad del pronóstico del tiempo ha avanzado hasta permitir simular la circulación atmosférica de mesoescala o regional. Los desarrollos y adecuaciones sobre los modelos numéricos han sido enfocados a la creación de Modelos Atmosféricos de

Área Limitada (LAM, por sus siglas en inglés) (Stauffer y Seaman, 1990). A diferencia de los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés), los LAM consideran sólo una subregión del globo para simulaciones de tiempo y clima. Estos modelos incluyen los esquemas más sofisticados de la física atmosférica, y son capaces de generar circulaciones atmosféricas por forzamientos termodinámicos y dinámicos asociados al uso de suelo y a la orografía.

Los modelos más sofisticados distan de ser perfectos, principalmente cuando la escala espacial a utilizar se reduce y las parametrizaciones de nubes dejan de ser válidas, llevando a errores en pronósticos de la cantidad de precipitación (Stern et. al, 1986). Es este parámetro meteorológico el que es más relevante en lo que se refiere a predicción del tiempo a escala local.

1.3.1 Algunas técnicas de evaluación utilizadas

Desde las primeras simulaciones y pronósticos numéricos de la circulación de la atmósfera y del tiempo meteorológico se ha trabajado en la evaluación de los resultados usando distintas metodologías. La comparación con campos observados es la única forma de medir la calidad de un modelo. Dicha evaluación puede ser cualitativa o cuantitativa (Wilks, 1995). La primera está basada en el análisis de gráficas, mapas de contornos y diagramas. La segunda opción utiliza índices estadísticos para comparar similitud entre campos y es la herramienta más utilizada por la comunidad meteorológica, tanto científica como operativa. Ejemplos de tales índices son el error cuadrático medio, las medias móviles y la desviación estándar.

En los primeros pronósticos del tiempo se utilizaron reportes locales y cartas sinópticas para la evaluación puntual de campos de viento, temperatura y altura geopotencial (Charney et al., 1950; Saucier, 1955). En principio, la comparación de patrones era difícil por la falta de observaciones en todo el dominio de interés. Sin embargo, a partir de la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de conocer el estado futuro de la atmósfera obligó a realizar más mediciones meteorológicas que permitieran analizar las condiciones

sinópticas en una región. El primer intento de realizar un análisis objetivo fue hecho por Panosfky (1949) para el campo de altura geopotencial a 700 mb. Sin embargo, no fue sino hasta el trabajo realizado por Gilcrhist y Cressman (1954), basado en expansiones polinomiales, que se logró generar un campo observado en una malla regular que permitiera comparar observaciones y pronósticos.

Mediante el análisis objetivo¹, la calidad de los datos puede ser evaluada automáticamente. Desde entonces, los esquemas de análisis objetivo considerados como referencia para una mejor calidad de los pronósticos numéricos fueron utilizados operativamente en el National Weather Service de los Estados Unidos. Dicho procedimiento permitió determinar y corregir errores sistemáticos con esquemas como el de pronóstico perfecto o *Perfect Prog* (Klein, 1971), o por medio de estadísticas (diarias, semanales, mensuales, estacionales o anuales) de las salidas de los modelos (MOS², por sus siglas en inglés) (Glahn y Lowry, 1972). Hoy se sabe que la asimilación de los datos meteorológicos en las condiciones iniciales reduce substancialmente la magnitud de los errores sistemáticos en los pronósticos meteorológicos (Kitade et al., 1987; Bushby, 1987). Sin embargo, el pronóstico de la precipitación sigue siendo un reto.

El modelo de mesoescala versión 5 (MM5) ha sido parte de las herramientas para el pronóstico meteorológico tanto en los Estados Unidos como en otros países del mundo (Grell et al., 1994). Es por ello el interés de muchos meteorólogos de evaluar al MM5 mediante técnicas estadísticas y comparaciones sistemáticas para ver su desempeño en simulaciones de campos de temperatura, humedad (Stensrud y Skindlov, 1996) y patrones de viento (Seaman y Michelson, 2000). En comparaciones recientes con otros modelos tipo LAM, se encontró que el MM5 sobreestima entre 2 y 3 ms⁻¹ la intensidad del viento (Shafran et al, 2000; Cox, et al, 1998) y, con un margen de error de entre 50° y 60°, la dirección del viento en terrenos llanos de la parte noreste de los Estados Unidos, pudiéndose duplicar el error en superficies con accidentes orográficos cuando no se cuenta

¹ Procedimiento operativo mediante el cual se construye un campo meteorológico en una malla regular a partir de las observaciones en puntos distribuidos aleatoriamente.

² Model output statistic o MOS es un esquema de generación de valores de predicción de variables meteorológicas en el que los errores sistemáticos del modelo son evaluados y corregidos a la hora de emitir valores puntuales para algún sitio en particular.

con una buena representación de la superficie (Hanna y Yang, 2001). En términos generales, para la temperatura el MM5 muestra que los valores tanto máximos como mínimos simulados en superficies llanas tienden a ser subestimados alrededor de 2° C (White et al., 1999; Cox. et al, 1998), dando lugar a que durante la noche la capa de mezcla no sea bien simulada y lleve a errores en la simulación de dispersión de contaminantes (Hanna y Yang, 2001). El MM5 es considerado por la comunidad meteorológica lo suficientemente robusto, en términos de la física que contiene, para su aplicación en la predicción del tiempo (White et al., 1999).

Para el caso de México, el MM5 ha sido utilizado para simular o predecir circulaciones atmosféricas a nivel regional (Pérez, 1997; 2001) y campos de viento superficial y de altura geopotencial (Hernández, 1999), y para análisis de contaminación atmosférica y dispersión de contaminantes en la Ciudad de México (Salas, 2000; García, 2002, Fuentes, et al., 1993; Jazcilevich et al., 2002). Desde 1996, el MM5 se ha utilizado experimentalmente como una herramienta del pronóstico operativo del tiempo meteorológico en México (Magaña y Pérez, 1998). Sin embargo, poco se ha hecho para evaluar de forma objetiva la calidad de las simulaciones y de los pronósticos. Aún no se tiene la certeza sobre cuál es la máxima resolución espacial a utilizar en el MM5 para obtener resultados útiles. Tal determinación requerirá analizar los errores sistemáticos que presenta el modelo, especialmente en lo que se prefiere a pronóstico de eventos de lluvia intensos, en plazos de 24 y 48 horas.

En este trabajo, se aborda el problema descrito estudiando la región de la Cuenca de México. Mediante técnicas estadísticas similares a las utilizadas en trabajos citados anteriormente, se analiza la confianza de las simulaciones obtenidas del MM5, con la finalidad de estimar los errores sistemáticos que el MM5 presenta.

Capítulo II

Datos y Metodología

2.1 Datos

2.1.1 Datos de precipitación

Los datos de precipitación observada utilizados para este estudio se obtuvieron de la red pluviométrica del Valle de México, a cargo de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del Distrito Federal. Esta red pluviométrica es la más completa en cuanto a cobertura espacial y temporal sobre la Ciudad de México. Actualmente, la red está compuesta por 78 estaciones pluviométricas (Fig. 9) que registran datos al menos cada 10 minutos.

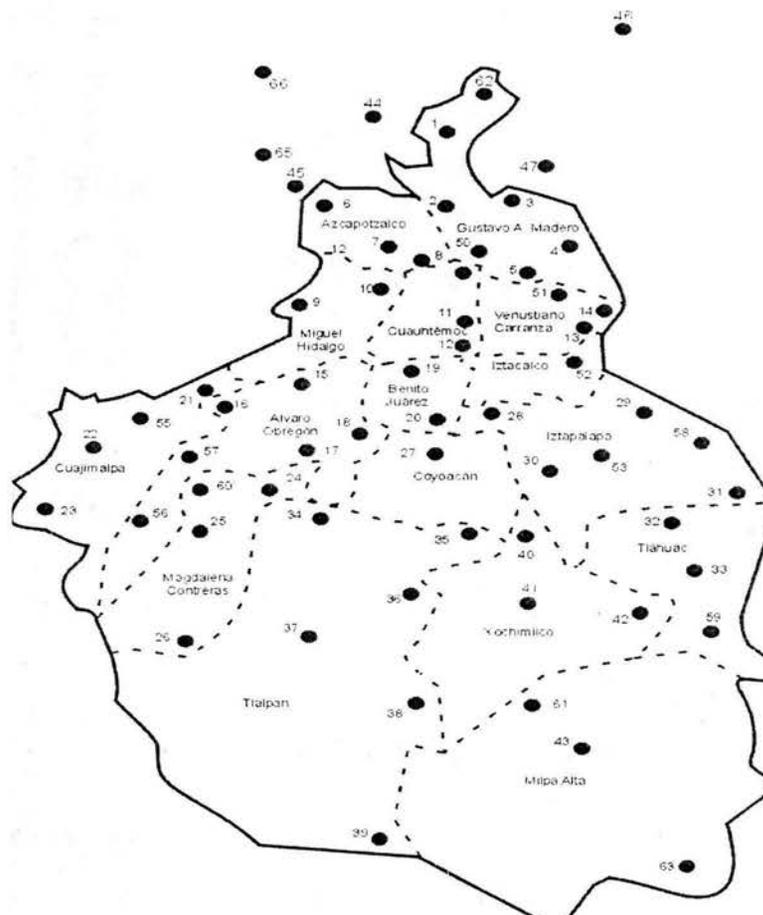


Fig. 9 Distribución de las estaciones pluviométricas de la DGCOH.

Durante episodios de lluvia, los datos son transmitidos en tiempo real. Esto permite, entre otras cosas, analizar con gran detalle la evolución de las tormentas. La continuidad de los registros en esta base de datos permite caracterizar las lluvias de acuerdo a su distribución espacial, intensidad, duración, etc.

2.1.2 Datos de temperatura y vientos

Los datos de vientos, temperatura y humedad son de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), dependiente de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. Esta red cuenta con 32 estaciones automáticas distribuidas en el Distrito Federal y el Estado de México. De éstas, 15 miden parámetros meteorológicos (Fig. 10) que son reportados como media horaria de variables como temperatura, humedad relativa, así como dirección y magnitud del viento.

El periodo que cubre la base de datos, tanto de precipitación como de temperatura, va de mayo de 1993 a octubre de 2002. Los datos de las estaciones, distribuidas irregularmente, son utilizados para generar campos diarios en mallas, pues es más práctico trabajar con arreglos matriciales al momento de comparar pronósticos y observaciones.

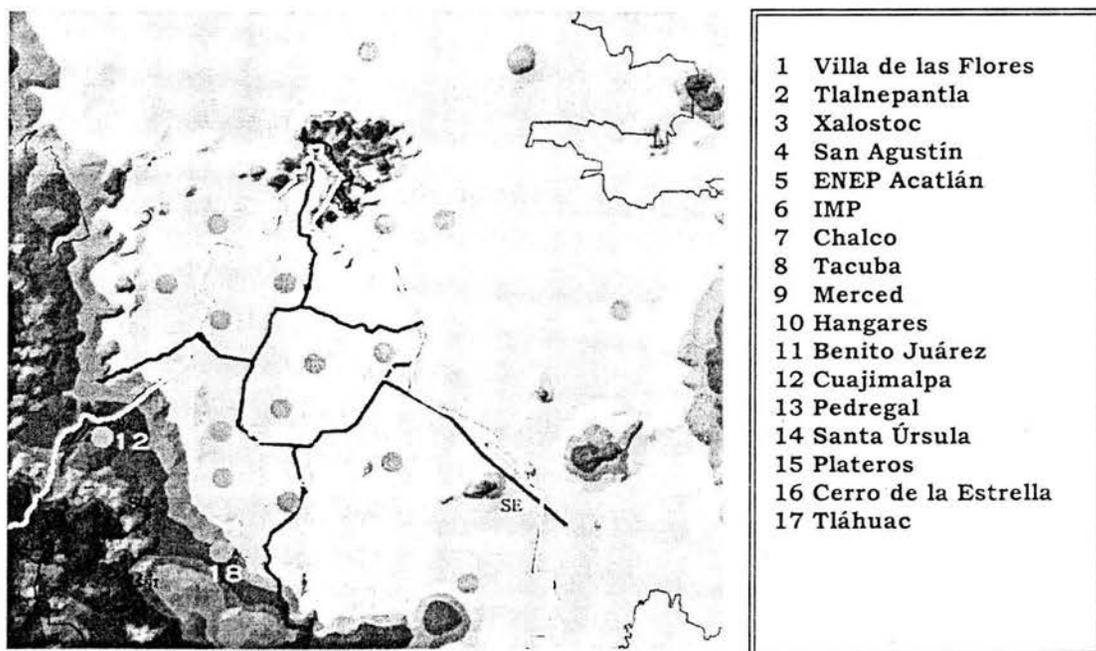


Fig. 10 Distribución de las estaciones meteorológicas de la RAMA en el Distrito Federal y sus alrededores.

Para generar los campos observados, se utilizó un esquema de interpolación del tipo Akima (Akima, 1978). Así, se generaron mallas de datos con resolución espacial de 10 km, que es equivalente a la distancia media entre estaciones.

2.2 El modelo de mesoescala MM5

Uno de los modelos de área limitada más populares es el MM5. La quinta generación del MM5 (MM5-PSU/UCAR, por sus siglas en inglés) es el resultado de diversos desarrollos en la Universidad de Pennsylvania (Warner y Anthes, 1978), y en el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR, por sus siglas en inglés). Por ser un modelo de dominio público para la comunidad de las Ciencias Atmosféricas, sus cambios y adecuaciones son probados por numerosos usuarios. Es por ello que el MM5 se ha convertido en un modelo cada vez más confiable y robusto.

Dentro de las propiedades del MM5 versión 2 se encuentran:

- Diversos tipos de proyección (Polar estereográfica, Lambert Conformal, y Mercator).
- Esquemas de dinámica hidrostática o no-hidrostática, lo que permite realizar experimentos en escalas de unos cuantos kilómetros.
- Consideraciones de las características del terreno (uso de suelo, topografía, cuerpos de agua, etc.)
- Capacidad de asimilación de datos observados (radares, radiosondeos, superficie, etc.)
- Esquemas avanzados de la microfísica de nubes; parametrizaciones de cúmulus; esquemas de capa límite planetaria y procesos de radiación.
- Flexibilidad para realizar simulaciones para más de un dominio, ya sean anidados al dominio madre o subdominios en diferentes regiones.
- Puede ser ejecutado en varias plataformas de cómputo, que van desde supercomputadoras hasta computadoras personales con sistema *LINUX*.
- Facilidad de acoplamiento con otros modelos de mesoescala.

El MM5 es un sistema de modelación compuesto por módulos de preprocesamiento y postprocesamiento de datos con una estructura como la mostrada en la Fig. 11, y que se describen a continuación.

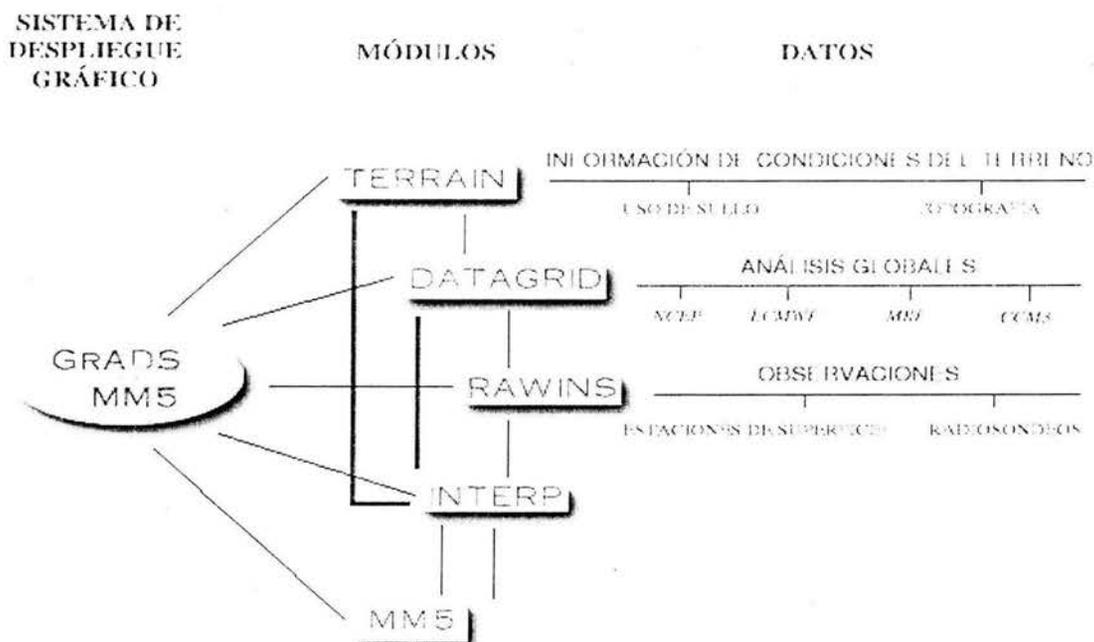


Fig. 11 Esquema de la estructura del modelo de mesoescala MM5.

TERRAIN: Preprocesamiento que define los dominios madre y anidado, la resolución y el tipo de proyección del mapa. Además, asigna los valores de la topografía y las características del terreno.

DATAGRID: Preprocesamiento con el que a partir de los datos de gran escala de viento, humedad, temperatura, etc., (campos iniciales) se construyen las mallas de los dominios a trabajar con la resolución deseada, generando así análisis de datos interpolados con alta resolución espacial, listos para ser procesados por los módulos de RAWINS o INTERP. La información utilizada puede ser histórica, para estudios de diagnóstico o simulación, o en tiempo real para pronóstico operativo del tiempo.

LITTLE_R: Preprocesamiento donde se realiza un análisis objetivo de la información utilizando datos observados en superficie de estaciones meteorológicas y de altura, como radiosondeos, globo piloto, etc. La asimilación de datos tiene la finalidad de mejorar los campos de las variables utilizados como condición inicial.

INTERP: Preprocesamiento donde se interpola de los datos iniciales de coordenadas de presión a coordenadas verticales sigma. Este tipo de conversión de coordenadas permite una mejor representación de la orografía (Yong-Fu y Zhong, 1987).

MM5: Este módulo resuelve numéricamente un sistema de ecuaciones primitivas en términos de flujos en coordenadas sigma por medio de diferencias finitas, usando el método semi-implícito (Haltiner y Williams, 1979) sobre una malla numérica Arakawa tipo-B¹ (Fig. 12).

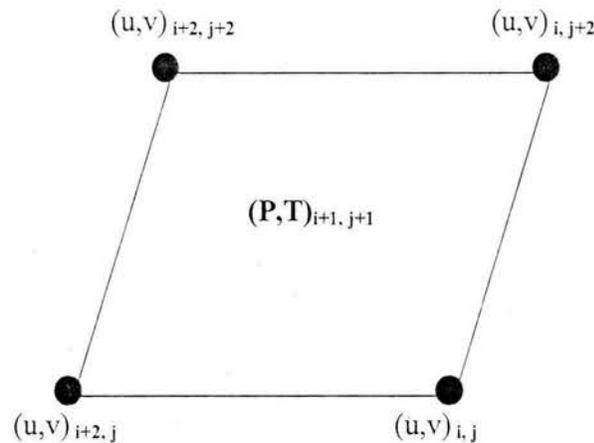


Fig. 12 Malla Arakawa tipo-B.

¹ Este esquema define a las variables escalares (p,t, etc) en el centro de la malla cuadrada (centrada sobre el dominio), mientras que las componentes u y v del viento están colocadas en las esquinas, coincidentes con los puntos de malla del dominio.

2.3 Datos meteorológicos para el MM5

Un modelo de pronóstico numérico del tiempo requiere de condiciones iniciales y de frontera para realizar simulaciones o predicciones a 12, 24, 36 o 48 horas. En pronósticos operativos, las condiciones inicial y de frontera (9 condiciones en intervalos de 6 hr) fueron obtenidas de los pronósticos a escala global realizados diariamente en el Departamento de Aviación de los Estados Unidos² (AVN, por sus siglas en inglés), desarrollados en conjunto con el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP, por sus siglas en inglés).

Los datos de AVN se generan en mallas globales con una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$. Las variables necesarias para el MM5 son:

- Componente zonal y meridional (u y v) del viento
- Temperatura
- Humedad relativa
- Presión reducida al nivel del mar
- Altura geopotencial

Todas las variables se obtuvieron en 10 niveles: 1000, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 150 y 100 mb, con excepción de la humedad relativa que sólo se reporta hasta el nivel de 300 mb. De la misma forma, se obtuvieron los datos medios semanales de la temperatura superficial del mar (con resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$), contruidos por medio de métodos óptimos de interpolación por el NCEP² (Reynolds y Smith, 1994), los cuales sirven para actuar como condición de frontera en áreas oceánicas.

Para zonas continentales, la topografía y el uso de suelo son fundamentales para el MM5 como condición de frontera, pues en gran medida son los parámetros responsables de generar circulaciones de mesoescala.

¹ <http://wesley.wvb.noaa.gov/ncep_data/index_sgi51_png.html>

² <<ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/cmb/sst/oiupdate>>

2.4 Metodología

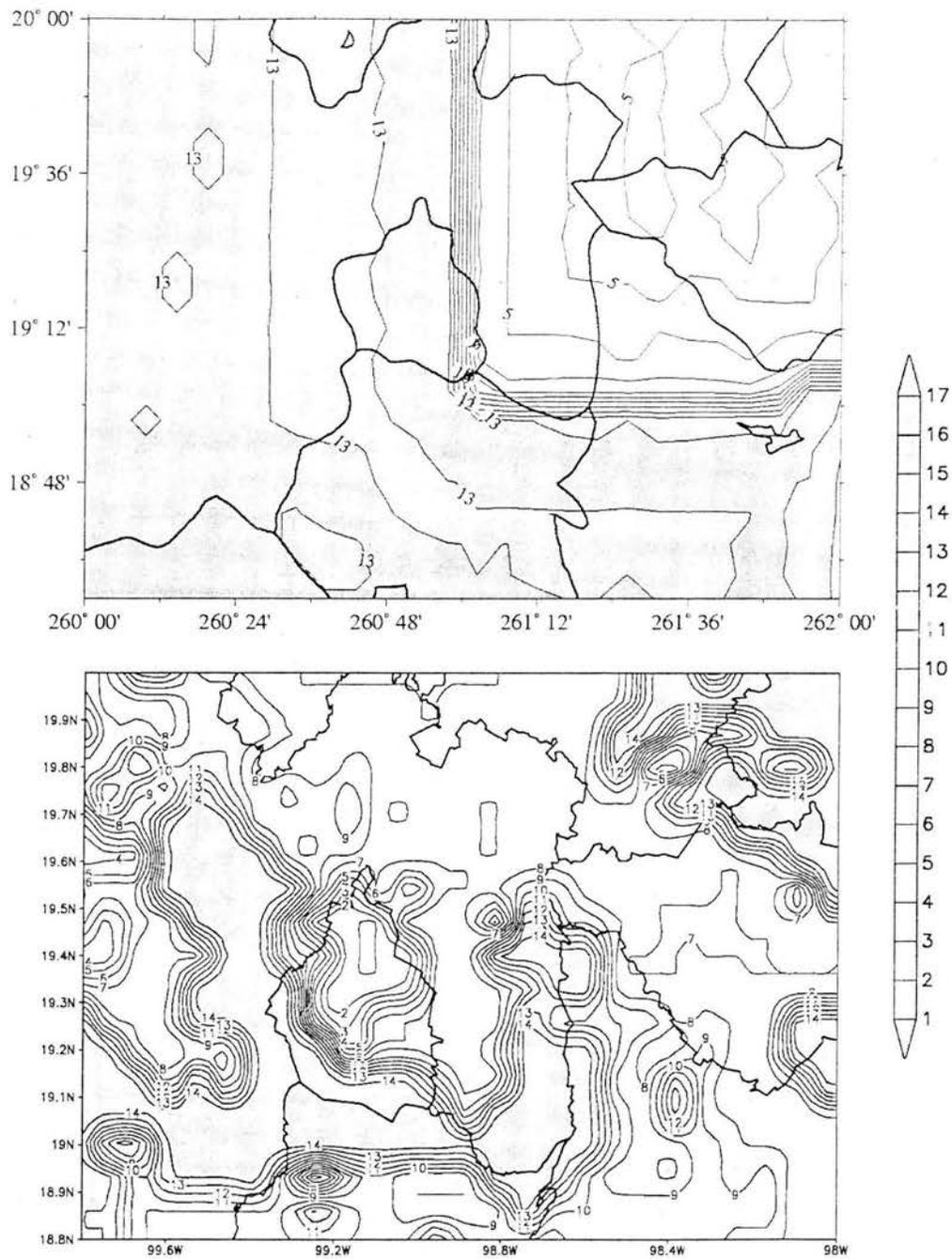
Durante 3 años (2000, 2001 y 2002) en el CCA-UNAM se han realizado pronósticos operativos con el MM5 para el Valle de México, obteniéndose un banco de datos de las salidas del modelo. Para evaluar los resultados de tales pronósticos y estimar cuál es la resolución espacial más adecuada a utilizar con fines de predicción del tiempo, se utilizaron 3 distintas resoluciones en el dominio madre: 24, 45 y 60 km, y en el anidado: 8, 15 y 20 km, respectivamente. 8 km. es la máxima resolución que dinámicamente puede utilizarse debido al uso de las parametrizaciones de nubes cúmulus. De incrementarse la resolución espacial, las parametrizaciones de ciertos procesos físicos pierden validez, pues sería necesario simular explícitamente la dinámica de las nubes. La evaluación sobre la resolución más adecuada se basó principalmente en la similitud en las simulaciones de los campos de precipitación, por ser esta la variable de mayor relevancia en la región. Sin embargo, sólo en contadas ocasiones se ha analizado la calidad de la simulación de temperaturas y vientos. (Salas, 2000; García, 2002).

Otra opción sería comparar los reportes de las estaciones con un valor obtenido por interpolación de la malla de salida del MM5. Sin embargo, el mayor interés se tiene en la capacidad para reproducir patrones espaciales del tiempo meteorológico.

2.4.1 Criterios utilizados en el experimento de control del modelo MM5.

En el presente trabajo, se consideraron tanto la versión 2 como la 3 del MM5. La diferencia entre ambas versiones ha sido descrita por Dudhia et al. (1999), y radica esencialmente en la mejoría de los datos de uso de suelo y de la topografía (Fig. 13), así como la adecuación para la asimilación de datos, permitiendo simular con mayor confianza la condición inicial.

Dada la amplia variedad de esquemas de parametrizaciones físicas con las que cuenta el modelo, es importante fijar esquemas, denominados como *de control*, para realizar las simulaciones del tiempo.



CATEGORÍAS DE USO DE SUELO:

1. Área urbana, 2. Área de agricultura, 3. Prados, 4. Bosque, 5. Bosque de coníferas, 6. Bosque y cuerpos de agua, 7. cuerpos de agua, 8. Pantano, 9. Desierto, 10. Tundra, 11. Hielo, 12. Bosques tropicales o subtropicales, 13. Savana. De la 14 a la 17 no hay clasificación precisa.

Fig. 13a Uso de suelo utilizado en el MM5 en la versión 2 (arriba) y versión 3 (abajo).

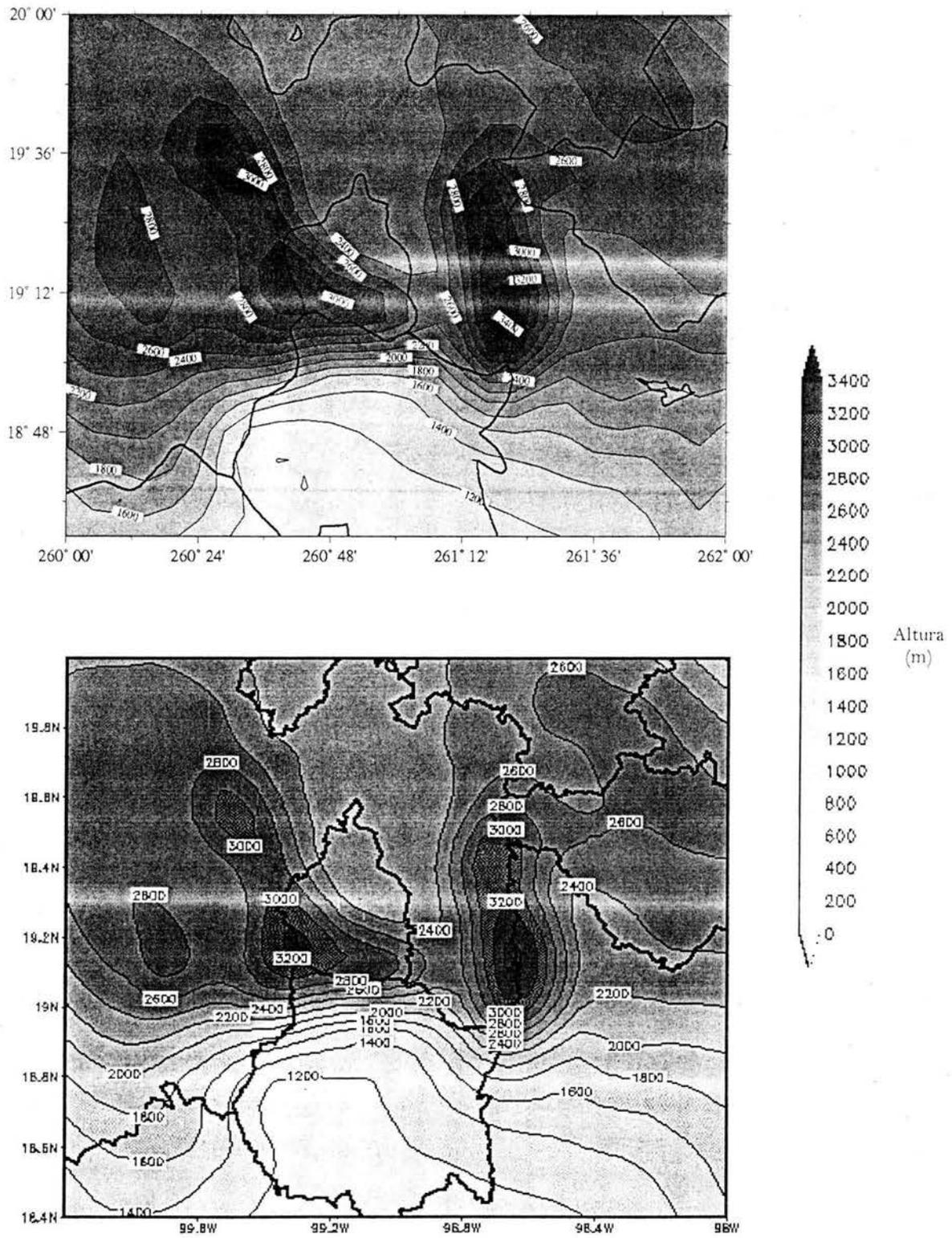


Fig. 13b Topografía utilizada en el MM5 versión 2 (arriba) y versión 3 (abajo).

Las parametrizaciones consideradas en ambas versiones fueron las siguientes:

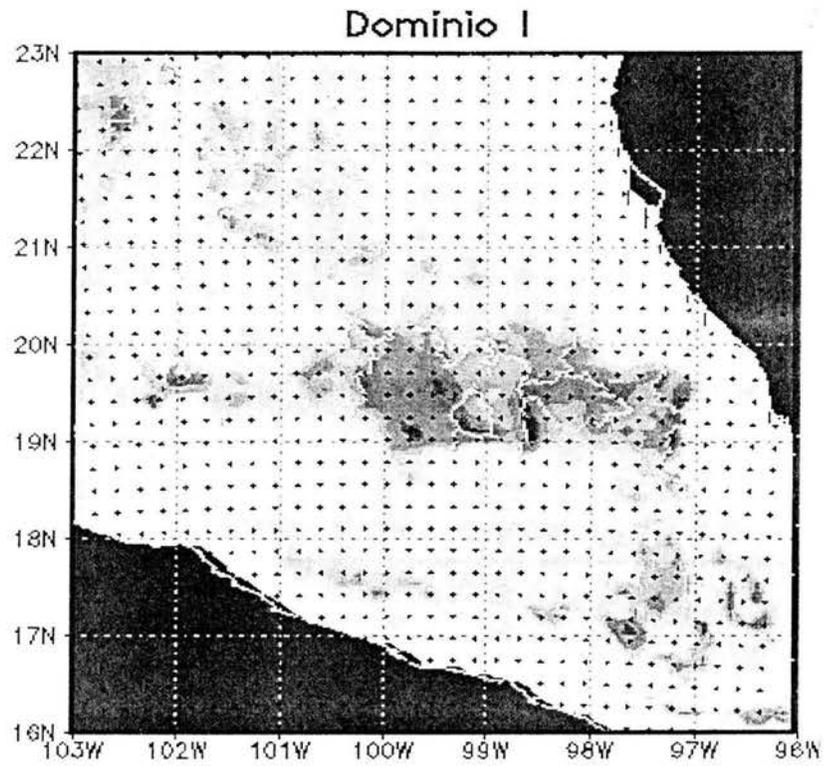
- 2 mallas anidadas interactuando entre sí, siendo tanto la malla madre como la anidada de 31 X 31 puntos cada una, en proyecciones tipo Lambert (Fig. 14).
- La malla madre está centrada en 19.1 N y 99.2 W. La resolución espacial para los dominios madre es de 24, 45 y 60 km; y de 8, 15 y 20 km para los anidados correspondientes.
- Corrida en condición no-hidrostática, utilizando 10 niveles de presión (1000, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 150 y 100 mb) interpolados a 23 niveles en coordenadas verticales sigma. La coordenada sigma está definida como:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t},$$

donde p_s es la presión de superficie, p_t es la presión en la cima (100 mb). La coordenada sigma es adimensional y decrece monótonamente con la altura. Mediante el uso de las coordenadas sigma, se puede tener una representación más suavizada de la topografía de la región de estudio.

- Esquema de parametrización de nubes cumulus tipo Kain-Fritsch en ambas mallas. Este esquema permite el mezclado entre nubes para determinar el *entrainment-detrainment*, removiendo toda la energía de flotabilidad disponible (Kain y Fritsch, 1993).
- Esquema de capa límite planetaria desarrollada por Blackadar (1962), caracterizado por una capa de mezcla lineal en la capa superficial.
- Esquema de radiación atmosférica de enfriamiento simple, donde se supone que la razón de enfriamiento atmosférico sólo depende de la temperatura.

a)



b)

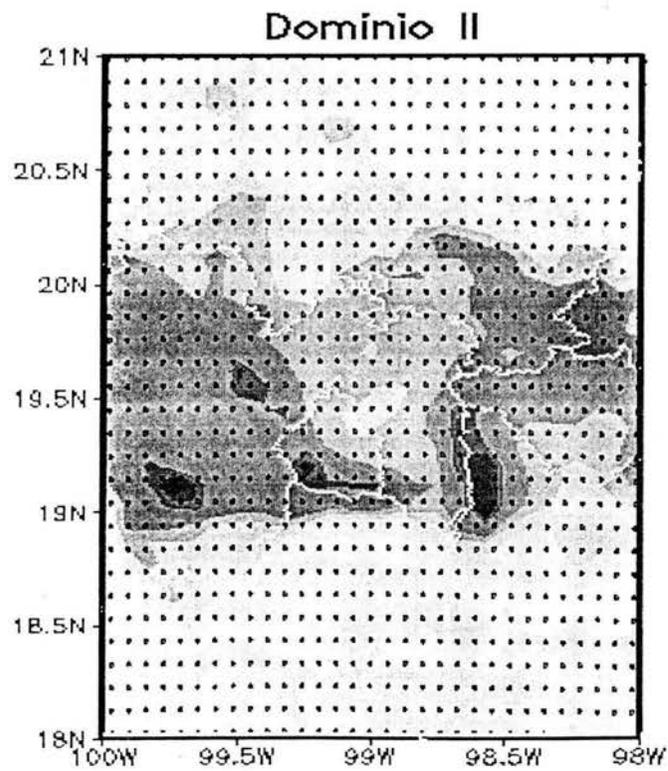


Fig. 14 Domínio a) madre y b) anidado en puntos de malla con resolución de 24 y 8 km utilizados en el MM5.

2.4.2 Consideraciones para el caso de la Cd. de México

Para la obtención de mejores simulaciones a corto plazo, es muy importante contar con una buena condición inicial. En la versión 3 del MM5, la asimilación de los datos de superficie y altura se mejoran las condiciones iniciales de campos meteorológicos usando reportes de temperatura, humedad relativa y magnitud y dirección del viento, mediante un esquema de análisis objetivo tipo Cressman (Cressman, 1959) (Fig. 15). Cabe señalar que el proceso de la asimilación de datos no sólo mejora la condición inicial, sino el desempeño del modelo en general. Esto se sigue del hecho de que el pronóstico numérico del tiempo a corto plazo es esencialmente un problema de condición inicial.

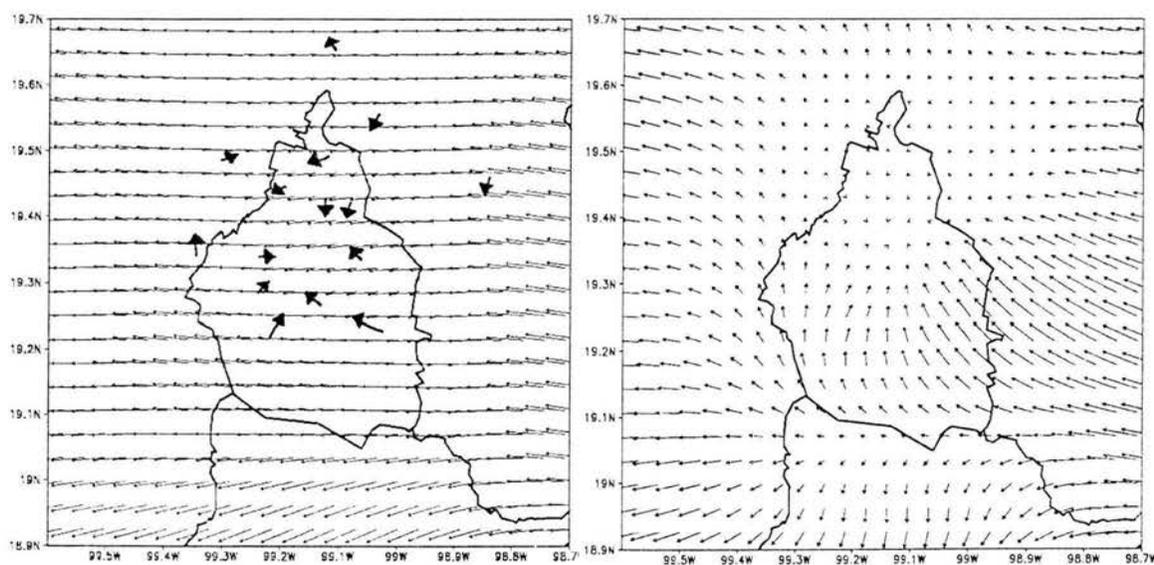


Fig. 15. Comparación del patrón del viento para el día 29 de julio de 2002: a) sin asimilar y b) asimilado en la condición inicial (6 hora local). Los vectores gruesos corresponden a observaciones de la RAMA.

El proceso de asimilación de datos consiste en una serie de pasos entre los que destacan el control de calidad, filtrado de datos equivocados, suavizamiento e interpolación de los datos observados. En este estudio, se consideró un nivel de tolerancia (error) promedio de 30 % en el control de calidad entre las observaciones y los campos de las condiciones iniciales del modelo AVN. En el esquema del análisis objetivo, se utilizó el de tipo Cressman (Fig. 16), el cual crea patrones a partir de una condición inicial modificada por datos distribuidos aleatoriamente. Este esquema está basado en un radio de influencia anisotrópico para modificar los valores de puntos de malla alrededor de cada observación.

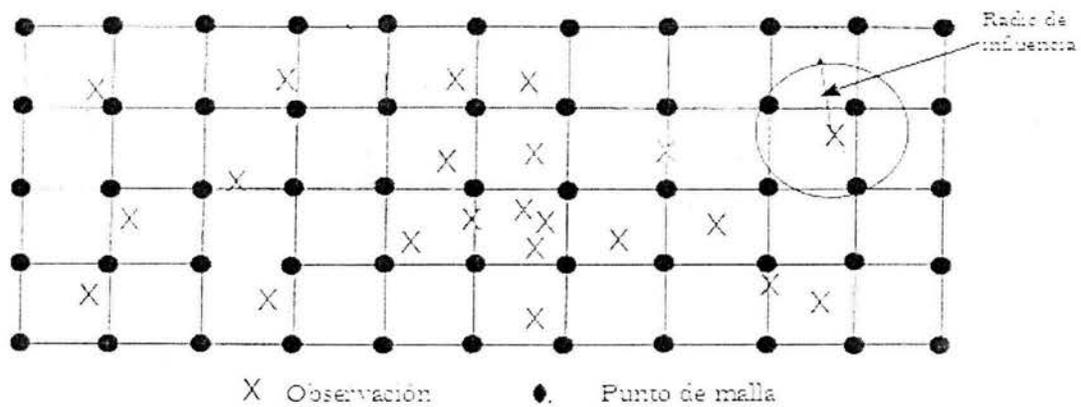


Fig. 16 Esquema de análisis objetivo tipo Cressman. Los puntos representan el arreglo en malla, mientras que las cruces son los datos observados distribuidos aleatoriamente.

Dada la densa red de estaciones de mediciones atmosféricas en el área del Distrito Federal, sólo los datos de la salida del modelo del dominio anidado son comparados con valores interpolados a puntos de malla para su evaluación. Lo anterior implica que los valores observados se construyen con la misma resolución de la salida de modelo su adecuada comparación.

2.5 Esquemas y estrategias de evaluación de pronósticos utilizados

La evaluación del MM5 se puede realizar usando los reportes de estación o análisis en puntos de malla generados a partir de las observaciones, como el campo a reproducir por el modelo.

En el presente estudio, las evaluaciones consideraron 78 estaciones o puntos sobre el Distrito Federal que corresponden a la red de la DGCOH (como en la Fig. 9). En la evaluación puntual, los datos del MM5 son interpolados a los puntos donde se localizan las estaciones mediante un esquema de interpolación bilineal pesado. Este esquema considera los cuatro puntos esquina más cercanos y la distancia de cada uno de ellos al punto de interés, de tal forma que es posible obtener el dato simulado para un punto de interés y realizar comparaciones con lo observado.

Para fines de comparación, los reportes de precipitación y temperatura de las estaciones se interpolaron a una malla con una resolución espacial de 10 km mediante con un esquema de interpolación Akima (Akima, 1978) que es básicamente de *spline cúbicos*. Posteriormente, a partir de las comparaciones puntuales, se crearon campos tanto observados como pronosticados concentrados sólo para el área urbana del Distrito Federal, pues hacia las montañas no hay estaciones y por lo tanto, el campo “observado” es poco confiable.

2.5.1 Evaluación de la temperatura

Para evaluar las predicciones de temperatura de superficie a 24 horas con el MM5, se ha tomado el valor del nivel sigma más cercano a la superficie que está aproximadamente 30 metros sobre el nivel del suelo, interpolado a un punto de interés particular y comparado con el reporte de la estación. Los análisis se concentran en predicciones de temperatura máxima y mínima, así como en las variaciones diurnas de la temperatura.

Como una medida de la calidad de las predicciones con modelos numéricos, comúnmente se utiliza el parámetro estadístico llamado *Raíz del error cuadrático medio* (*rmse*, por sus siglas en inglés) (Wilks, 1995). El *rmse* que se define como:

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (Y_m - O_m)^2} \quad , \text{ donde:}$$

M es el número total de datos

Y_m es el dato observado

O_m es el dato pronosticado

El uso del *rmse* permite estimar el orden de magnitud de las diferencias entre el modelo y las observaciones, sobre todo en el dominio de interés. Tal esquema ha sido utilizado para pronósticos climáticos de temperaturas (Wilks, 1995).

2.5.2 Evaluación de la precipitación

Al igual que la evaluación de la temperatura, para la precipitación se hace uso del *rmse*. Sin embargo, para el presente estudio se ha diseñado un esquema de evaluación de la lluvia pronosticada, considerando la información de mayor relevancia y siguiendo tres criterios con qué estimar la cantidad de precipitación:

- i) llueve o no llueve,
- ii) cantidad de lluvia acumulada en 24 hrs. (+/- 5 mm), y
- iii) ocurrencia de un evento extremo de precipitación.

Las características de esta evaluación para algunos puntos (Fig. 17) se describen a continuación.

Sea *pred* el pronóstico de lluvia acumulada a 24 hr generado por el MM5, en malla e interpolado al punto de interés, y sea *obs* el reporte puntual registrado en dicha estación.

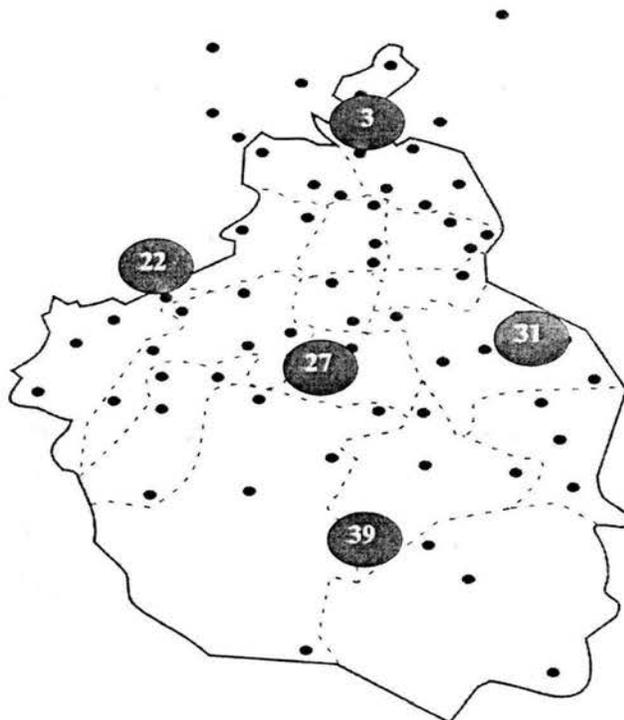


Fig. 17. Estaciones meteorológicas de la DGCOH. Los círculos corresponden a la estación 3-Lindavista, 22-La Venta, 27-Xotepingo, 31-Santa Catarina y 39-Caseta Forestal, utilizadas para las comparaciones puntuales.

Score es el puntaje que se le da al pronóstico. El máximo de puntos que puede alcanzar un día de pronóstico en un lugar dado es de 3, y se da si se pronostica correctamente bajo el siguiente criterio:

- i) criterio: llovió o no llovió:
i.e. si $obs = 0$ y $pred < 1$ mm, es decir, no llueve, entonces $score = 1$, o también
si $obs \neq 0$ y $pred > 1$ mm, es decir, llueve, entonces $score = 1$
- ii) criterio: Cuanto llovió con un margen de error de ± 5 mm alrededor del reporte, i.e.
si $obs \neq 0$, y $obs - 5 \text{ mm} < pred < obs + 5 \text{ mm}$, entonces $score = 1$

- iii) criterio: pronóstico de evento extremo de lluvia
- i.e. si $obs \neq 0$, con $obs \geq$ valor de lluvia extremo, y
si $pred >$ valor de lluvia extremo, entonces $score = 1$

Los resultados se interpretan como:

- si el $score=1$, se acertó a la ocurrencia o no de lluvia.
- Si $score=2$, se acertó en el pronóstico de ocurrencia de lluvia y en el rango de lo precipitado con un error de +/- 5 milímetros en 24 horas.
- Si $score=3$, indica acierto en lluvia, en el rango llovido, y acierto al pronosticar un evento extremo.

Mediante este procedimiento la calificación máxima es 3 si llovió y además fue un evento extremo. Los puntos obtenidos por el modelo durante un periodo en particular (e.g. un mes) da información sobre la calidad del modelo y sobre la dificultad de pronosticar cuando se analizan las características de la lluvia. Por ejemplo: un $score$ de 30 puntos en 30 días puede significar que nunca llovió, y el modelo acertó en cada caso. Si el porcentaje de acierto es alto cuando los puntos por obtener fueran muchos (e.g. 90 puntos en un mes), es indicativo de calidad y confianza en el modelo. Sin embargo, cuando el porcentaje es alto y el número de puntos es bajo (e.g. 30 puntos en un mes), se tienen indicios de que el modelo lo hace bien cuando el reto es mínimo.

Asimismo, regiones donde el puntaje por alcanzar sea alto indican zonas en donde ocurren procesos que hacen del pronóstico algo complicado. En otras palabras, serán regiones donde los pronósticos de lluvia diaria serán difíciles de estimar.

Por lo general, el puntaje por alcanzar tiene relevancia en temporada de lluvias, y rara vez alcanzará los 90 puntos como meta (considerando 3 puntos diarios como máximo). Este esquema permite analizar hasta qué punto somos capaces de dar información a un tomador de decisiones, es decir, sobre los alcances y limitaciones de pronósticos a 24 horas.

En la práctica, un meteorólogo operativo deberá utilizar otros elementos descritos en estudios de pronósticos cuantitativos de precipitación (QPF, por sus siglas en inglés), que consideran el radiosondeo y los índices que de él se generan (Corner, et. al., 1999). Dicho trabajo toma en cuenta el pronóstico numérico y otros elementos, como las características del radiosondeo.

Capítulo III

Análisis observacional de las lluvias en la Cuenca de México

3.1 Ciclo interanual de las lluvias

Sobre la Cuenca de México, el clima exhibe un comportamiento del tipo monzónico, con una temporada de lluvias de verano bien definida (mayo-octubre), y un invierno (noviembre-abril) en el que sólo se presentan lluvias esporádicas relacionadas con el paso de frentes fríos o *nortes* (Vázquez, 2000). Durante el verano (Fig. 18), las precipitaciones contribuyen a casi toda la lluvia anual, que en el Valle de México son de 400 mm/año en la parte noreste y casi 1000 mm/año en la parte oeste y suroeste.

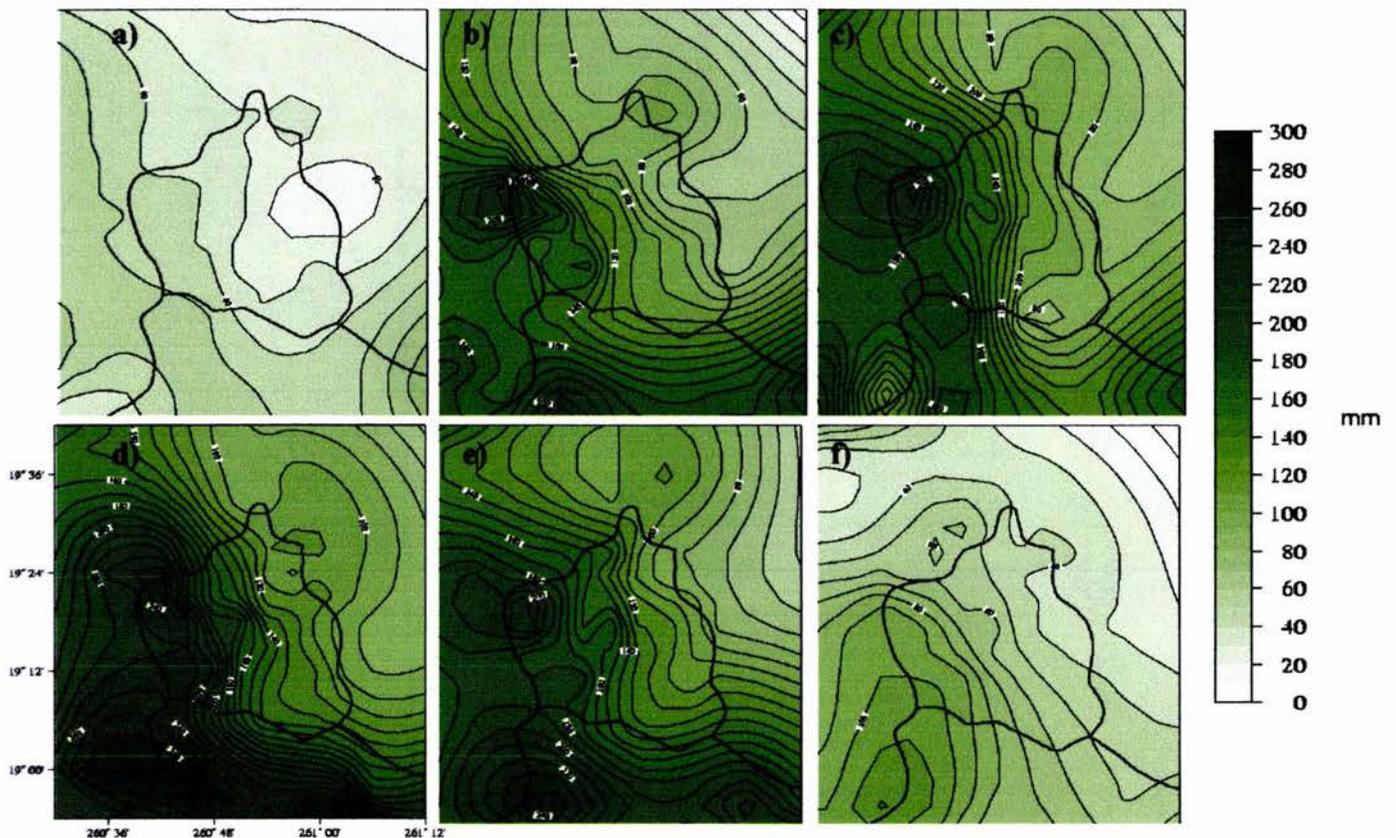


Fig. 18 Climatología de la precipitación en a) mayo, b) junio, c) julio, d) agosto, e) septiembre y f) octubre en la Cuenca de México con datos de la DGCOH. Periodo (1993-2002).

La variabilidad de estos patrones de un año a otro resulta en cambios de hasta +/- 120 mm en el valle de México. Por ejemplo, junio de 2003 resultó ser uno de los más lluviosos en los últimos 30 años, registrándose casi 260 mm, es decir, poco más del 50% arriba de su media. De igual forma, existe gran variabilidad en cuanto al inicio de las lluvias, pudiendo iniciar tan tarde como finales de junio o principios de julio, como sucedió en 1997.

3.1.1 Modos de variabilidad en precipitación (EOFs)

Una de las formas de analizar la variabilidad de patrones espaciales de variables meteorológicas es mediante el uso de Funciones Empíricas Ortogonales (EOF, por sus siglas en inglés). Esta técnica permite determinar los modos o formas más frecuentes de comportamiento de las anomalías de la variable que explican la mayor cantidad de varianza, es decir, el patrón o comportamiento que aparece con más frecuencia. La aplicación de EOFs ha sido utilizada con frecuencia en estudios climáticos y meteorológicos con buenos resultados (Preisendorfer et al., 1983).

Para el presente análisis, se sigue la estrategia de utilizar arreglos regulares de los reportes de lluvia observados sobre el Distrito Federal y las salidas del modelo MM5 para un periodo de tres años (2000-2002). Los EOFs resultantes de las observaciones en estación son interpolados para su graficación y comparados con los EOFs respectivos del MM5 de la malla de menor resolución. La comparación de patrones de EOFs es posible debido al número y distribución de estaciones de la red de observaciones pluviométricas en el Valle de México, que resulta en una resolución espacial comparable a la resolución máxima utilizada con MM5.

Al analizar los EOFs de la parte observada, el primer modo (Fig. 19a) indica claramente que las mayores variaciones en precipitación diaria ocurren en la zona poniente, donde climatológicamente llueve con más intensidad y cantidad. Este primer EOF resulta ser el dominante al explicar casi un 50% de la variación de las lluvias de verano. Sin embargo, el segundo modo sugiere la existencia de un dipolo, es decir, cuando este modo es excitado tiende a llover más en el sur que en el norte o viceversa. Este segundo EOF explica casi un 10% de la precipitación observada. El tercer EOF también corresponde a un dipolo pero con orientación este - oeste, es decir, lluvias en el poniente pueden estar

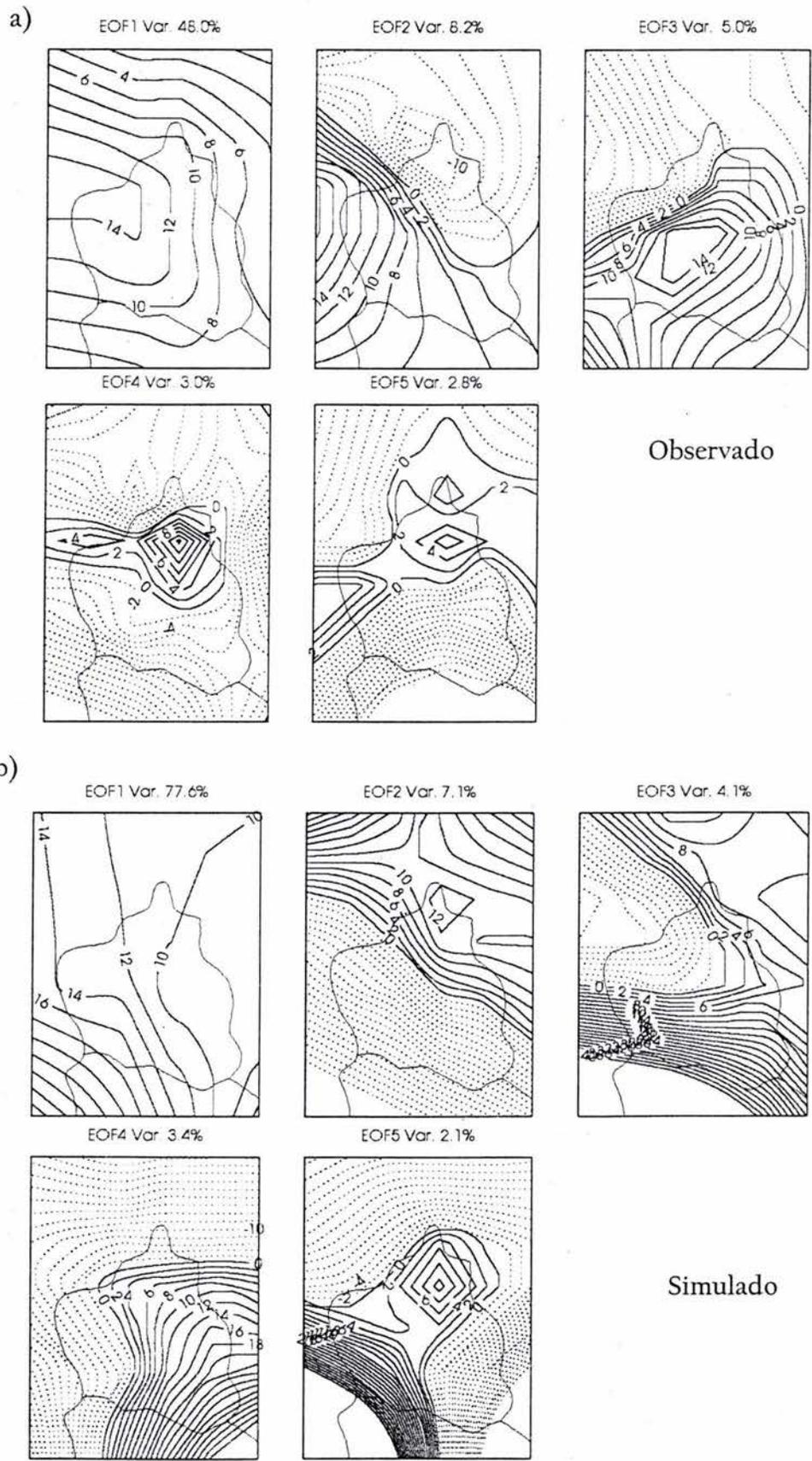


Fig. 19 EOF de precipitación observado (arriba) y simulado (abajo) de mayo a octubre. Periodo 2000-02.

relacionadas con poca o nula lluvia en el oriente. No obstante, a pesar de reflejar una importante característica de las lluvias sobre la Ciudad, este modo sólo explica un 5% de la varianza. Los EOFs o modos restantes corresponden a patrones espaciales de menor escala y explican un porcentaje cada vez menor de la varianza.

Cuando se realiza el mismo análisis para los EOFs de las simulaciones de precipitación del MM5 (Fig. 19b), se encuentra como primera característica que las estructuras espaciales son similares a las observadas. La diferencia entre los EOFs de datos observados y los de MM5 está en la ubicación de los máximos valores. En el primer caso, el máximo del EOF se ubica más al sur que lo observado. Diferencias similares se encuentran entre los restantes EOFs. No obstante, en cada caso se mantiene tanto la estructura espacial como la observada. Las diferencias en la ubicación de máximos y mínimos en cada EOF sugiere que los modos excitados por MM5 pueden ser adecuados pero tendrán un error de ubicación de al menos 10 o 20 km. Con ello, la resolución espacial con la que se puede tener confianza en el pronóstico, comienza a ser de la magnitud del error entre EOFs observados y simulados con MM5.

El siguiente elemento a analizar es el correspondiente a los tiempos en que los modos son excitados, tanto en el caso observado como el simulado. Aunque los modos sean parecido, si no son excitados en los días que corresponden, las simulaciones tendrán poca calidad. Mediante el análisis de la amplitud y temporalidad de los coeficientes de los EOF se puede determinar cuándo ocurren eventos con características espaciales como los EOF. Para el caso de los EOF observados se encuentra que es el EOF1 sin duda el que más amplitud alcanza, sin embargo, no es rara la amplificación del EOF2 e incluso del EOF3 (Fig. 20). Un análisis similar para los coeficientes de los EOF del MM5 muestra que en los veranos del 2000 y 2001 existe poca variabilidad en los coeficientes y que su amplitud es menor que en el periodo 2002. La explicación es directa: la asimilación de datos de estaciones de superficie para este año imprime la información de mesoescala adecuada para excitar modos de mesoescala en el modelo. La no asimilación de esta información para pronósticos con altas resoluciones espaciales convierte al MM5 en un “esquema sofisticado de interpolación”. Del resultado del análisis de EOF surge la importancia que tiene la condición inicial tiene para el pronóstico del tiempo a corto plazo.

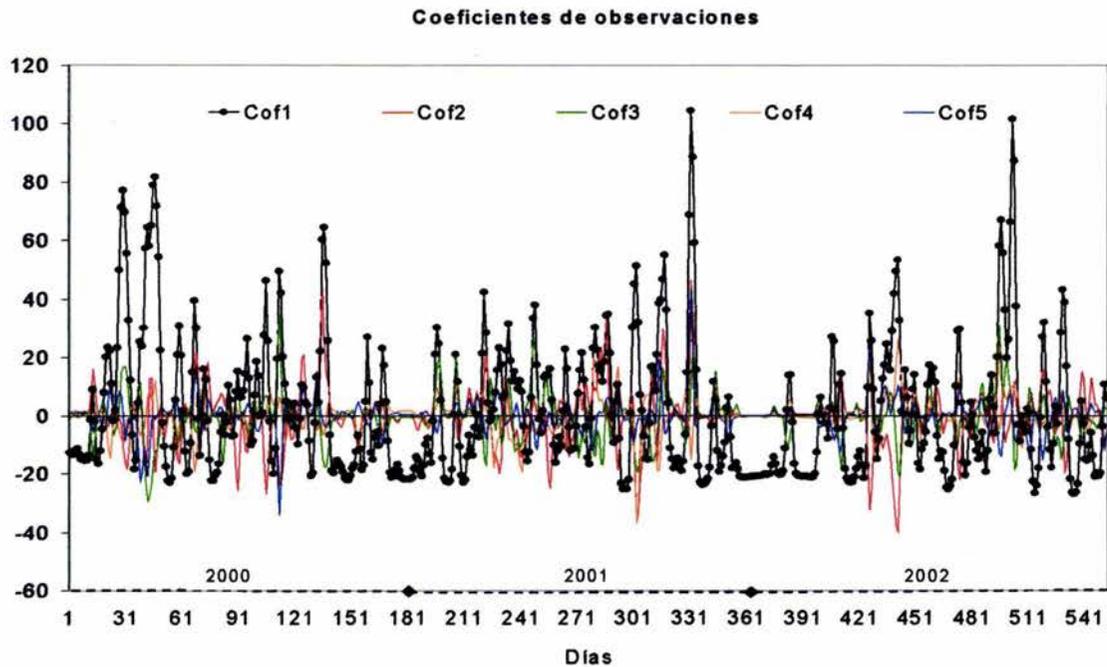


Fig. 20 Coeficientes de precipitación observado (arriba) y simulado (abajo) de mayo a octubre. Periodo 2000-02.

Finalmente, resulta interesante analizar si los EOFs en el modelo son excitados los mismos días que son observados. Basta comparar los días de máxima amplitud de los coeficientes del modelo y compararlos con los observados para analizar la similitud de los patrones de lluvia en casos particulares (ver cap. 4).

Parte de la diferencia puede estar en la simulación de los patrones sinópticos que, forzados por la orografía y el uso de suelo, resultan en tiempo meteorológico de mesoescala. Por ejemplo, un patrón compuesto del campo de vientos a 700 mb sobre el altiplano mexicano en los días en que el EOF1 es excitado corresponde a un patrón bien definido de una Onda del Este sobre el sureste del país (Fig. 21).

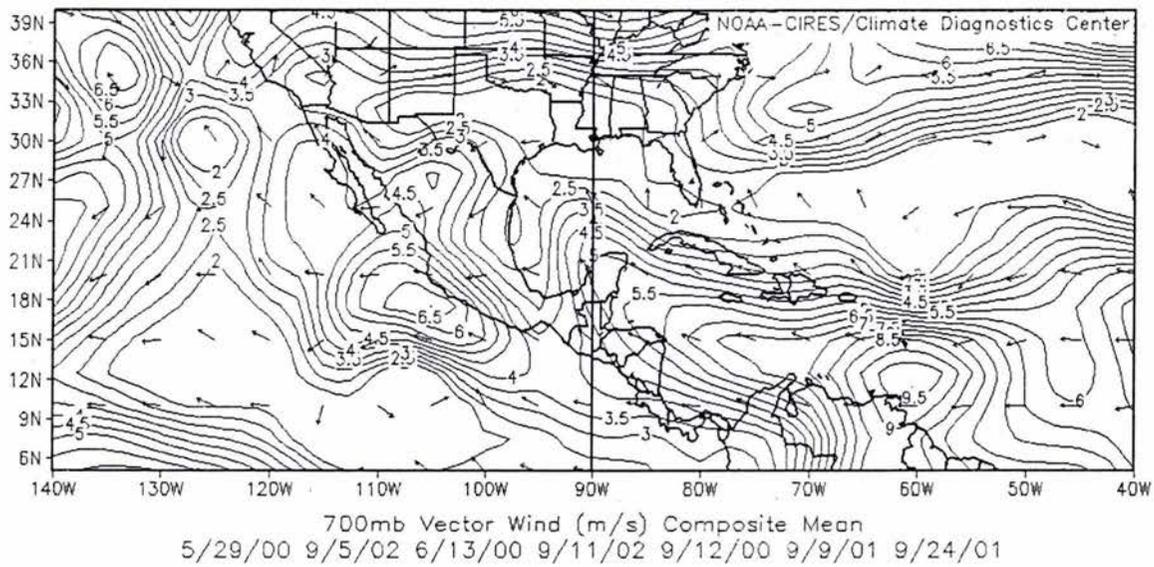


Fig. 21 Patrón compuesto del viento a 700 mb con las fechas en las que el coeficiente 1 es el dominante.

3.1.2 Ciclo diurno de las lluvias

Durante el verano, la interacción de los vientos predominantes del este con la orografía, determinan en gran medida las características espaciales de la precipitación. Como primera de ellas, se tiene la distribución de la lluvia que ocurre sobre el Distrito Federal (Fig. 22). Para la zona sur, las lluvias entre la 1 y 5 Hora Local (HL) son más frecuentes que en otros sitios. Además, el máximo de ocurrencia de precipitación se presenta a las 19 HL, tanto para el sur como para el centro de la Ciudad. Sin embargo, en la zona norte, la ocurrencia de la lluvia tiende a ser 1 hora más temprano.

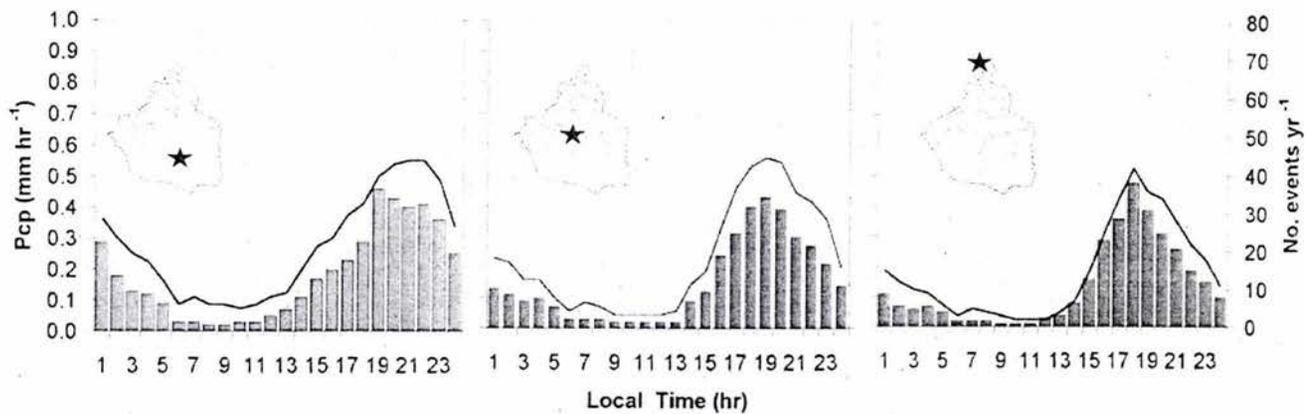


Fig. 22 Distribución media diaria de precipitación observado y hora de ocurrencia para las estaciones Caseta Forestal (izq.), Xotepingo (centro) y Santa Catarina (der.) en el periodo 2000-02.

La precipitación en la Ciudad de México muestra un ciclo diurno bien definido. Es entre las 15 y 22 HL cuando ocurren con más frecuencia lluvias intensas y las tormentas severas o *aguaceros* (> 20 mm/hr). Lo anterior está relacionado con la inestabilidad atmosférica, pues conforme se pasan las horas del día, el contraste entre el calor superficial y la humedad en el ambiente son parte del proceso de convección que da origen a las tormentas. Algunas lluvias ocurren en las primeras horas del día, esto es, entre las 5 o 6 HL en la zona oeste y suroeste de la Ciudad. Los mecanismos para explicar esta precipitación diurna son poco claros. Entre las 8 y 12 HL, es rara la ocurrencia de lluvias. Sin embargo, justo después de las 12 HL, y al parecer por efecto de circulaciones locales como brisas de valle-montaña y evolución de la estabilidad atmosférica, ocurren algunas lluvias en el sur, extendiéndose al oeste y posteriormente hacia el norte y al este conforme pasa el día (Fig. 23).

Es claro que la distribución de las lluvias, aún en un sitio pequeño como la Ciudad de México, no es uniforme. En la zona sur y poniente del Distrito Federal se registra anualmente casi el doble de precipitación que en el oriente de la Ciudad, esencialmente porque el efecto orográfico intensifica las tormentas. Por esta razón, en la parte oriente eventos de lluvia de más de 15 mm por día resultan poco probables, por lo que se pueden considerar eventos extremos de precipitación. En el poniente de la Ciudad, los eventos de lluvia extrema tienen que ser de más de 30 mm por día (Fig. 24).

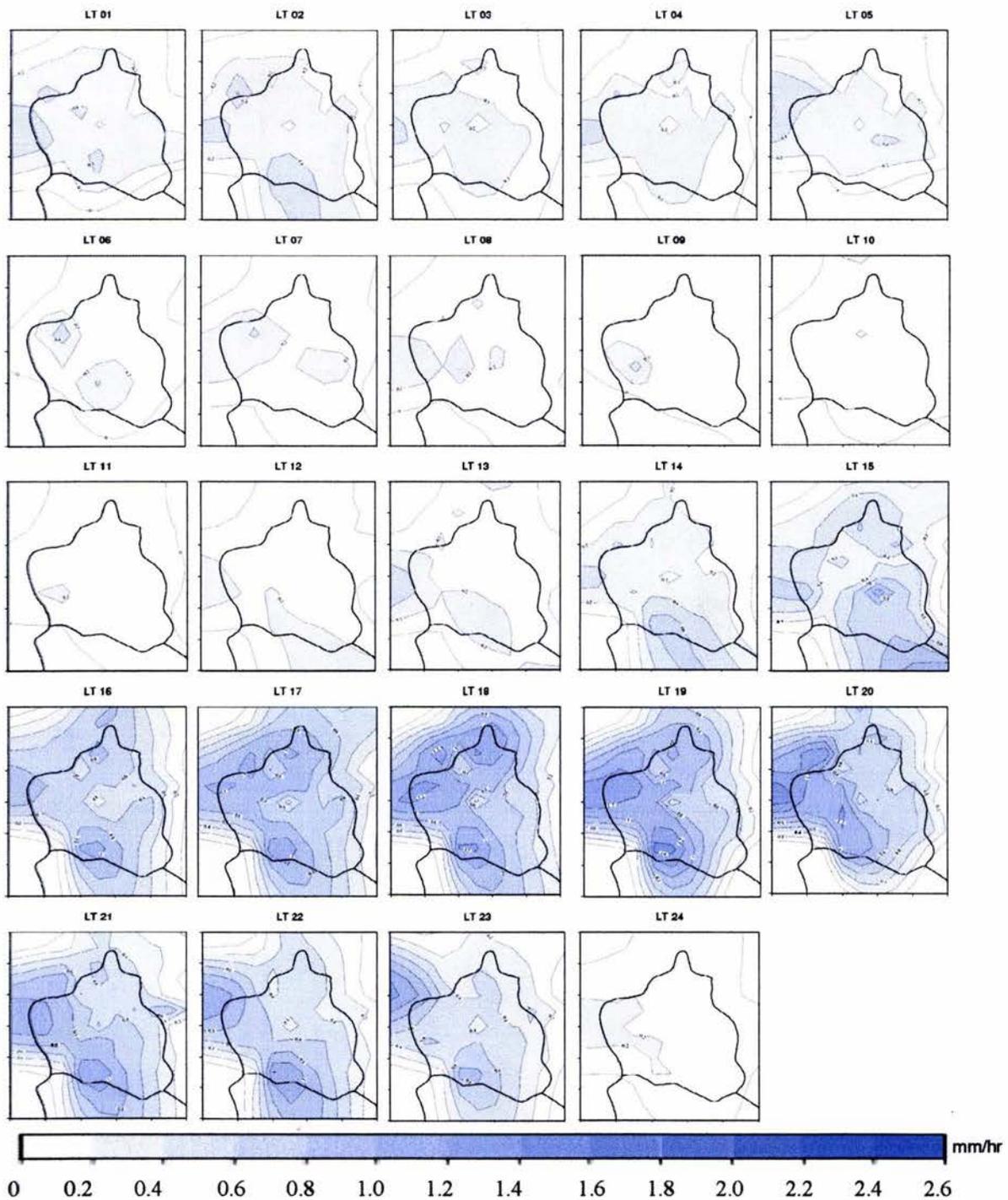


Fig. 23 Climatología de la cantidad promedio (mm) de precipitación horaria en el periodo mayo-octubre en la Cuenca de México con datos de la DGCCH. Periodo (1993-2002).

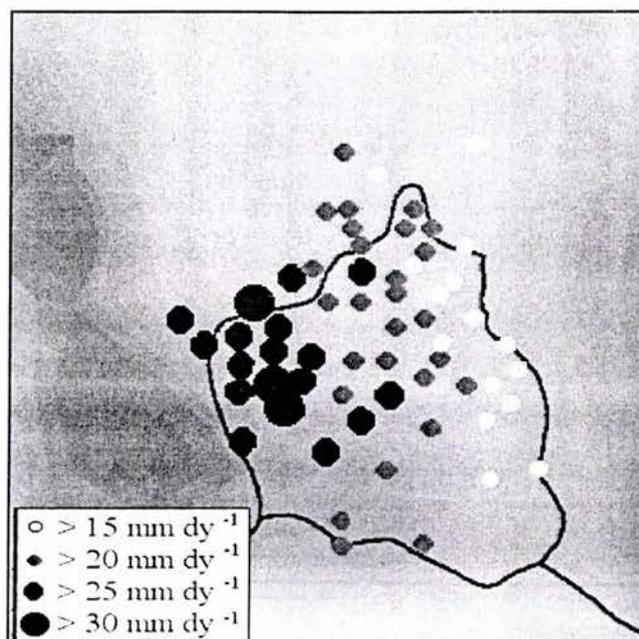


Fig. 24 Valores de precipitación que determinan un evento extremo (Tomada de Magaña et al, 2001).

Con base en registros para el periodo 1993-2002, se puede decir que en promedio, cada verano ocurren alrededor de 30 eventos extremos de lluvia en la Ciudad (Tabla 1). Sin embargo, aún en años considerados como secos (por ejemplo 1997), los eventos de lluvias intensos ocurren, por lo que la predicción de este tipo de eventos resulta relevante en actividades relacionadas con la protección civil. Por ello, cada vez es más necesario que se cuente con la generación de información de pronóstico que pueda ser utilizada con fines de prevención en la Ciudad de México pues, si se considera que muchos eventos de precipitación extrema son puntuales, en un verano pueden ocurrir más de veinte.

Tabla 1 Número de eventos de precipitación extrema en 5 estaciones sobre le Distrito Federal

Estacion/Año	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Promedio
03- Lindavista (N)	10	5	8	6	5	5	3	7	5	8	6
22- La Venta (W)	4	8	11	5	5	7	8	8	8	8	7
31- Santa Catarina (E)	5	6	6	2	5	5	4	6	4	3	5
39- Caseta Forestal (S)	12	6	9	2	3	6	6	5	4	7	6
27- Xotepingo (C.)	3	8	6	6	5	5	4	8	5	5	6
Total	34	33	40	21	23	28	25	34	26	31	30

Capítulo IV

Resultados del estudio

4.1 Los esquemas tradicionales de evaluación: rmse

4.1.1 Evaluación de la temperatura

En general, el MM5 es capaz de reproducir las condiciones diarias del tiempo meteorológico en forma cualitativa. Sin embargo, un análisis cuantitativo comienza a exhibir errores tanto sistemáticos como aleatorios.

En primer lugar, existe un error sistemático en las predicciones de temperatura máxima y mínima. La temperatura máxima pronosticada por el modelo ocurre en las horas en las que los resultados del modelo son almacenados. Como ejemplo del tipo de diferencias entre la temperatura observada y la simulada, podemos analizar el caso de las estaciones Merced, Tacuba y Tlalpan para los días 10 y 11 de julio del 2001 cuando se asimilan datos para condiciones iniciales (Fig. 25).

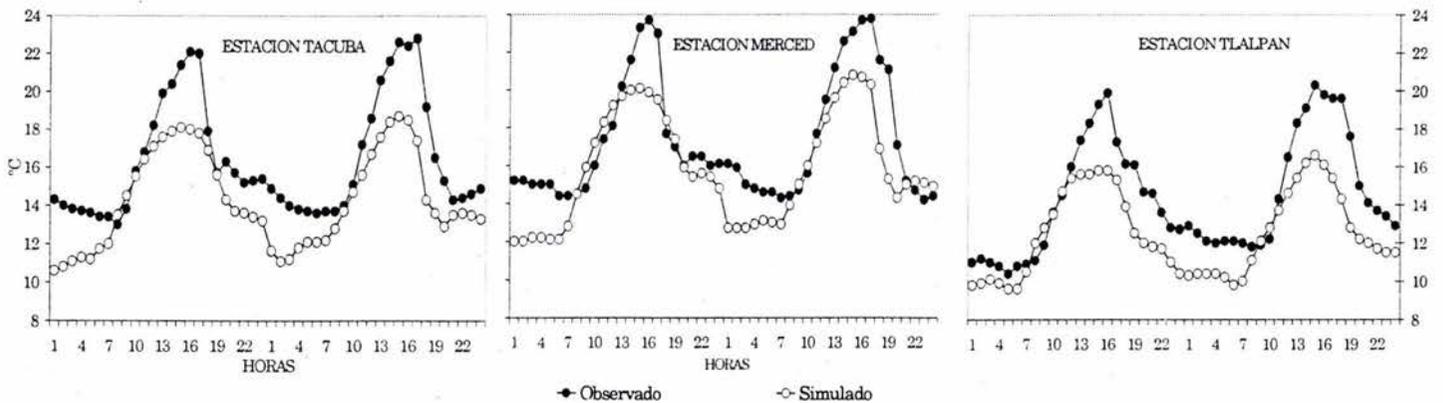


Fig. 25 Comportamiento de la temperatura el 10 y 11 de julio del 2001 en las estaciones Tacuba, Merced y Tlalpan.

El modelo muestra que al tiempo que ocurre la temperatura máxima, ésta coincide en general con la observada. Existe sin embargo, una subestimación de alrededor de 2° o 3° C en el valor pronosticado como temperatura máxima. Dicho error es sistemático en la mayoría de las estaciones. En este sentido, las temperaturas mínimas también son

subestimadas. Físicamente, las fallas en la parametrización de las nubes y la radiación resultan en errores tanto en temperaturas máximas como mínimas, ya que en estas latitudes y época del año, el balance radiativo es el principal modulador de la temperatura. El contenido de vapor de agua y la nubosidad son elementos esenciales en el balance radiativo, sin embargo, la nubosidad es uno de los elementos más difíciles de modelar.

La segunda fuente de error está asociada a las diferencias en la altura del punto bajo análisis. Los datos de la topografía que usa el modelo, al ser resultado de una interpolación a los puntos del dominio, están generalmente suavizados con respecto de la topografía real del lugar. Las alturas en el modelo en un punto correspondiente a una estación, sean mayores o menores en varias decenas de metros a las reales. Si se considera que por cada 100 metros existe un gradiente vertical de temperatura de aproximadamente 0.65°C (gradiente adiabático húmedo), los errores en altura de la topografía de varias decenas de metros se traducen en errores sistemáticos reflejados de la temperatura simulada. El rango de errores puede ir de 1 a 3°C sobre la mancha urbana, hasta casi 4°C alrededor de la misma (Fig. 26).

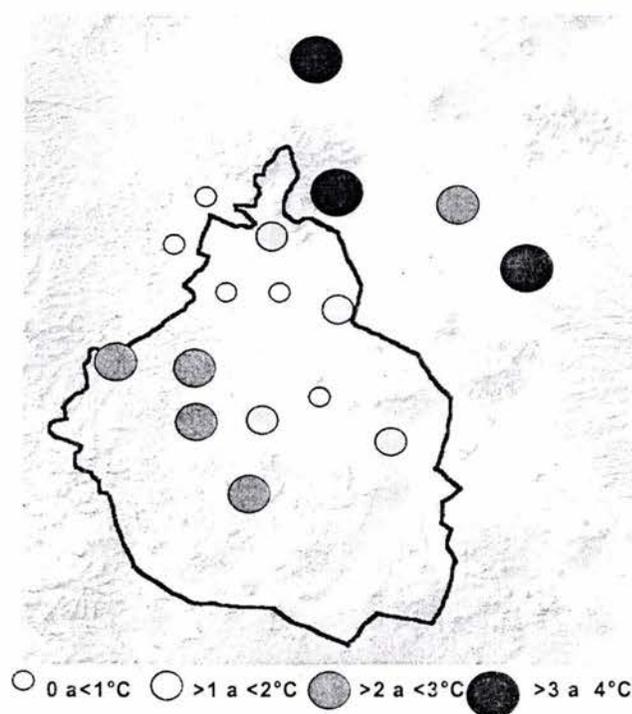


Fig. 26 Diferencias de temperaturas debido a diferencias de altura en los datos de topografía utilizados en el modelo de mesoescala MM5.

Una fuente de error sistemático adicional está asociada a la representación de uso de suelo que se utiliza en el modelo (Fig. 13 y 27). La base de datos que utiliza el MM5 para definir 13 categorías de uso de suelo no siempre corresponde con las características del sitio en donde se encuentra la estación meteorológica que reporta operativamente. De las categorías de uso de suelo descritas en el modelo en su versión 2, el área correspondiente al Distrito Federal está representada en su mayoría por terreno agrícola o para cultivo. En la actualidad la mayoría de las estaciones se encuentran rodeadas por asfalto y son afectadas principalmente por el efecto de la urbanización, lo cual resulta en una tendencia a mayores temperaturas observadas. Sin embargo, la baja resolución espacial de los datos de uso de suelo que utiliza el modelo generalmente indica presencia de vegetación, con lo que las temperaturas de superficie alcanzadas por el modelo son menores.

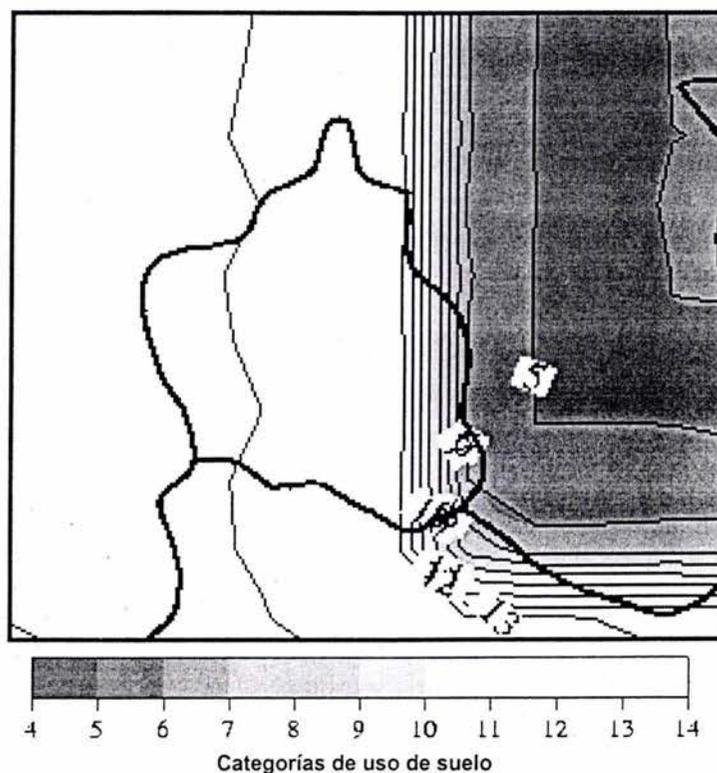


Fig. 27 Representación del uso de suelo en el Distrito Federal utilizado por el MM5 v2. la zona coloreada de blanco (13) corresponde a terreno agrícola o para cultivos.

Para los meses de verano, la amplitud de los errores en las temperaturas máximas (más que las temperaturas mínimas) tiende a incrementarse hacia los meses de septiembre y octubre (Fig. 28).

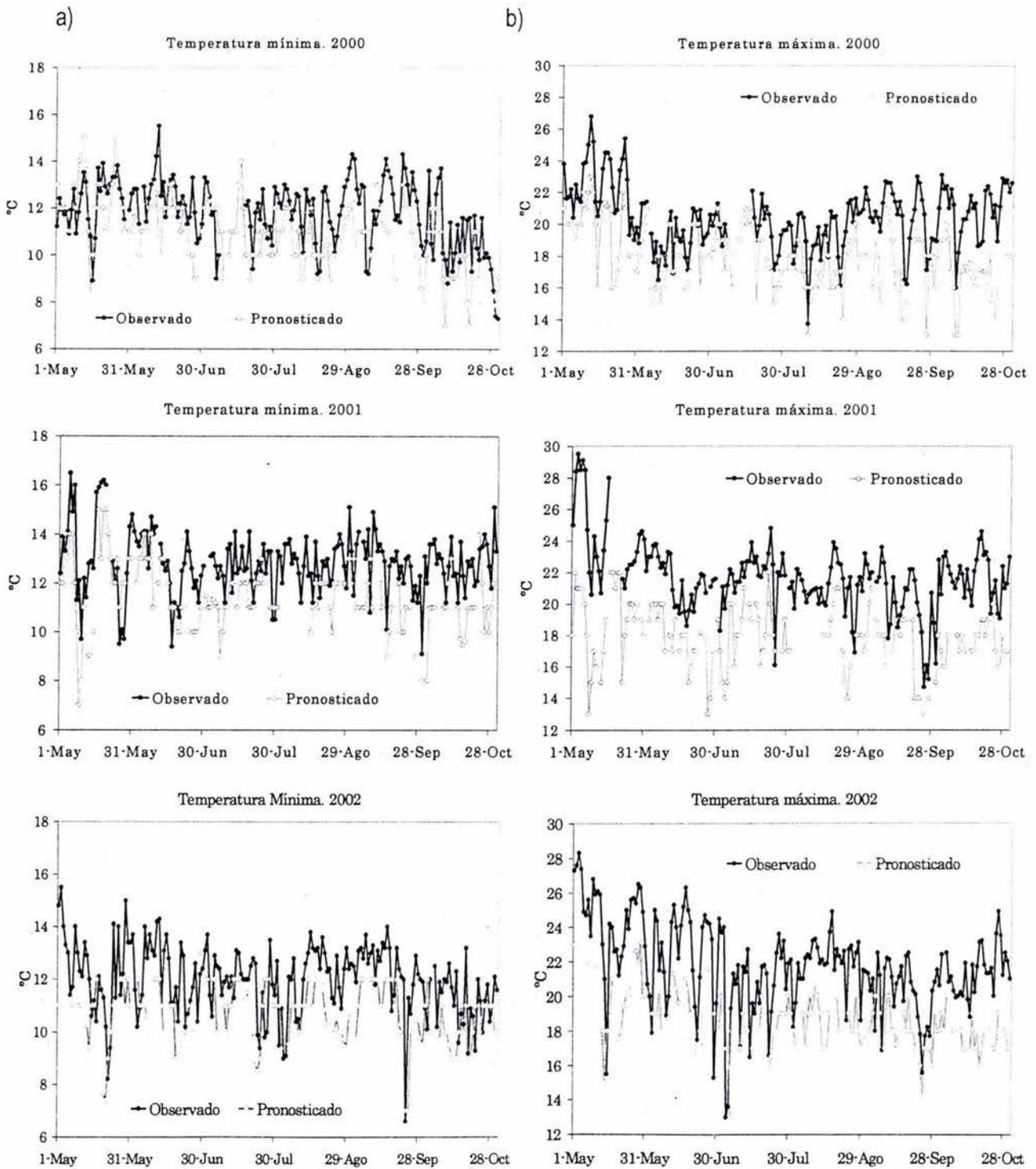


Fig. 28 Series de tiempo de simulaciones a 24 horas y valores observados de a) temperatura mínima, y b) temperatura máxima en el 2000, 2001 y 2002 en la estación Tacuba.

Se tiene la idea de que lo anterior puede estar asociado a la estimación realizada por el modelo sobre la cantidad de radiación global recibida en la superficie y la humedad existente en el suelo.

Considerando la representación del uso de suelo utilizada por el MM5 sobre el Distrito Federal como terreno agrícola, el escenario creado es que el suelo resulta ser mas eficiente en la retención de humedad debida a la lluvia. A su vez, al cambiar el albedo localmente, los valores de temperatura máxima predichos tienden a ser menores que los observados, pues la energía se utiliza en evaporar más que en calentar.

En promedio, el error en la estimación de temperatura máxima en los primeros 3 meses de la temporada de lluvias fluctúa entre los 3 y 4° C, llegando a ser de hasta 6°C en la segunda mitad de la temporada, mientras que el error en las temperaturas mínimas es sistemáticamente de 3°C.

Al comparar los años 2000 y 2001 respecto al 2002, las temperaturas continúan mostrando el mismo patrón. Sin embargo, el sesgo entre lo observado y lo simulado en el 2002 resulta ser más pequeño. Además, las simulaciones logran captar las fluctuaciones o cambios relativamente grandes de temperatura observada.

La reducción del sesgo entre lo observado y lo predicho se traduce en una mejora sustancial de los pronósticos de temperatura. En general, la mejora en las predicciones de temperatura mínima resultan ser más notorias alrededor de la Ciudad que en el centro y zona montañosa. Gran parte de la mejora es consecuencia de la asimilación de los datos de las estaciones de superficie situadas alrededor de la Ciudad, que permite una mejor representación de las condiciones iniciales. La simulación sólo con los datos globales no logra percibir los pequeños cambios locales en los campos de temperatura, por lo que se sobrepone un campo medio en todo el dominio. Lo anterior puede tener repercusiones en la percepción de circulaciones locales debidas a contrastes térmicos de temperaturas en el dominio.

Considerando la asimilación de datos en todo el dominio se puede decir que en general, dentro del periodo de verano y para las predicciones a 24 horas, los errores en la temperatura mínima sobre la Ciudad van de 2 a 2.6° C, y en la máxima de 2.4 a 4.2° C. Cuando la asimilación de datos no es considerada, los errores cometidos se incrementan alcanzando valores de 2.8 a 3.2° C en la temperatura mínima, y de 3 a 6° C en la máxima (Fig. 29).

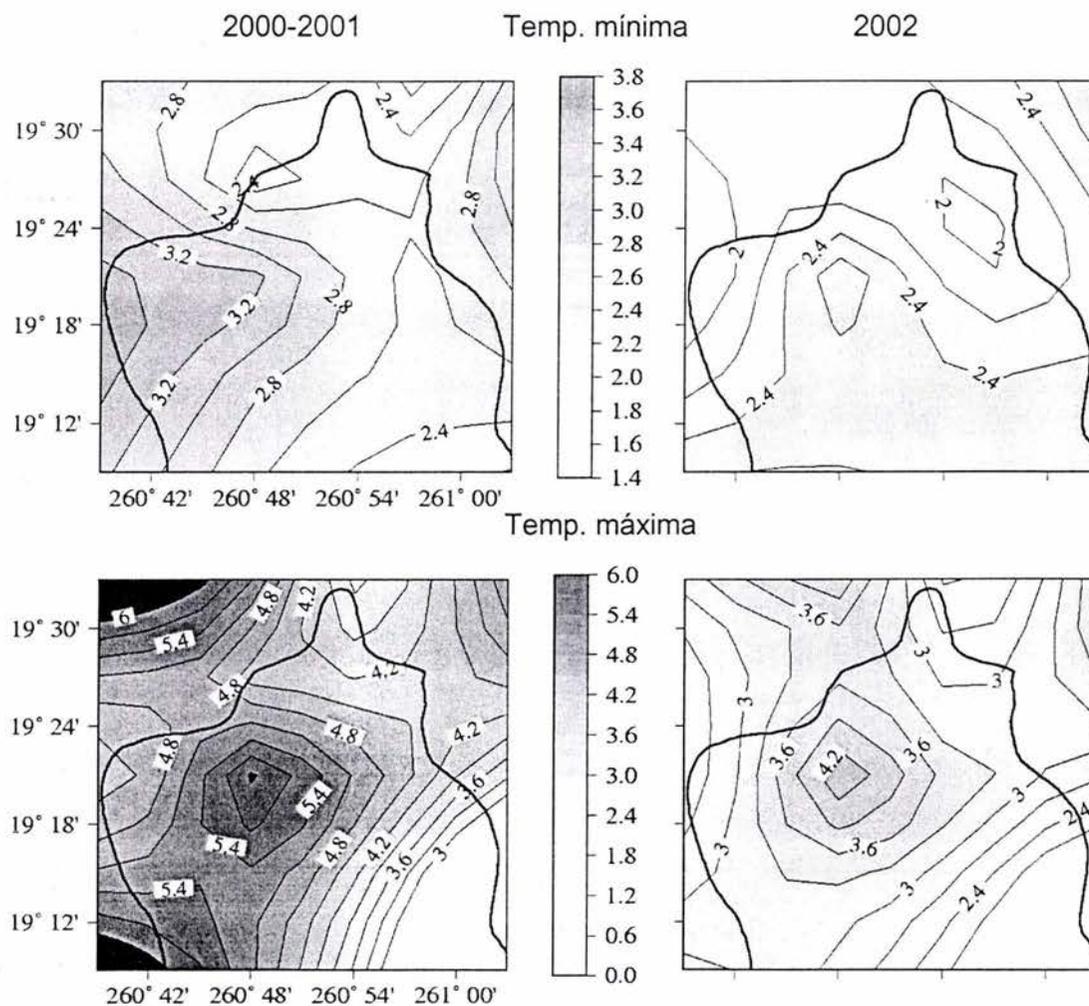


Fig. 29 rmsde las predicciones a 24 horas entre mayo y octubre respecto a lo observado de temperatura mínima (arriba) y temperatura máxima (abajo), y considerando la asimilación de datos de superficie (derecha).

Con la asimilación de datos, se corrige parte del error sistemático entre un 20 y 30% al mejorar la condición inicial. Mejoras más profundas requerirán de corregir tanto el uso de suelo como la topografía. Esto podría lograrse mediante un esquema de post-procesamiento del pronóstico numérico.

4.1.2 Evaluación de la precipitación

Es bien sabido que el parámetro más difícil de pronosticar es la lluvia. El trabajo operativo con el MM5 no está exento de limitaciones, aún cuando cuenta con las mejores y más modernas parametrizaciones de nubes.

Utilizando el *rmse* como una medida de evaluación de los errores en las simulaciones, se puede notar como primera característica que los errores son relativamente menores al inicio y final de la temporada de lluvias, aumentando a la mitad de la temporada por efecto de la ocurrencia de eventos intensos de lluvia, es decir, entre mayores sean las precipitaciones mayor será el *rmse*. La segunda característica está asociada a la distribución espacial de los errores donde existe un gradiente de este a oeste, reflejo de la fuerte componente orográfica de la lluvia en el Valle de México (Fig. 30).

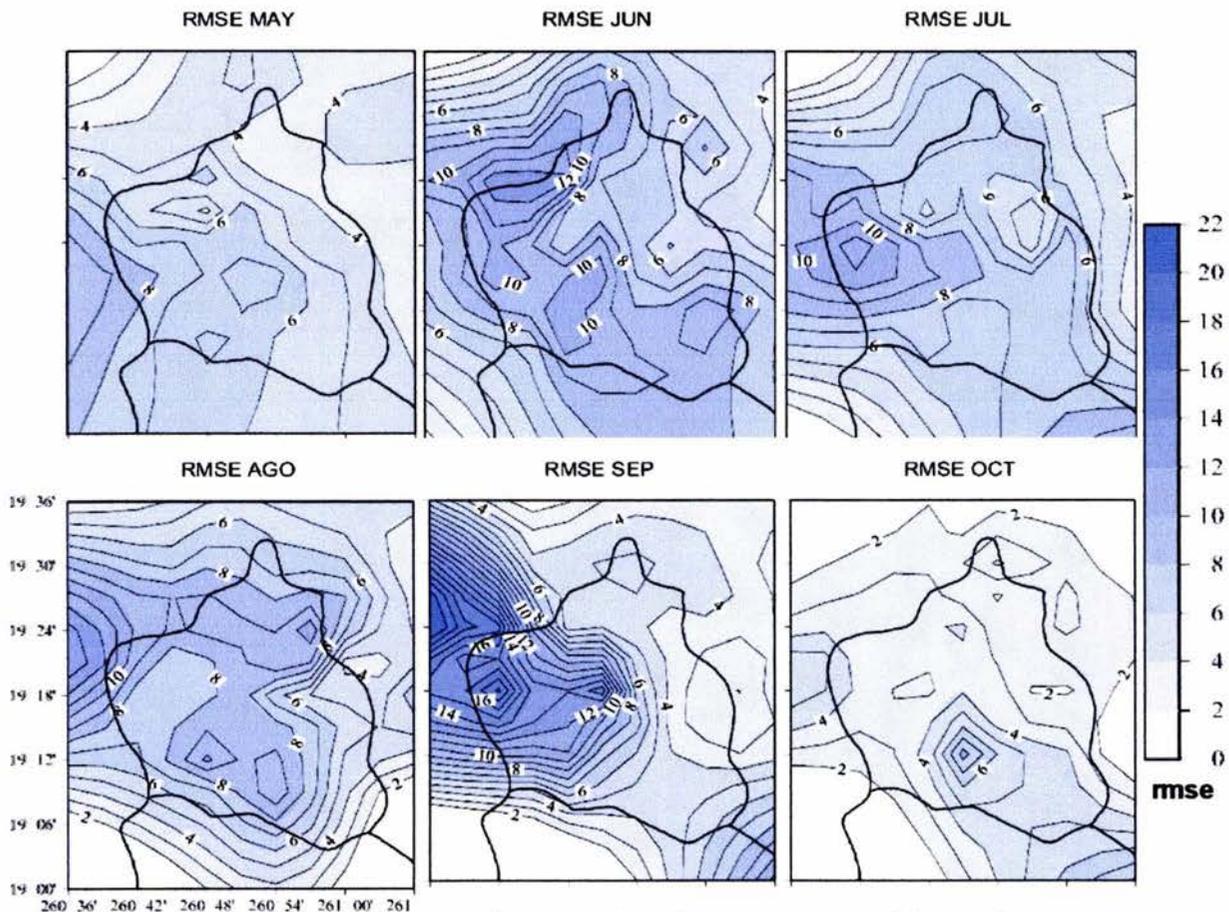


Fig. 30 Errores promedio mensuales de simulaciones a 24 horas de precipitación acumulada. Periodo: 2000-2002.

En general, la distribución de los errores tanto espacial como temporalmente tiene el mismo patrón en cualquier año, fluctuando incluso en los mismos rangos que en promedio van desde los 4 mm/hr o menos sobre la zona urbana hasta los 8 mm/hr o más sobre la zona montañosa del poniente de la Ciudad. Sin embargo, al considerar la asimilación de datos de superficie, el rango de fluctuación de los errores promedio sobre el dominio se reduce a valores de entre 5 a 8 mm/hr (Fig. 31).

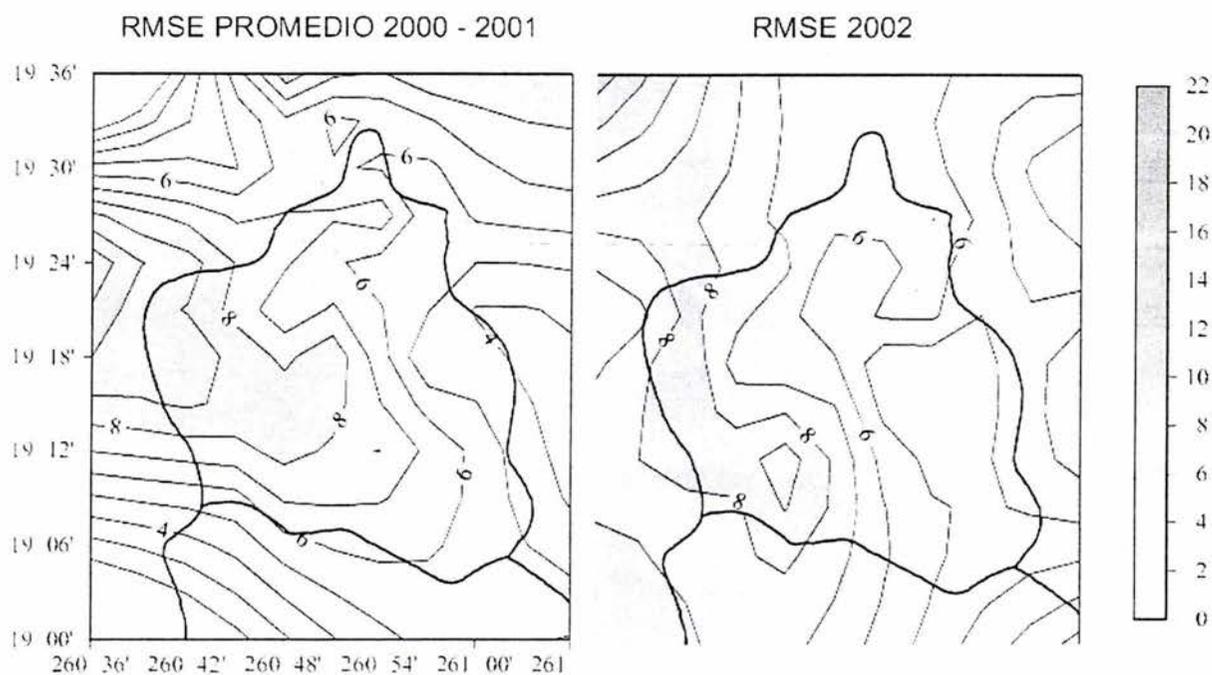


Fig. 31 RMSE promedio de las simulaciones de lluvia acumulada a 24 hrs. de mayo a octubre de 2000- 2001 y 2002.

Lo anterior representa en términos generales una mejora de entre el 10 y 30 % en las simulaciones de patrones de lluvia acumulada en 24 hr sobre una gran parte del dominio en análisis, aunque existen zonas donde no necesariamente el resultado es satisfactorio (Fig. 32).

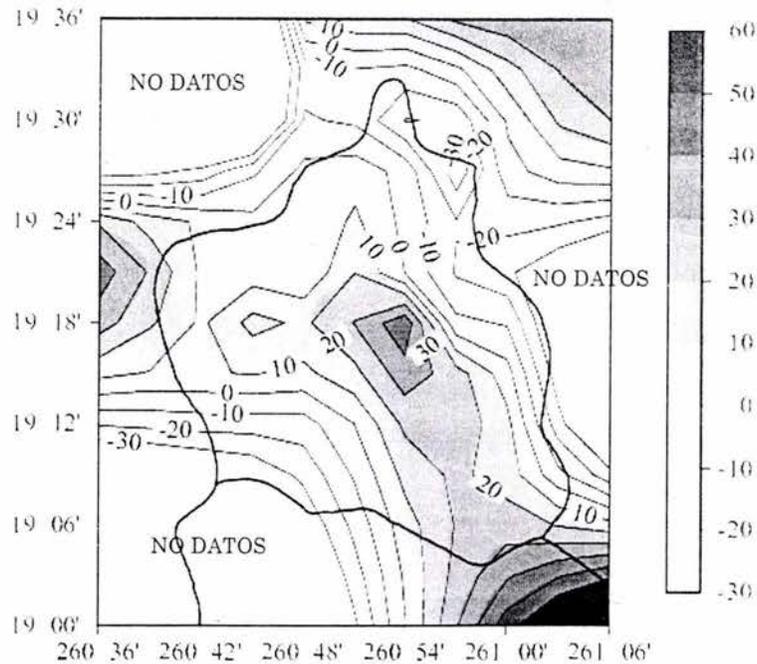


Fig. 32 Porcentaje de mejora respecto al RMSE de 2002 en comparación con el obtenido en 2000-2001.

4.1.3 El Método de 3 puntos

La interpolación a localidades específicas en el dominio permite definir de mejor forma aquellos sitios que pudieran verse afectados por eventos de precipitaciones intensas. Sin embargo, uno de los mayores retos a los que se enfrenta el MM5 bajo este esquema es el de que los valores predichos sean lo más parecidos a los reportados en el punto de análisis. Con el esquema de interpolación propuesto, es posible realizar un pronóstico puntual tal que se pueda evaluar contra el reporte observado. Este es el tipo de información útil para la toma de decisiones en protección civil.

Como caso particular, se analizan las evaluaciones para un punto localizado en Ciudad Universitaria (Fig. 33) en los meses de mayo y julio de 2001. Al considerar los valores para clasificar casos de lluvia intensa (ver Fig. 21, Cap. 3), se encuentra que para mayo no ocurre ningún evento extremo (Fig. 33a). Posteriormente, al ser evaluada la ocurrencia diaria de la lluvia con el criterio propuesto, se logra tener un estimado de la calificación máxima a

alcanzar. Como resultado, las simulaciones del MM5 pueden llegar a obtener 31 de los 40 puntos posibles, es decir, llegan a alcanzar hasta un 77 % de confianza en el pronóstico de lluvia acumulada. Lo anterior puede reflejar la eficacia del MM5 para simulaciones de lluvias sin presencia de eventos intensos.

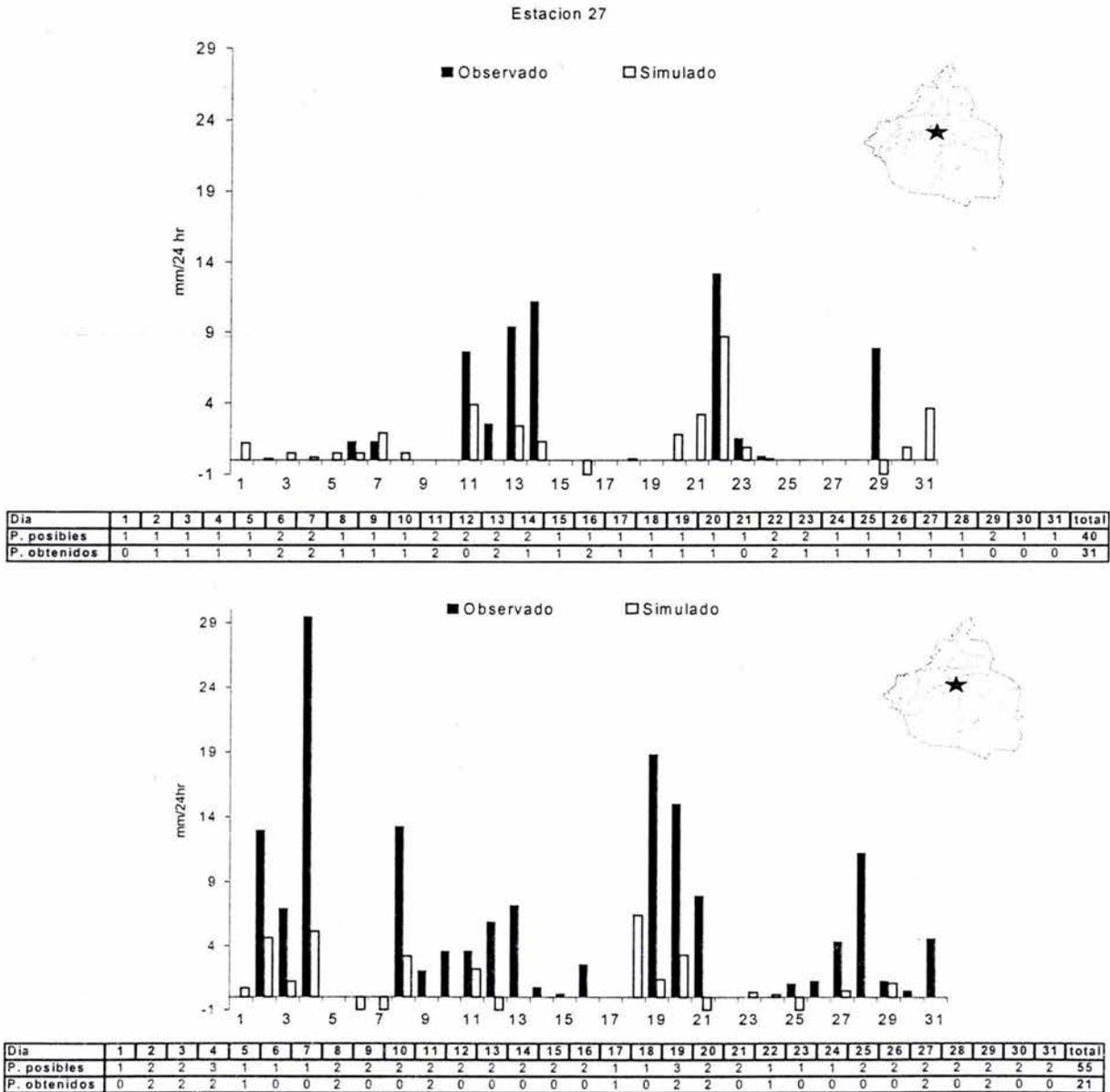


Fig. 33 Comparación de la lluvia acumulada en mayo (arriba) y julio (abajo) de 2001 en la estación 27 (Cd. Universitaria) de la DGCOH. Los datos negativos indican la inexistencia de simulación u observación.

Sin embargo, la situación es distinta conforme avanza la temporada de lluvias. En el mes julio (Fig. 33b), además del aumento en la cantidad de lluvia acumulada, se presentan más casos de lluvias intensas. Al considerar dos eventos de lluvia extrema (4 y 19,

respectivamente) y realizar la evaluación, el MM5 sólo puede alcanzar 21 de los 55 puntos posibles, representando poco menos del 40 % de confianza en las simulaciones. Lo anterior muestra que para las simulaciones del MM5, resulta difícil estimar no sólo la cantidad acumulada de lluvia, sino también la ocurrencia de un evento extremo de lluvia.

Bajo el criterio de “3 puntos” es notable que la confianza en la simulación de lluvia acumulada disminuye conforme la intensidad de las lluvias aumenta. El valor más alto de confianza en los meses de mayo y junio llega a ser de hasta un 50% o 70% en casi toda el área del Distrito Federal. Posteriormente, entre julio y septiembre, meses considerados como los más húmedos, la confianza disminuye a menos del 50% en general, principalmente en las zonas poniente, suroeste y sur (Fig. 34) donde la precipitación es mucho mayor que en otros sitios de la Ciudad por el efecto de la orografía.

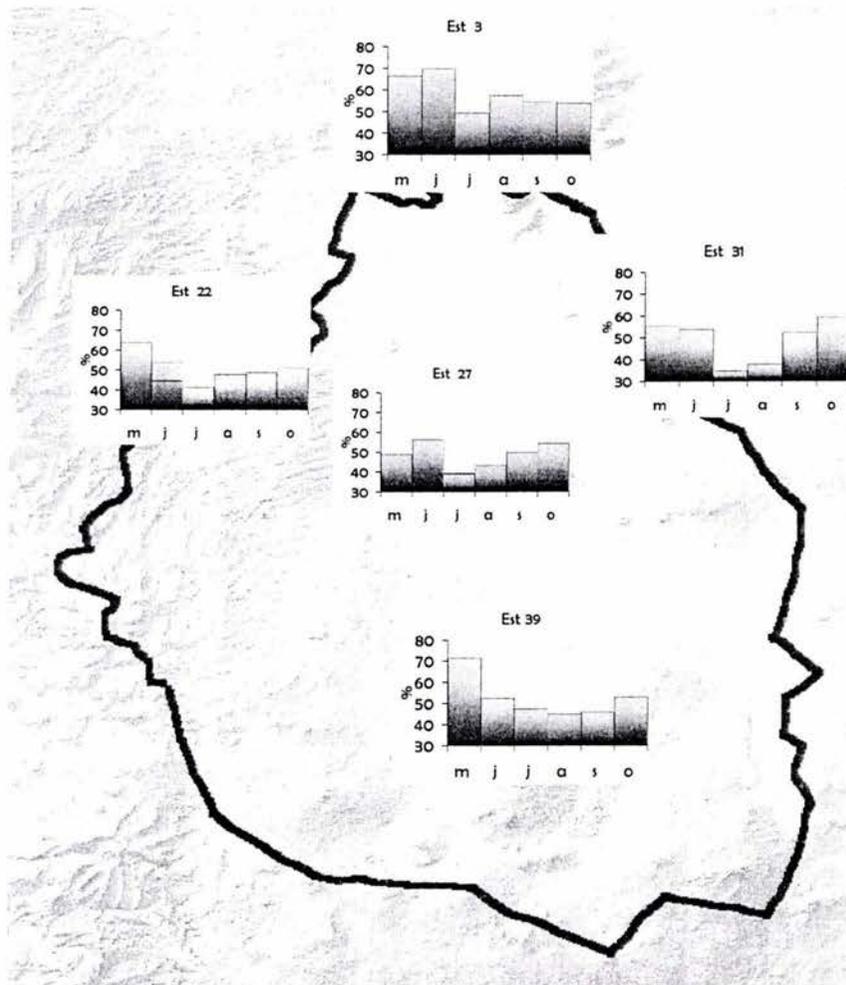


Fig. 34 Confianza (%) en las simulaciones de lluvia acumulada a 24 hrs. Periodo: mayo-octubre de 2000-2002.

Al considerar sólo el criterio de llueve-no llueve, y considerando la asimilación de datos en superficie y radiosondeos, la confianza aumenta casi un 10% para las estaciones centro, norte y oriente, y alrededor del 15 % en las restantes, alcanzando una confianza promedio entre el 40 y 65% durante todo el periodo de lluvias.

4.1.4 Casos particulares de lluvia extrema

Si bien la confianza es considerablemente baja en las simulaciones puntuales del MM5, en términos de simulaciones de patrones de precipitación acumulada en 24 horas sobre el dominio del Distrito Federal resulta ser más confiable y con mayor utilidad para áreas específicas como protección civil.

Por el impacto que las lluvias provocaron, como ejemplo de lo anterior, se considera aquí dos eventos de lluvia intensa (Fig. 35). El primero ocurrido el 27 de junio de 2002 sobre el oriente de la Ciudad con poco más de 100 mm en tan sólo 4 horas, rebasó los registros históricos de los últimos 20 años en la Ciudad, y creó un severo problema de sobresaturación en el sistema de drenaje¹. El segundo caso, ocurrido 10 de septiembre 2003 resultó ser uno de los eventos de lluvias con más afectación en la temporada. Tan sólo para el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, este evento junto con otros dos más ocurridos en otras fechas de septiembre representó alrededor de 19 horas de retrasos en vuelos y afectación a poco más de 89,000 mil pasajeros y más de 850 vuelos².

Con respecto a las simulaciones de lluvia del MM5 las cuales consideran la asimilación de datos en superficie, en ambos casos resulta visible la incapacidad para reproducir la cantidad de lluvia (aún con un margen de error) sobre la Ciudad. Sin embargo, es de destacarse la buena aproximación del patrón de lluvia simulado respecto del observado, y más aún cuando el evento de lluvia no es forzado por la componente orográfica (Fig. 35a). Si bien la simulación no resulta ser del todo precisa, la información que se obtiene es de gran relevancia para sectores encargados de la seguridad civil.

¹ *Reporte preeliminar de la Dirección General de Protección Civil, GDF, 2002.*

² *Reporte preeliminar de la Comandancia General del Aeropuerto Internacional de la Cd. de México, 2002*

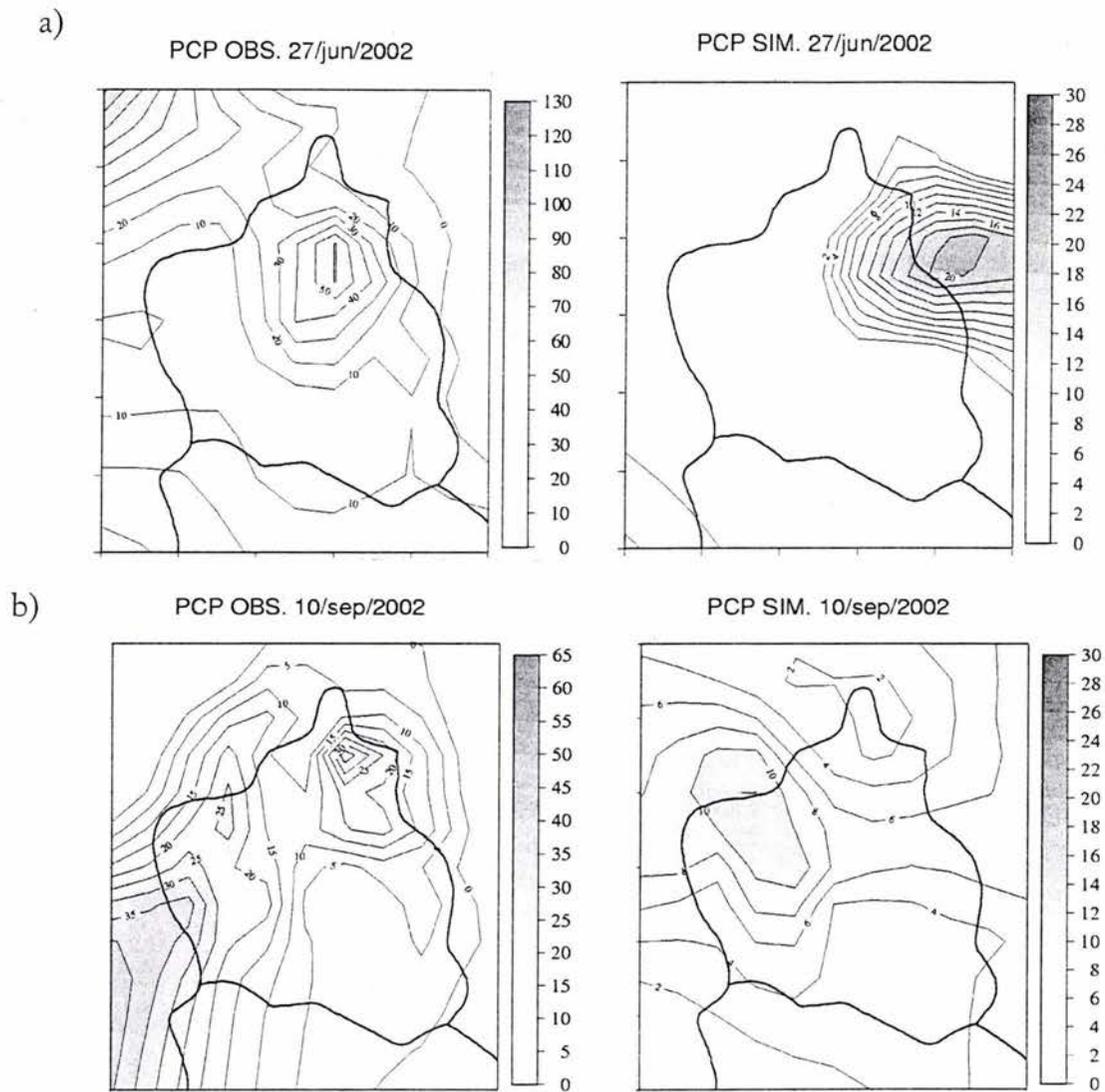


Fig. 35 Eventos de lluvia intensa observado (izquierda) y simulados (derecha) en el Distrito Federal para a) el 27 de junio y b) el 10 de septiembre de 2002.

Gran parte de la mejora que se puede obtener en las simulaciones del MM5 es en el proceso de la asimilación de datos de superficie y de altura. Al sólo ser considerados los datos del modelo AVN como condiciones inicial y de frontera, la simulación de la lluvia acumulada tiende a ser subestimada (Fig. 36).

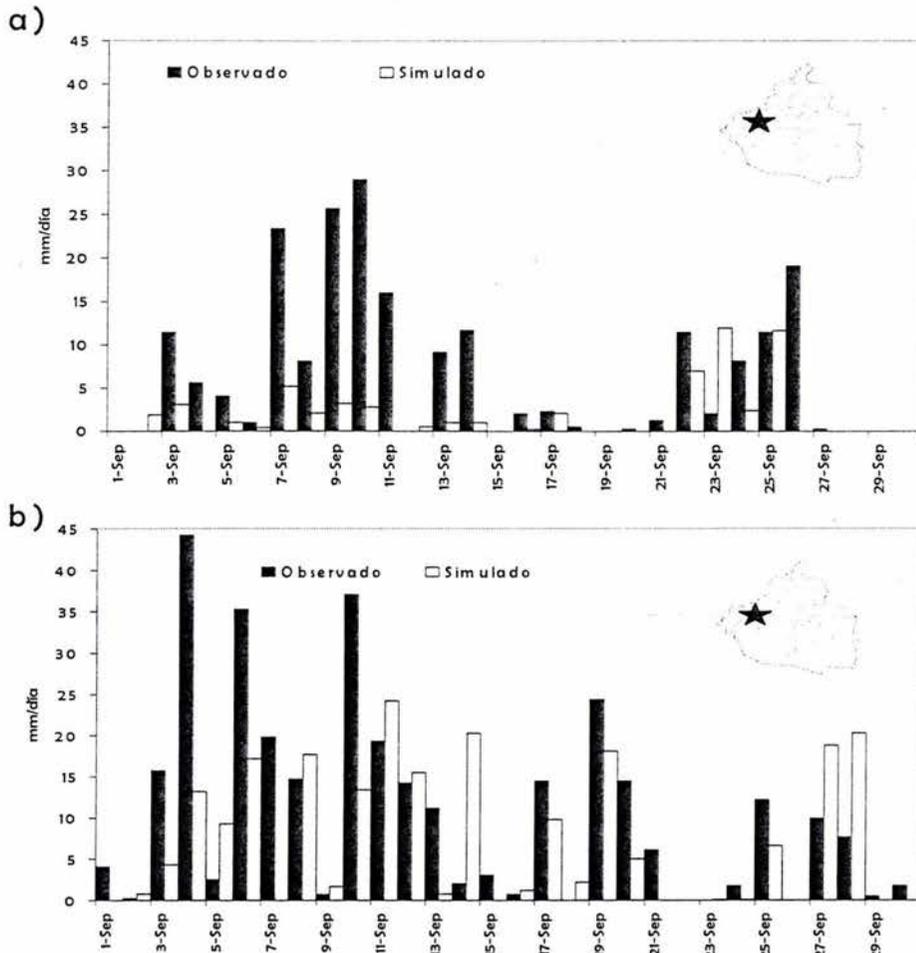


Fig. 36 Comparación entre lo observado y lo simulado de lluvia acumulada a 24 hrs. en septiembre. La figura a) corresponde al 2001 y b) al 2002 que considera la asimilación de datos.

Sin embargo, la asimilación de datos en superficie y de radiosondeos permite una mejora en las simulaciones del MM5, lo cual se aprecia analizando el mes de septiembre del 2001 y 2002, donde sólo en el segundo se consideró la asimilación de datos. Bajo el esquema de “3 puntos”, en el 2001, de los 54 puntos posibles se obtuvieron 31, es decir, la confianza del pronóstico alcanzó un 57%. Sin embargo, para el caso del 2002, se acertaron en 39 de 57 puntos totales, alcanzando el 68% de confianza en los pronósticos. Aunque en ambos casos no se logra captar con suficiente precisión (± 5 mm) la cantidad de lluvia de un evento extremo, el error cometido resulta ser menor que el cometido al no considerar la asimilación de datos (Fig. 36b). Algo a destacar es que mediante la utilización del modelo con fines operativos se pueden realizar pronósticos locales con una incertidumbre menor a los boletines con predicciones a 24 horas de las instancias de gobierno responsables.

4.1.5 Evaluación del viento

Uno de los elementos meteorológicos con gran variabilidad es el viento. Para el caso de la Ciudad de México, esta variable adquiere importancia por estar relacionada con la dispersión de contaminantes que afecta desde hace varios años a la salud de los pobladores.

El MM5, dentro de sus múltiples cualidades, puede generar productos de interés para estudios ambientales, como es el caso de los vientos en superficie en la Cuenca del Valle de México. Sus simulaciones permiten estimar las regiones donde la velocidad de los vientos es intensa y las regiones donde los vientos son débiles. Al igual que la precipitación y la temperatura, los valores puntuales de las variables meteorológicas también se pueden estimar. Se debe considerar que en sólo un par de kilómetros, como es el caso de las estaciones Plateros y Tacuba de la RAMA, los vientos pueden variar casi en un orden de magnitud (Fig. 37). De hecho, el error asociado con la magnitud del viento es similar al mencionado en trabajos como los de Salas (2000) y Shafran et al. (2000) donde se encuentra que el error en la magnitud del viento está entre 2 y 6 m/s. La dirección del viento es en general mejor pronosticada y simulada. Uno de los aspectos que el MM5 reproduce con calidad es el ciclo diurno del viento. Por este efecto, en las tardes se crea una circulación anticiclónica sobre el oriente de la Ciudad que puede relacionarse con el inicio de las lluvias.

Por lo anterior, al comparar la simulación con las observaciones interpoladas a una malla de igual resolución espacial a la del MM5, se puede concluir que el modelo es capaz de pronosticar las regiones donde se producirán vientos intensos.

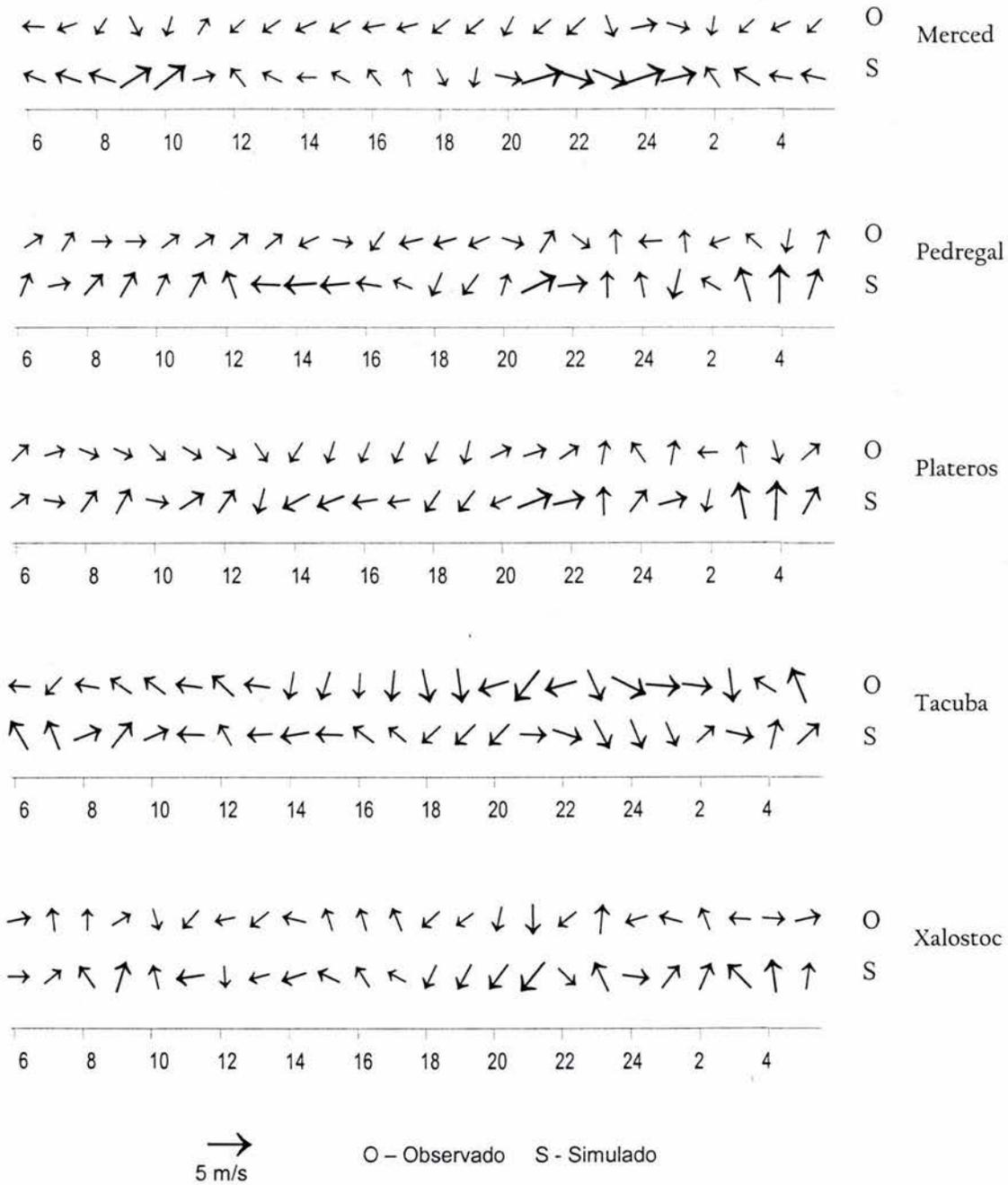


Fig. 37 Simulaciones horarias del viento en superficie, en puntos donde se encuentran estaciones de la RAMA para el 5 de septiembre de 2002.

Una buena base de datos de topografía y de uso de suelo permite que el modelo MM5 sea capaz de reproducir la dirección del viento y las variaciones que éste experimenta a lo largo del día. Los resultados que se obtienen del modelo son cercanos a lo observado cuando la resolución del modelo aumenta. Tal condición se puede alcanzar utilizando mallas anidadas con alta resolución espacial. En experimentos de alta resolución con MM5

(10 km) el modelo simula adecuadamente la dirección de los vientos y su variación diurna. Tal es el caso de simulaciones para el Valle de México, comparadas con reportes de viento de la RAMA vistas en la Fig. 37.

Existe un error sistemático en las magnitudes de viento que puede ser corregido utilizando un procedimiento de post-procesamiento de salidas del modelo y datos de viento. Así, la comparación preliminar utilizando nuevamente los reportes de la RAMA o de los observatorios del SMN permite llegar a ecuaciones de regresión para corregir errores sistemáticos en magnitud.

Mejores simulaciones en los campos permitirán construir modelos de pronósticos de calidad del aire. Por ejemplo, Jazcilevich et al. (2002) ha venido trabajando en el acoplamiento del MM5 a un modelo de emisiones y de calidad del aire para la Ciudad de México que permita obtener pronósticos a 24 y 48 horas. Si esta información se emplea en los programas de gestión ambiental, se podrían reducir las contingencias ambientales.

4.2 Máxima resolución espacial

Los resultados mostrados anteriormente parecerían indicar que a mayor resolución espacial mejores pronósticos. Este no es el caso, pues las parametrizaciones en los modelos numéricos limitan en gran medida la máxima resolución espacial que se pueda utilizar en el modelo.

Uno de los propósitos de este trabajo es estimar que configuración simula de mejor manera los patrones atmosféricos observados. Al analizar la simulación de la precipitación de forma puntual, se encuentra que el error cometido es proporcional a la resolución utilizada en el dominio. En términos generales y considerando que no necesariamente las simulaciones reproducen de forma precisa la cantidad de la lluvia acumulada, la más pequeña de las resoluciones es la que logra captar de mejor forma las características de la lluvia (Fig. 38).

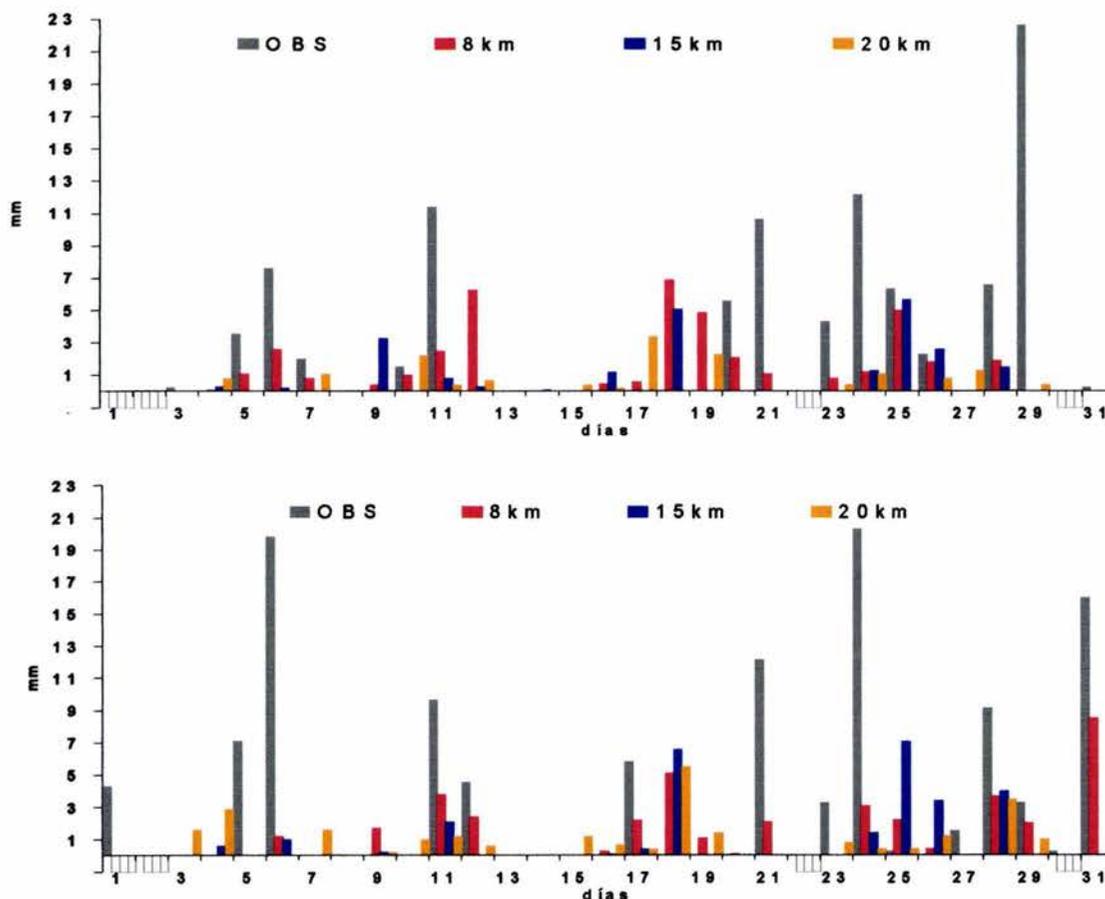


Fig. 38 Comparación entre las predicciones a 24 horas de precipitación acumulada y lo observado en julio de 2000 en las estaciones 3 (a) y 39 (b) (en el sur y norte de la Ciudad, respectivamente) de la DGCOH.

Debido al comportamiento no uniforme de la precipitación, al realizar la comparación entre las configuraciones utilizadas en todo el dominio del Valle de México, se puede observar que los errores cometidos se distribuyen de forma semejante para todos los valores de resolución utilizadas. Además, los valores de los errores aumentan del oriente al poniente de la ciudad, tal y como se distribuye la precipitación acumulada en la Ciudad debido al efecto orográfico. Sin embargo, aunque el patrón espacial de errores se mantiene, sobre la parte urbana de la Ciudad estos son menores con una resolución de 8 km con respecto de las demás (Fig. 39).

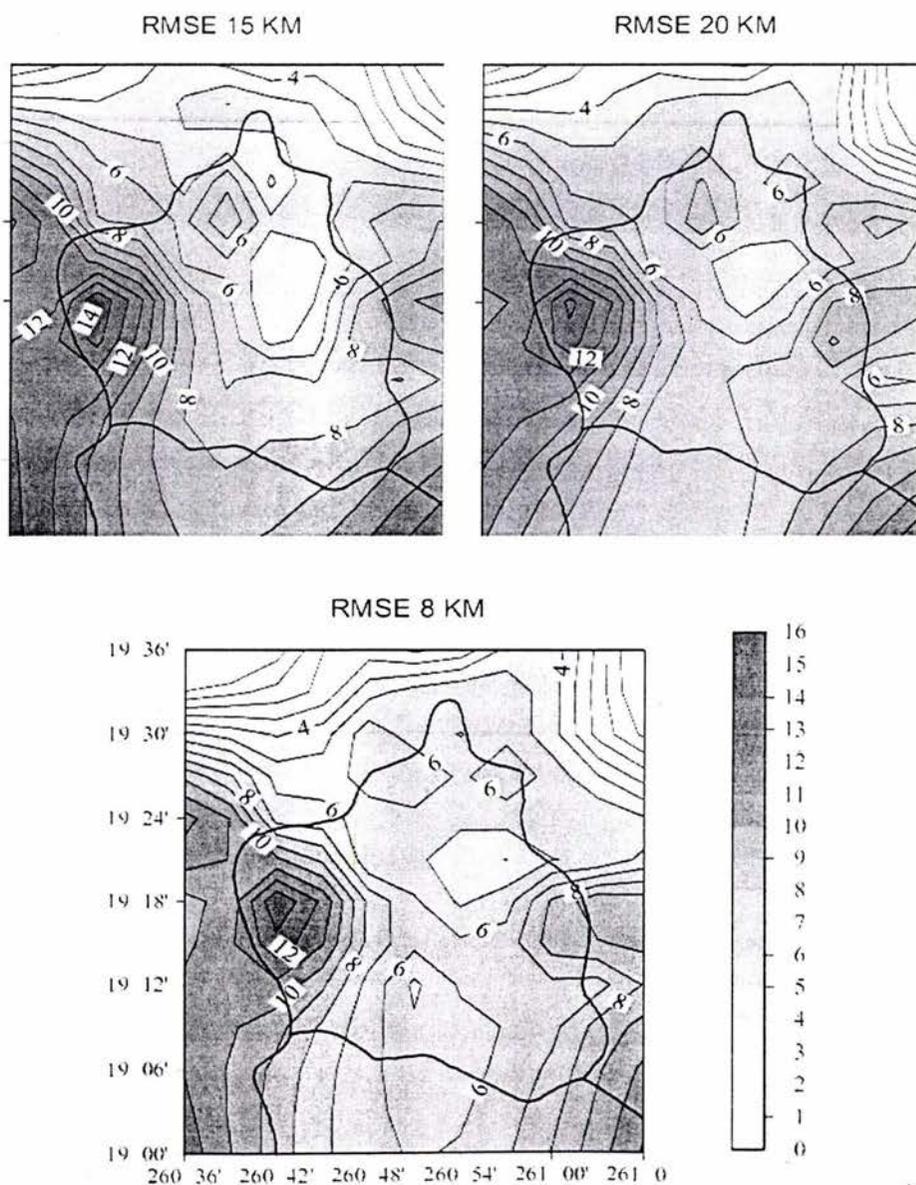


Fig. 39 RMSE de precipitación acumulada a 24 hrs. a 8, 15 y 20 km. respecto a lo observado en junio-agosto de 2000.

4.3 La importancia de la asimilación de los datos en el pronóstico de lluvias

El problema del pronóstico numérico del tiempo es un problema de condiciones iniciales, por lo que pronosticar lluvia con detalle en tiempo y espacio resulta complicado. Para solucionarlo se requiere de mejores parametrizaciones. Si se intenta llevar el problema a resolver explícitamente las nubes, se necesitará un mayor entendimiento de su microfísica. Esto requerirá de que, además de la asimilación de datos en la condición inicial construidos con una densa red de estaciones de superficie, también se cuente con mayor detalle en altura.

Los errores cometidos en las condiciones iniciales de las variables atmosféricas tienen un impacto directo en la cantidad de precipitación. Por ejemplo, errores en la cantidad de humedad pueden resultar en una menor precipitación que la observada. Generalmente, las condiciones iniciales que se utilizan en el pronóstico corresponden a los análisis de escala sinóptica que se elaboran en el *NCEP*. Estos análisis tienen una resolución espacial de $1 \times 1^\circ$ (100 km) en el mejor de los casos, y con frecuencia no incluyen los reportes de radiosondeo de México.

Los análisis de alta resolución (24 km) que el modelo requiere con frecuencia son demasiado suaves y no reflejan lo reportado por la estación de radiosondeo o de superficie. Así, la estabilidad de la atmósfera en una cierta región puede ser menor a lo que en realidad es si sólo se utilizan las condiciones iniciales del modelo de la Aviación *NCEP*. Tal error puede deberse a menor humedad en la columna atmosférica o a un gradiente vertical de la temperatura que no sea el observado, que influyen no sólo en la cantidad de agua precipitable, sino en la estabilidad misma de la atmósfera y por lo tanto en la precipitación que se registra en un sitio.

Capítulo V

Conclusiones del trabajo de estudio

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se evaluaron de forma objetiva los pronósticos numéricos a 24 horas de variables meteorológicas en superficie como: temperatura, viento y precipitación, sobre la Cuenca de México. El periodo de análisis comprendió los veranos (mayo-octubre) de 2000, 2001 y 2002, teniendo como finalidad evaluar la resolución espacial máxima a utilizar en pronóstico numérico, así como la de conocer los errores sistemáticos de dichos pronósticos. Para ello, se utilizó el modelo de mesoescala MM5, el cual es de dominio público y es uno de los modelos de mesoescala más completos. El MM5 se utilizó con un esquema de la asimilación de datos de superficie y altura a partir del 2002. Después de haber analizado las salidas del modelo mediante diversos métodos estadísticos propuestos en este trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones.:

- **Resolución espacial máxima a utilizar.** El error cometido en las simulaciones se reduce al aumentar la resolución espacial en el dominio. Sin embargo, aumentar resolución espacial por debajo de 8 km violaría los principios sobre los que se construyen las parametrizaciones, y se requiere simular algunos procesos explícitamente (nubes, capa límite, etc.), por lo que la resolución máxima que puede reproducir adecuadamente los procesos físicos a escala local es de 8 km. Cabe señalar que para fines de pronósticos operativos, uno de los aspectos a considerar es el ahorro de tiempo de procesamiento, por lo que una configuración de 10 km. puede cubrir las expectativas en el uso de la información meteorológica en el Valle de México.
- **Evaluación de pronósticos de precipitación.** Las simulaciones llegan a reproducir entre un 40% y un 70% la ocurrencia de un evento de lluvia. Incluso, la estructura de los patrones de lluvia captan con buena aproximación la circulación en superficie. Sin embargo, los pronósticos presentan limitaciones en cuanto a la

predicción de la cantidad de lluvia, específicamente cuando se trata de un evento de precipitación extrema, reduciéndose la confianza a tan sólo un 20% o 40% de acierto. Lo anterior puede estar asociado a las limitaciones en las parametrizaciones de nubes y a las condiciones iniciales. Para la corrección del primer punto se requerirá de mayor entendimiento en la microfísica de nubes, la cual posteriormente permitirá una mejor representación de los procesos convectivos y su asimilación numérica a escalas menores. En el segundo, se necesitará la incorporación sistemática de datos de estaciones de superficie y altura, de una red relativamente densa.

A pesar de las limitaciones relacionadas con errores inherentes al modelo, los productos del MM5 funcionan como una herramienta de pronóstico del tiempo al poder determinar la ocurrencia de lluvia o no lluvia. Para complementar el uso de un modelo numérico de pronóstico del tiempo y convertirlo en algo útil en materia de protección civil, se pueden utilizar herramientas adicionales como el radar y con ello, diseñar planes de prevención y alerta temprana ante lluvias intensas, ya que el problema de inundaciones no sólo se reduce al manejo oportuno de la información meteorológica, sino también a condiciones adecuadas en el sistema de drenaje, asentamientos irregulares y basura, puntos que llegan a cobrar más peso que la información meteorológica.

- Sobre la evaluación de la temperatura. La temperatura es la variable que mejor reproduce el MM5. Los patrones de temperatura simulados en superficie sobre el Valle de México reproducen los cambios diurnos con gran acierto, mostrando errores de entre 1 y 2° C en temperaturas mínimas y de 2 a 4° C en máximas. En comparación con la precipitación, los errores cometidos en la temperatura resultan más fáciles de identificar y corregir, pues están asociados principalmente a diferencias de altura asociada a la resolución espacial del modelo y a las características del uso de suelo del modelo.
- Sobre la evaluación del viento. El modelo es capaz de reproducir en forma aproximada los patrones de viento en superficie sobre el Valle de México, llegando a

simular los cambios locales, relativamente pequeños, asociados a la compleja topografía del centro de México. En cuanto a la magnitud del viento, la sobreestimación de las simulaciones va de 2 a 6 m/s. Sin embargo, el error cometido puede ser corregido mediante un esquema estadístico como MOS (Model Output Statistics, por sus siglas en inglés). La intensidad y la dirección del viento en MM5 son bastante sensibles a la condición de uso de suelo. En ese sentido, se requerirá un análisis de capa límite para corregir los errores sistemáticos.

Para la temperatura y el viento, parte de los errores pueden ser corregidos mediante ajuste estadístico de las diferencias de altura, así como una mejora en la representación de orografía y uso de suelo del dominio. Este último permitirá reproducir de mejor forma las circulaciones locales.

- Sobre la asimilación de datos. Gran parte de la mejora en las simulaciones de las variables meteorológicas analizadas es consecuencia de la asimilación de los datos de las estaciones de superficie y altura situadas alrededor de la Ciudad, que permite una mejor representación de la condición inicial. Así, mientras mayor sea el área instrumentada en la región de interés, mejor será la representación de los campos iniciales. En el caso de la Ciudad de México, la asimilación de las estaciones de la RAMA y del sondeo realizado en el observatorio de Tacubaya son suficientes para cumplir con las condiciones requeridas. Sin esta consideración, el MM5 genera la condición inicial sólo con datos globales, y por ello, no es capaz de percibir los pequeños cambios atmosféricos locales; así, su uso perderá relevancia, reduciéndose el modelo prácticamente a un esquema de interpolación sofisticado.

La mejor forma de poder consolidar un esquema de pronóstico con un modelo numérico de mesoescala como MM5, deberá considerar:

- I. Asimilar la mayor cantidad de datos para generar la condición inicial.
- II. Estimar y corregir los errores sistemáticos de un dominio o localidad en particular.
- III. Utilizar una resolución de 8 o 10 km. para subdominios de regiones de interés específicas.

- IV. Actualizar y mejorar la base de datos de uso de suelo de la región de interés.
- V. Realizar evaluaciones sistemáticas operativas, tanto a nivel local como a nivel de patrones, con la finalidad de crear un sistema de post-procesamiento de las salidas del modelo.

Lo anterior permitirá una mejora en la calidad de los pronósticos numéricos del tiempo a corto plazo, llevando mayor confianza en la información meteorológica a la hora de planear. Lo anterior cobra importancia en un esquema de este tipo, al ser utilizado por pronosticadores operativos capacitados de las diversas agencias nacionales.

La combinación de modelos de pronósticos del tiempo con esquemas de toma de decisiones por sector permitirá que se reduzcan en gran medida los impactos negativos que los fenómenos hidrometeorológicos tienen en la sociedad, como puede ser en el Valle de México.

REFERENCIAS

- Akima, H. (1978) A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting of irregularly distributed data points, *ACM Transactions of Mathematical Software*, Vol. 4, pp. 148-159.
- Blackadar, G. K., (1962). The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere, *Journal of Geophysics Research*, Vol. 67, pp. 3095-3102.
- Bushby, F. H., (1987) A History of Numerical Weather Prediction, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction (Special Volume of the Journal of the Meteorological Society of Japan), Editado por T. Matsuno, pp. 1-10.
- Corner, B. R., R. D., Palmer y M. F. Larsen, (1999). A new radiosonde system for profiling the lower troposphere. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*: Vol. 16, pp. 828-836.
- Cox, R., B. L. Bauer y T. Smith., (1998). A mesoscale model intercomparison. *Bulletin of the American Meteorological Society*: Vol. 79, pp. 265-283.
- Cressman, G. P., (1959). An operational objective analysis system, *Monthly Weather Review*, vol. 87, pp. 367-374.
- Charney, J.G., R. Fjortoft y J. Von Newman (1950). Numerical integration of the barotropic vorticity equation, *Tellus*, Vol. 2, pp. 237-254.
- Dudhia, J., D. Gill, Y. Guo, D. Hansen, K. Manning, y W. Wang, (1999). PSU/NCAR Mesoscale Modeling System, Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 2, with an introduction to Version 3).
- Fuentes, V., A. Jazcilevich, R. Aguirre, A. Wellens, J. Aysa y C. Rivera. (1993). Modelo Metropolitano de Gestión de la Calidad del Aire, *Reporte técnico*, Dirección de Ecología, Gob. Del Distrito Federal.
- García, R. J., (2002). Evaluación de Escenarios Utilizándole Modelo Regional de Calidad del Aire *Multiscale Climate Chemistry Model*, Tesis de doctorado, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica de la UNAM, México.
- Gilchrist, B., y Cressman, G. (1954). An experiment in objective analysis, *Tellus*, Vol. 6, pp. 309-318.
- Glahn, H. R., y D. A. Lowry, (1972). The use of model output statistics in objective weather forecasting, *Journal Applied of Meteor.*, Vol. 11, pp. 1203-1211.
- Grell, G. A., J. Dudhia y R. Stauffer, (1994). A Description of de Fifth-Generation Penn-State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR/TN-398+1a, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO., pp. 107.
- GDF, (2000). *La Ciudad de México hoy: Bases para un diagnóstico*, Cap. VII "Vulnerabilidad y deterioro ambiental de la Zona Metropolitana del Valle de México", Realizado por la Oficialía Mayor del Gobierno del Distrito Federal. pp 114-149. (Biblioteca de la Dir. Gen. de Prot. Civil)
- Hanna, R. y R. Yang. (2001). Evaluation of mesoscale models simulation of near-surface winds, temperature, gradients, and mixing depths. *Journal of Applied of Meteor.* Vol. 40, pp. 1095-1104.
- Haltiner, G.J., y R.T. Williams, (1979). *Numerical Prediction and Dinamic Meteorology*, Edit. Wiley, New York, E.U., pp. 477.

- Hernández G. R., (1999). Modelación Preliminar del Campo de Viento Alrededor de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana. 67 pag.,
- Jáuregui, E., (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. Revisión y perspectivas, *Boletín de Investigaciones Geográficas*, num. 31, Instituto de Geografía de la UNAM, México.
- Jáuregui, E., y E. Romales. (1996). The urban effects on convective precipitation in Mexico City, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, pag. 3383-3389.
- Jáuregui, E. (2000). El Clima de la Ciudad de México, Editado por el Instituto de Geografía de la UNAM y Plaza y Valdéz Editores, 131 pag.
- Jazcilevich, A., A. García, y G. Ruiz-Suárez, (2002). A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the region of Mexico. *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 183-193.
- Kain, J. y J. M. Fritsch, (1993). Convective parametrization for mesoscale model: The Kain-Fritsch scheme. The Presentation of Cumulus Convection in Numerical Models. *American Meteor. Soc.*, pp. 246.
- Kitade, T., K. Yanagino, N. Sato y M. Oozeki, (1987). On an Influence of Forecast-Analysis Cycle on the Forecast Performance, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction (Special Volume of the Journal of the Meteorological Society of Japan), Editado por T. Matsuno. pp. 347-257.
- Klein, W. H. (1971). Computer prediction of precipitation probability in the United States. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 10, pp. 903-915.
- Magaña, V., y J. Pérez-López, (1998). Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional en México, *Geounam, Boletín informativo de Ciencias de la Tierra*, vol. 5, pag. 33-39.
- Magaña, V., (2001) Los Impactos de El Niño en México, Publicado por la Secretaría de Gobernación, pag. 299.
- Magaña, V., J. Pérez-Fernández, , y J. Méndez-Pérez, (2002). Diagnostic and prognostic of extreme precipitation events in the México basin, *Geofísica Internacional*, Vol. 41, pp. 247-259.
- Maskey, A. (1989). El Manejo Popular de los Desastres Naturales, Intermediate Technology Development Group, Lima, Perú. (Disponible en Internet).
- OMM, (2002), Reducción de la vulnerabilidad a los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, *Reporte técnico-OMM*, No. 936, Ginebra., pp. 1-13.
- Ortíz, A., y O. Oropeza, (1992). Consideraciones críticas sobre la investigación geográfica de los desastres de origen natural, *Geografía y Desarrollo, Revista del Colegio de Geógrafos Posgraduados, A.C.*, año 4, vol. 3, pag. 2-8.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island, *Atmospheric Environmental*, Vol. 7, pp. 769-779.
- Panofsky, H. (1949). Objective weather map análisis. *Journal Applied of Meteorology*, Vol. 6, pp. 386-392.
- Pérez, L. J., (1997). Variabilidad Climática Regional en México, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Pérez, L. J., (2001). Variabilidad Climática Regional en el Altiplano Central de México, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica de la UNAM, México.

- Preisendorfer, R., R. Barnett, y P. Tim. (1983). Numerical model-reality intercomparison tests using small-sample statistics. *Journal of the Atmospheric Sciences*: Vol. 40, pp. 1884-1896.
- Reynolds, R., y T. Smith., (1994). Improved global sea surface using optimum interpolation. *Journal of Climate*, Vol. 7, pp. 929-948.
- Richardson, L. (1916). *Weather Prediction by Numerical Process* (Cambridge: Cambridge University Press).
- Rodríguez, D., (1999). Prevención de Desastres en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Tesis de doctorado, Posgrado en Sociología de la Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Salas, D. (2000). Experimentos Numéricos de Circulación Atmosférica en el Valle de México, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México.
- Shafran, P. C., N. L. Seaman, y G. A. Gayno, (2000). Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the lake michigan ozone study (LMOS), *Journal Applied of Meteor.*, vol. 39, pp. 412-426.
- Saucier, W. (1955), *Principles of Meteorological Analysis* (University of Chicago Press).
- Seaman, N. L., y S. A. Michelson, (2000). Mesoscale meteorological structure of a high-ozone episode during the 1995 NARSTON-Northeast study, *Journal Applied of Meteor.*, vol. 39, pp. 384-398.
- Stauffer, D., y N. L. Seaman, (1990). Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data, *Mon. Wea. Review*, Vol. 118, pp. 1250-1277.
- Stensrud, D., y J. A. Skindlov, (1996). Gridpoint prediction of high temperature from a mesoscale model, *Weather and Forecasting*, Vol. 11, pp. 103-110.
- Stern, W., R. Pierrehumbert, J. Sirutis, J. Ploshay y K. Miyakoda, (1986). Recent Development in the GFDL Extended-Range Forecasting System, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction (Special Volume of the Journal of the Meteorological Society of Japan), Editado por T. Matsuno, pp. 359- 363.
- Vázquez, A., J. (2000), Caracterización Objetiva de los Nortes del Golfo de México y su Variabilidad Interanual, *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias de Atmosféricas, Universidad Veracruzana.
- Velázquez, A., y C. Rosales, (1999), *Escudriñando en los Desastres a todas las Escalas*, libro publicado por el proyecto Desinventar <www.desinventar.org>, Edit. Feriva, Colombia.
- Warner, T. y R. Anthes, (1978). Numerical simulations with a three-dimensional mesoscale model. *Monthly Weather Review*: Vol. 106, pp. 1079-1099.
- White, B.G., J. Paegle, W.J. Steenburgh, J.H. Horel, R.T. Swanson, L.K. Cook, D.J. Onton y J.G. Miles, (1999). Short-term forecast validation of six models, *Weather and Forecasting*, Vol. 14, pp. 84-108.
- Wilks, D., (1995). *Statistical Methods in Atmospheric Sciences*, Chap. 7: Forecast Verification, Academic Press., pp. 233-283.
- Yong-Fu, Q., y Zhong, Z., (1987). General Forms of Dynamic Equations for Atmosphere in Numerical Models with Topography, Short and Medium Range Numerical Weather Prediction (Special Volume of the Journal of the Meteorological Society of Japan), Editado por T. Matsuno. pp. 743-756.