

# LA PREDICCIÓN NUMÉRICA DE TORMENTAS: DESAFÍOS, BENEFICIOS POTENCIALES Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS OPERATIVAS EN TIEMPO REAL

Por Kelvin K. DROEGEMEIER\*

## Introducción

Desde la época de las primeras experiencias en la predicción numérica del tiempo (PNT), llevadas a cabo al final de los años 40 por John von Neumann y sus colaboradores en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, EE.UU., los meteorólogos han llevado los modelos operativos a resoluciones más altas y a niveles de sofisticación científica y técnica cada vez mayores. Ahora, los modelos operativos de área limitada se ejecutan con tamaños de rejilla de 30 km, y dentro de pocos años serán posibles las resoluciones inferiores a los 10 km. El reto de predecir explícitamente, de manera operativa, la iniciación y evolución de tormentas aisladas con convección profunda y las invernales, se revela dentro de nuestro alcance gracias a que aumenta de continuo la potencia de los ordenadores, a que se dispone de nuevos sistemas de observación, tales como una densa red de radares Doppler en los EE.UU., y a las técnicas para recuperar cantidades de datos de los Doppler sencillos, que antes no se observaban.

La PNT operativa a escala de células tormentosas, aunque sea una meta con importancia social y económica, no será eficaz si no se toman en cuenta los importantes retos científicos y tecnológicos que conlleva. Aquí describo algunos de estos desafíos y presento los resultados de muchos años de pruebas operativas en tiempo real llevadas a cabo en la Universidad de Oklahoma, en colaboración con el National Weather Service y con otros grupos. Estos resultados sugieren que la atmósfera, en verdad, parece poseer, en muchos casos, una posibilidad de predicción considerable hasta la escala de tormentas aisladas.

## Retos científicos y técnicos

### *La predecibilidad fundamental de los flujos a*

### *pequeña escala*

Siempre existirá algún error en el estado inicial de un modelo de predicción numérica del tiempo debido a la imposibilidad de observar continuamente todas las variables atmosféricas a todas las escalas del movimiento. Incluso si el modelo es perfecto y los recursos de cálculo numérico son ilimitados, estos errores o incertidumbres en las observaciones pueden crecer en amplitud y propagarse entre escalas espaciales, haciendo finalmente que la predicción no pueda distinguirse de un estado de la atmósfera elegido aleatoriamente. El tiempo requerido para que suceda dicho crecimiento es considerado como el límite de predecibilidad y, en el caso de movimientos a gran escala, es de unas dos semanas (Shukla, 1985).

En contraste con los flujos a gran escala y a mesoescala, en los que la dinámica es *cuasi* bidimensional, con la energía residiendo principalmente en números de onda bajos debido a la cascada de energía de la parte alta de la escala, los movimientos en una dimensión espacial como los de las tormentas se caracterizan por estructuras altamente tridimensionales con cascada hacia la parte baja de la escala, a través del subintervalo inercial (sujeto a discusión, defino la escala de tormenta algo relajadamente, incluyendo los elementos ascendentes y descendentes más energéticos, del orden de 0,1 a 10 km en la horizontal, asociados con tormentas aisladas y sus agregaciones mayores, como las líneas de turbonada y sistemas a mesoescala). Como resultado, las tormentas disipan energía más rápidamente y tienen una vida más corta que aquellas otras de escala mayor.

Lilly (1990), en su discusión sobre la predicción a escala de tormenta, revisa el análisis clásico de Lorenz y apunta que, para modelos a gran escala, las mejoras en la resolución conducen teóricamente a mejores predicciones. A escala de tormenta y a mesoescala, esta mejora es limitada, con el límite de predicción estimado en cerca de dos horas para longitudes de onda de 20 km. Este tiempo límite puede ser, sin embargo, algo conservador, ya que el análisis de Lorenz desprecia ciertos aspectos importantes del

\* Profesor Asociado de Meteorología y Director del Centro para el Análisis y Predicción de Tormentas de la Universidad de Oklahoma

fenómeno a escala de tormenta.

Por ejemplo, las tormentas tienden a ser muy intermitentes tanto en el tiempo como en el espacio, en contraste con el supuesto de Lorenz de isotropía horizontal continua. Además, algunas tormentas muestran un inusual alto grado de organización, con fuerte rotación alrededor de un eje vertical (las llamadas supercélulas). Esta característica parece impedir la transferencia de energía a los niveles bajos de la escala y estabilizar el flujo contra la disipación turbulenta mejorando supuestamente la capacidad de predicción (Lilly, 1986 (a), (b); Droegemeier, Lazarus y Davies Jones, 1993). Finalmente, el modelo de Lorenz asume límites laterales periódicos, permitiendo así que los errores (por ejemplo, en las condiciones iniciales) sean reciclados a través del flujo. En contraste, los errores iniciales en los dominios de área limitada pueden pasar simplemente por tormentas en desarrollo y salir a través de los límites laterales sin volver a aparecer (se ha demostrado que las condiciones de contorno laterales de los modelos de área limitada ejercen, sin embargo, una fuerte influencia sobre la evolución y, por tanto, sobre la predicción del flujo interior. La medida en que tales errores en el estado interior inicial, en presencia de una perfecta información de las condiciones de contorno, afectan a la solución, depende del tipo y escala del error (Errico y Baumhefner, 1987; Vukicevic y Paegle, 1989; Warner, Key y Lario, 1989; Vukicevic y Errico, 1990; Vukicevic, 1991; van Tuyl y Errico, 1990; Berri y Paegle, 1990).

Mientras que las experiencias idealizadas de simulación mediante el uso de modelos de disipación de nubes han sugerido que la evolución de la tormenta puede ser, en ciertos casos, muy sensible a las condiciones iniciales (McPherson y Droegemeier, 1991; Brooks, 1992; Droegemeier y Levit, 1993), otras experiencias más recientes que utilizan modelos físicos completos con condiciones iniciales del terreno y horizontalidad no uniforme, indican unos límites prácticos de predicción de varias horas para situaciones con forzamiento de moderado a fuerte (Droegemeier y col., 1996 (a), (b); Xue y col., 1996 (a), (b); Carpenter y col., 1997). La pérdida de capacidad de predicción meteorológica a escala de tormenta, tanto teórica como práctica, se convierte así en tema de debate (Brooks, Doswell y Maddox, 1992), aunque las pruebas operativas como las descritas en la sección siguiente ("Un prototipo de sistema de PNT a escala de tormenta"), dibujan un cuadro en general optimista. Se están investigando actualmente importantes cuestiones referentes al impacto que sobre la calidad de la predicción tienen las

observaciones (por ejemplo, de radares, de redes en superficie, de satélites) además de otros aspectos del sistema físico (como el tipo de suelo y la cobertura del terreno), y son de importancia vital si se quieren aplicar con éxito los modelos a escala de tormenta, tanto en predicciones nacionales como en otros ámbitos (como es el caso en el apoyo a las operaciones militares lejanas en las que las observaciones sean muy limitadas).

### ***Recuperación de parámetros y asimilación de datos***

La predicción explícita del tiempo a escala de tormenta requiere observaciones a las escalas dominantes de interés, siendo los radares Doppler simples y los lidares los únicos equipos que pueden encajar en esta tarea. Sin embargo, dado que el radar Doppler no puede observar directamente todas las variables necesarias para inicializar un modelo de predicción numérica, se han elaborado técnicas para recuperar dicha información. En este contexto, la asimilación de datos y la recuperación de parámetros a escala de tormenta difieren significativamente de sí se necesitan para escalas mayores (por ejemplo, a escala mundial).

A gran escala, por ejemplo, todas las variables necesarias para inicializar un modelo de predicción (temperatura, viento horizontal, humedad y presión), excepto la velocidad vertical, pueden obtenerse directamente de sondeos aerológicos con globos. Además, los campos asociados de masa y viento satisfacen aproximaciones físicas conocidas (balance hidrostático, geostrofia) y, con los filtros adecuados de modos no importantes, tales como ondas gravitatorias y sonoras, estas observaciones son adecuadas para su utilización como condiciones iniciales en un modelo de predicción.

A escala de tormenta, sin embargo, el radar Doppler mide sólo la intensidad de precipitación (reflectividad), la velocidad radial del viento y el espectro de la varianza de la velocidad en volúmenes que contengan una concentración suficientemente alta de dispersiones. Todas las otras variables físicas (como las componentes polar y acimutal del viento, la temperatura, la presión, los campos de contenido de agua) dentro de la tormenta deben ser recuperadas. Ya que no se conocen, a esta escala, la existencia de balances o aproximaciones sencillas, deben utilizarse en el proceso de recuperación las ecuaciones completas del modelo o subconjuntos seleccionados adecuadamente.

Para la recuperación, a partir de los datos del radar Doppler simple, de las cantidades no medidas,

se han desarrollado dos métodos: el primero, mostrado esquemáticamente en la figura 1(a) y conocido como asimilación anticipada, implica inserciones repetidas de viento, reflectividad y, quizá, cantidades recuperadas del radar Doppler simple en un modelo de predicción. Con cada inserción, el modelo es forzado a aceptar la información suministrada externamente, por ejemplo poco a poco, mientras utiliza sus propias ecuaciones para determinar todos los otros campos sujetos a condicionantes estadísticos y dinámicos (estos condicionantes deben satisfacerse con exactitud, o en el sentido de mínimos cuadrados). Después de cierto número de inserciones, el proceso de asimilación acaba y comienza una predicción anticipada. Esta técnica ha sido aplicada a conjuntos de

datos para investigación a escala de tormenta (Weygandt, Shapiro y Droegemeier, 1995; Shapiro y col., 1996) y, más recientemente, a predicciones operativas en tiempo real (Droegemeier y col., 1996 (b); Xue y col., 1996 (b)).

El segundo método, conocido como asimilación variacional de datos (o método adjunto: LeDimet y Talagrand, 1986) y que se muestra en la figura 1(b) es un método más elegante, aunque requiere mucho tiempo de cálculo, y está basado en una teoría de control que busca optimizar, de forma objetiva, todas las observaciones disponibles. En este método, al modelo se le suministra una primera suposición del estado inicial (por ejemplo, a partir de un pronóstico previo), iniciándose a continuación una predicción a

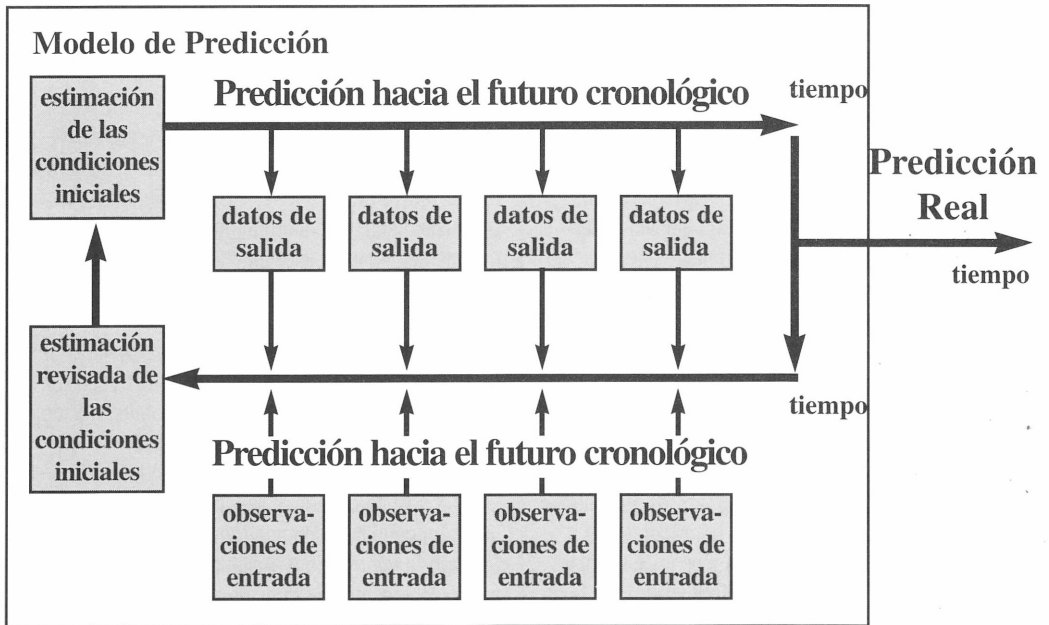
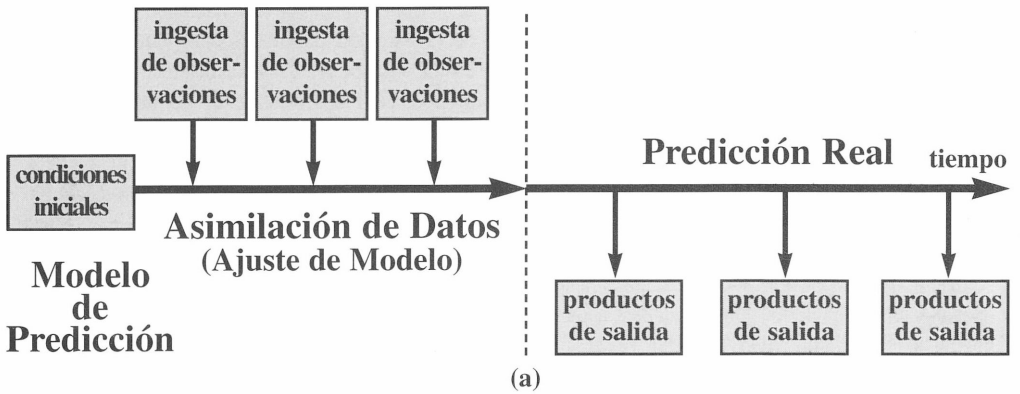


Figura 1 — Esquema de la asimilación de datos hacia adelante (a) y variacional (adjunta) (b)

muy corto plazo (para las aplicaciones a escala de tormenta, de 15 a 30 minutos) salvando, con cierta frecuencia la salida del modelo. Al final de esta llamada ventana de asimilación, el adjunto del modelo de predicción es ejecutado hacia atrás en el tiempo para minimizar las discrepancias entre la salida del modelo de predicción y cualquier observación efectuada durante este corto período de tiempo de predicción. La integración adjunta proporciona información sobre cómo ajustar el estado inicial del modelo de manera que las observaciones y el pronóstico concuerden lo mejor posible. Este proceso se repite de forma iterativa hasta alcanzar una convergencia o un estado inicial óptimo, momento en el cual se inicia la predicción real.

Sun, Flicker y Lilly (1991) y Kapitza (1991) fueron los primeros en aplicar la técnica adjunta al problema de la recuperación de información del radar Doppler simple utilizando datos simulados, siendo usado desde entonces para recuperar campos termodinámicos y de viento (Sun y Crook, 1994) y cantidades microfísicas (Verlinde y Cotton, 1993; Sun y Crook, 1995; Sun, Crook y Miller, 1995; Sun y Crook, 1997) a partir de datos reales. Se han desarrollado formas más sencillas y eficaces del método adjunto completo, habiéndose aplicado de manera similar a recuperaciones de información de parámetros no microfísicos (Xu y col., 1995; Xu y Qiu, 1995).

### ***Predicción conjunta***

Uno de los mayores desafíos de la PNT operativa, a causa de todo lo mencionado anteriormente, es la cuantificación por medios objetivos de la fiabilidad de la predicción. Mientras que una predicción simple obviamente tiene valores mensurables, la información sobre hasta qué punto son posibles otras soluciones, comenzadas a partir de estados iniciales parecidos, proporcionaría a los predictores una medida de la probabilidad de que ocurra un resultado particular pronosticado.

Para satisfacer esta necesidad, se ha desarrollado una variedad de las llamadas técnicas de predicción "conjunta" que se están aplicando de forma rutinaria a modelos a gran escala por la mayoría de los centros de predicción operativa del mundo (Toth y Kalnay, 1993; Molteni y col., 1996). En esta estrategia, una predicción simple de "control" es aumentada por otras predicciones realizadas utilizando bajas resoluciones espaciales y condiciones iniciales distorsionadas con relación a las utilizadas en la de control. Entonces se aplican varias técnicas de análisis para evaluar la "dispersión" de las soluciones conjuntas con referencia a la predicción de control.

La predicción conjunta tendrá sin duda un papel clave en la PNT operativa a escala de tormenta (Brooks, Doswell y Maddox, 1992), debido particularmente a que los sucesos a esa escala se inician y son gobernados, en parte al menos, por procesos y estructuras que no son bien observadas, comprendidas o representadas en los modelos numéricos actuales (líneas de convergencia y torbellinos en la capa límite; variaciones en el tipo de cobertura del terreno y contenido en vapor de agua del suelo). Deben hacerse, sin embargo, dos consideraciones importantes. La primera se refiere a la creación de las condiciones iniciales para los diferentes miembros del conjunto; mientras que para los flujos a gran escala este problema está bien encaminado, a escala de tormenta representa un reto considerable, debido al desconocimiento de la variabilidad natural asociada. En segundo lugar, es probable que, dadas las clases de sucesos representadas, la resolución espacial utilizada para los miembros del conjunto a escala de tormenta sea bastante similar a la escala de la predicción de control (si se necesita una resolución de 1 km para capturar la estructura de la convección de multicélulas en la predicción de control, la resolución conjunta no pueda probablemente exceder de 2 km). Esto está en agudo contraste con respecto a las actuaciones a gran escala actuales.

### ***Cuantificación de la bondad de la predicción***

La cuantificación de la bondad de la predicción es fundamental en la PNT. En la predicción a escalas mayores, este proceso es bien conocido y se utilizan la mayoría de las técnicas estadísticas convencionales (errores cuadráticos, correlación de anomalías, registros S1) que se ajustan bien a la resolución de campos que muestran variaciones espaciales relativamente suaves (véase Wilks, 1995, Capítulo 7). En contraste, la naturaleza cronológica y espacial intermitente del tiempo a escala de tormenta hace excesivamente difícil la definición de lo que es una "buena" predicción.

Considérese, por ejemplo, la situación en la que un modelo produce una supercélula tormentosa con la morfología, tipo y localización temporal correctos, pero con un error de 20 km en su posición: la evaluación tradicional de errores juzgaría como fallido este pronóstico cuando, evidentemente, posee algún valor (en parte basado en la forma en que va a ser utilizada la información). Actualmente se están dedicando considerables esfuerzos al desarrollo de técnicas de evaluación de la bondad de los pronósticos a escala de tormenta (Carr y col., 1996), poniendo el énfasis en estrategias similares a las que se están uti-

lizando con los huracanes.

### **Cálculo numérico, datos y redes**

La PNT operativa a escala de tormenta demandará una cantidad enorme de cálculo numérico y de redes de altas características, debido principalmente a que este tipo de pronósticos tienen una validez temporal muy corta y, por eso, deben ser generados rápidamente para poder tener un valor práctico. Dado que para representar fielmente los movimientos a escala de tormenta son necesarios dominios relativamente amplios, altas resoluciones espaciales y una física detallada, junto con el necesario proceso previo de datos de radares a escala muy fina y la creación de predicciones conjuntas, se comprende rápidamente el desafío relativo a la capacidad necesaria de potencia de cálculo. Es probable que, realmente, para que la PNT a escala de tormenta llegue a ser práctica en entornos operativos, se necesitarán ordenadores con características tales como velocidades de 300 gigaflops a 1 teraflop, memorias de 100 gigabytes de capacidad o aún mayores, dispositivos de entrada y salida en paralelo y enlaces de ancho de banda muy alto a datos y equipos de almacenamiento remotos.

### **Prototipo de un sistema de PNT a escala de tormenta**

#### **Repaso general**

La Fundación Nacional para las Ciencias (NSF), en un esfuerzo para derivar recursos nacionales considerables hacia el problema de la predicción a escala de tormenta, estableció en 1989 el Centro de Análisis y Predicción de Tormentas (CAPS) en la Universidad de Oklahoma. Como Centro de Ciencia y Tecnología de la NSF, el CAPS busca demostrar que la predicción numérica del tiempo a escala de tormenta puede ser práctica, poniendo el énfasis en tormentas con convección profunda y busca también desarrollar, probar y ayudar a realizar un prototipo de sistema completo de predicción numérica del tiempo a escala de tormenta (Droegemeier, 1990), en una variedad de situaciones operativas.

El último objetivo del CAPS es producir una predicción de seis a nueve horas en 30 a 60 minutos dentro de un dominio del orden de 1 000 km x 1 000 km. Para representar las múltiples escalas presentes, se está empleando una refinada rejilla ajustable (una dentro de otra: Skamarock y Klemp, 1992) (figura 2). Los elementos clave del proceso de predicción y los tamaños de los conjuntos de datos y anchuras de banda asociados se muestran de forma esquemática en la figura 3. Los datos observados, después de ser asimilados y de haber pasado un control de calidad,

pasan por varias etapas de recuperación. Una vez inicializado, el modelo de predicción resuelve aproximadamente 1 billón de ecuaciones para producir una predicción a nueve horas. Los conjuntos de datos asociados pueden alcanzar tamaños desde 100 Gbytes a 5 Tbytes, dependiendo de su uso final.

### **El sistema de predicción**

La base del CAPS es un nuevo sistema de predicción numérico tridimensional y no hidrostático conocido como Sistema Avanzado de Predicción Regional (ARPS). Tal y como se muestra de forma esquemática en la figura 4, incluye la asimilación de datos, el control de calidad, el sistema de análisis objetivo conocido como ADAS (Sistema de Análisis de Datos del ARPS), un sistema de recuperación y asimilación de parámetros de radar Doppler conocido como ARPS-DAS (Sistema de Asimilación de Datos ARPS, del que ADAS es un componente), el modelo ARPS en sí y los sistemas de proceso final conocidos como ARPSPLT y ARPSVIEW. El sistema ha estado desarrollándose en los últimos años (Xue y col., 1995; Xue y Droegemeier, 1997) y fue escrito utilizando métodos de codificación normalizados en esta área. El ARPS es muy modular, documentado con profusión, diseñado específicamente para ejecutarse entre una gran variedad de ordenadores paralelos y escrito para convertirse en una herramienta operativa o comercial de fácil mantenimiento para involucrar lo menos posible a sus creadores. El código fuente y toda la documentación son gratuitos, pudiendo ser usados y redistribuidos sin restricción.

### **Resultado de las pruebas operativas**

Desde 1993, el CAPS ha concentrado recursos considerables en pruebas operativas en tiempo real de sus sistemas de predicción en colaboración con el Servicio Meteorológico Nacional, el Centro de Predicción de Tormentas de la NOAA, la base Tinker de las Fuerzas Aéreas, el Centro Meteorológico Nacional para la Aviación, American Airlines, la Administración Meteorológica de Corea y una empresa consultora privada de meteorología (Janish y col., 1995; Droegemeier y col., 1996 (a), (b); Xue y col., 1996 (a), (b)). El CAPS dirigió su cuarta prueba operativa en tiempo real del 15 de mayo al 6 de junio. Con relación a las pruebas anteriores, esta última aportaba: el uso de datos de banda ancha en tiempo real o volumen total (Nivel II) del radar WSR-88D KTLX (Twin Lakes, Oklahoma); la utilización del Servicio de Difusión de la Información NEXRAD (NIDS) (Nivel III) aplicado a los datos digitales de reflectividad y de viento; aplicación del nuevo

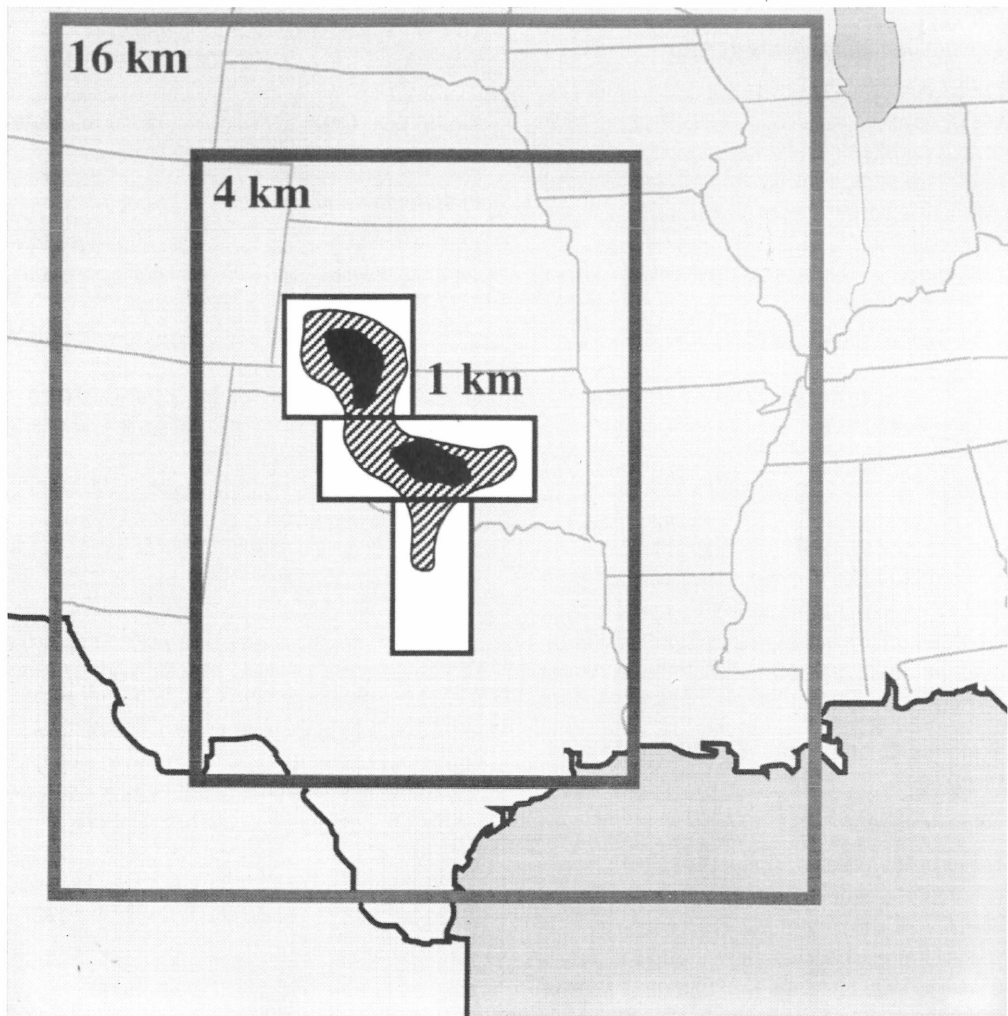


Figura 2 — Dominios de cálculo para la PNT a escala de tormenta previstos por el CAPS

Sistema de Análisis de Datos ARPS (ADAS); el uso de datos de la red a mesoescala en tiempo real; y, por último, la aplicación del sistema de asimilación de datos ARPS al radar Doppler simple para la recuperación de la velocidad y su ajuste variacional, con el cual puede recuperarse el campo de viento tridimensional (3-D) a partir de la componente radial del flujo suministrada por un radar Doppler simple.

Dado que, por razones de espacio, no se puede ofrecer una discusión amplia de las pruebas operativas de 1996, presentamos únicamente unos pocos resultados del período de seis semanas. Cada día, se produjeron dos predicciones de siete horas (17Z a 00Z) utilizando los dos dominios de cálculo mostrados en la figura 5 (Droegemeier y col., 1996 (b); Xue y col., 1996 (b)). La rejilla exterior fija, de 9 km de resolución, fue aumentada a una rejilla interior, cen-

trada en otro punto, y con una resolución de 3 km. La resolución vertical de la rejilla para ambos dominios varió en más de 43 niveles desde los 20 m cerca del suelo hasta cerca de 1 km en la cima del modelo (20 km), y la rejilla interior fue anidada en una vía dentro de la externa.

Todas las predicciones se hicieron utilizando parametrizaciones numéricas y físicas idénticas para ambas rejillas, interior y exterior, incluyendo advección horizontal de cuarto orden y vertical de segundo orden, representación TKE de orden 1,5 para procesos a escala de subrejilla, microfísica de Kessler y física de radiación de Tao y Simpson (1993) acoplada al balance superficial de energía y a un modelo de suelo de dos capas que tiene en cuenta los tipos de vegetación y de suelo.

La figura 6 muestra la secuencia de los pronós-

# Elementos principales del sistema de predicción (Objetivo: confeccionar una predicción a 9 horas en 30 minutos)

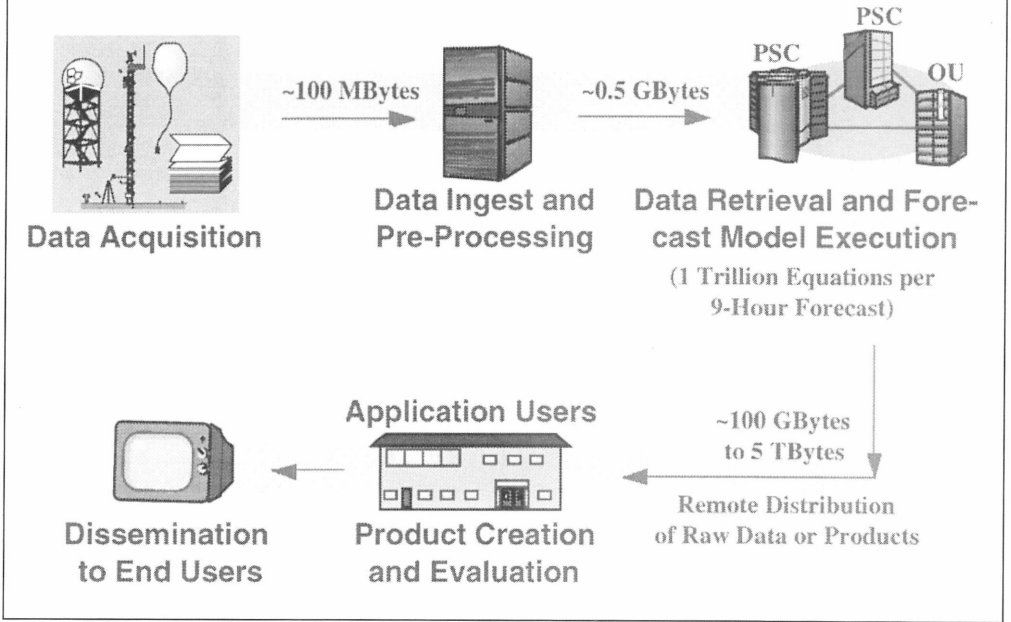


Figura 3 — Principales elementos y tamaños del ancho de banda y de los conjuntos de datos involucrados en la creación de una predicción a nueve horas a escala de tormenta en 30 minutos en el CAPS

tos de la primavera de 1996, cada una de las cuales fue producida como un “comienzo frío”, es decir, sin utilizar ningún ciclo continuo de asimilación por medio del cual una predicción ARPS previa sirva como primera aproximación para el ciclo siguiente.

Esto se hizo como un primer paso hacia un ciclo continuo o semicontinuo, estando actualmente sometido a comprobaciones (véase la sección “Planes para el futuro inmediato”). Los campos de fondo para la rejilla exterior (a las 17Z) fueron proporcionados por

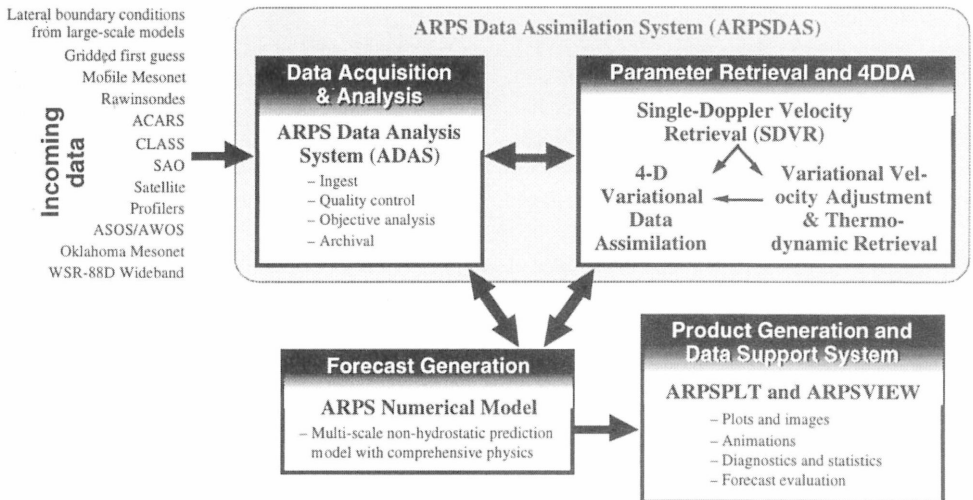


Figura 4 — Elementos principales del sistema de predicción del CAPS

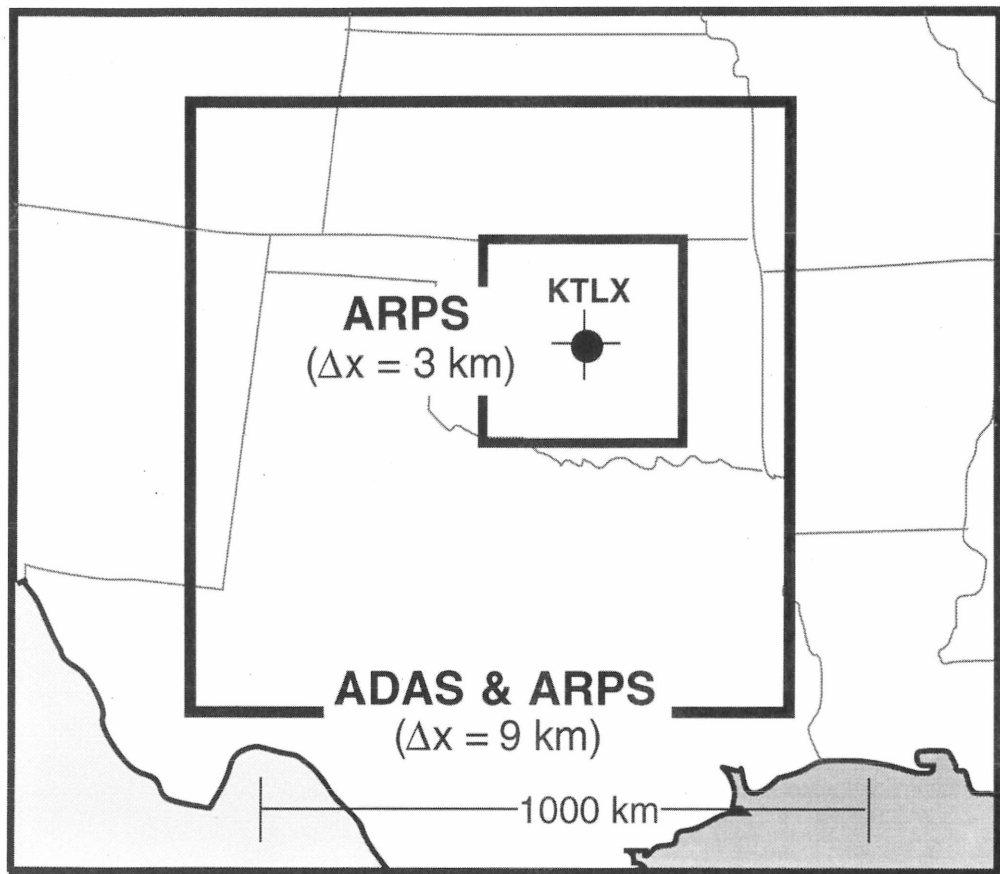


Figura 5 — Configuración de las rejillas para la predicción del ARPS usadas en las pruebas operativas de la primavera de 1996. La rejilla ADAS de 9 km de resolución y la exterior del ARPS cubren, esencialmente, la misma área. También se muestra la rejilla interna de 3 km relocatable, centrada en este ejemplo sobre el radar NEXRAD de Oklahoma City (KTLX)

la pasada de las 12Z del modelo de 60 km de resolución y de actualización rápida del National Center for Environmental Prediction (NCEP) (Centro Nacional para la Predicción Ambiental) (Benjamin y col., 1994). Estos campos fueron interpolados a la rejilla ARPS para su utilización por el ADAS, añadiéndose entonces todos los demás datos disponibles, en particular los pertenecientes a la red a mesoescala de Oklahoma. Dado que los datos de banda ancha (Nivel II) WSR-88D en tiempo real sólo estuvieron disponibles desde el radar KTLX, se buscaron medios alternativos para mejorar el campo de viento en amplias zonas de los dominios del ADAS y ARPS. Al final del período operativo se obtuvo una solución consistente en asimilar al ADAS las cuatro últimas desviaciones de los datos digitales Nivel III WSR-88D de viento radial de diversos radares. Los campos de reflectividad fueron utilizados además para mejorar los análisis de humedad en áreas con lluvia.

Los límites laterales de la rejilla exterior del

ARPS fueron forzados por la predicción RUC utilizando datos trihorarios interpolados linealmente en el espacio y en el tiempo. Las condiciones iniciales y de los límites laterales alojados en una sola vía para la rejilla fina interna fueron obtenidas de la predicción ARPS de rejilla gruesa. Cuando se sabía que el tiempo iba a activarse, o si se producía dentro del volumen de exploración del radar KTLX, sus datos de banda ancha se añadieron por el ADAS a la rejilla fina.

En un esfuerzo por simular, dentro de lo posible, un verdadero ambiente de predicción operativa, el Centro de Superordenadores de Pittsburgh dedicó al CAPS cerca de seis horas diarias, seis procesadores de su Cray C90 y 256 procesadores de su Cray T3D. La predicción de rejilla gruesa realizada en el C90, necesitó aproximadamente 45 minutos de tiempo de reloj para una predicción a 7 horas con unas necesidades de memoria de 29 millones de palabras (232 megabytes) (figura 6). La rejilla fina, realizada por el

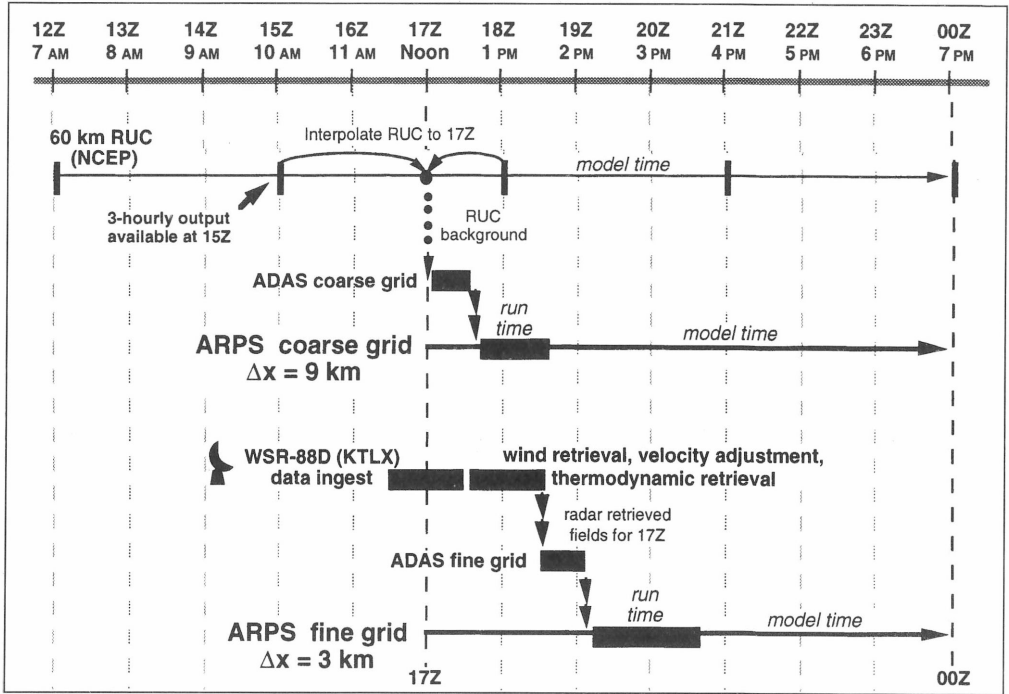


Figura 6 — Cronograma de predicción diaria para la prueba operativa de primavera (SOP). Las flechas delgadas representan el tiempo del modelo y las barras gruesas representan el tiempo de ejecución del modelo

T3D usando Máquina Virtual en Paralelo (PVM), necesitó 1 hora y 45 minutos y consumió 41 millones de palabras (328 megabytes) de memoria. El CAPS utilizó la malla mundial (World Wide Web) como medio primario para hacer llegar a los usuarios finales los resultados de las predicciones. Para comprobar las características del modelo, se les suministró a dichos usuarios un formulario electrónico de evaluación para su análisis posterior.

Como ilustración del potencial de la PNT a escala de tormenta, mostramos a la izquierda de la figura 7 (a) el campo compuesto de reflectividad radar de la predicción del modelo ARPS a 5 horas y con 9 km de rejilla, el 24 de mayo de 1996; la imagen radar correspondiente a casi la misma hora se muestra a la derecha. En este día, las tormentas se formaron a lo largo de una línea seca, aproximadamente a las 19 UTC, en el rincón nororiental de la zona de Texas que penetra en Oklahoma. Con el tiempo, las tormentas llegaron a ser severas, produciéndose granizo del tamaño de pelotas de golf y dos breves tornados. La primera tormenta en el modelo apareció hacia las 20 UTC cerca de la frontera entre Oklahoma y Kansas, transformándose entonces con rapidez en una línea de tormentas a lo largo del frente. Al final del período de cinco horas de predicción (22 UTC), la estructura de rejilla fina de la tormenta,

de 3 km de resolución (figura 7 (b)) aparece más cerca de lo observado que la predicción de rejilla gruesa (figura 7 (a)). El inicio de la tormenta según el modelo se produjo con una hora de retraso y la localización de la línea se alejó (el tamaño de un condado) hacia el oeste con la rejilla gruesa, y menos con la rejilla fina. En conjunto, la predicción fue muy buena (téngase en cuenta que, en esta predicción, no se utilizaron datos WSR-88D y que, aparte de la zona cubierta por la red mesoescala de Oklahoma, se dispuso de pocas observaciones más).

El 8 de junio de 1995, un potente frente frío y una línea seca se presentaron en la zona norte de Texas antes mencionada; incluso sin datos radar, el modelo pudo capturar toda la estructura y morfología de estas intensas tormentas (Droegemeier y col., 1996 (a); Xue y col., 1996 (a)). En casos en los que el forzamiento dinámico es menos fuerte, la bondad del modelo se reduce. Como se indica más adelante, para la valoración completa debe esperarse a la disponibilidad de datos de ancho de banda en tiempo real en todo el dominio de la predicción, así como resoluciones espaciales más de acuerdo con las situaciones a considerar (por ejemplo, por debajo de 1 km usando anidamientos múltiples de dos vías).

Durante el invierno y la primavera de 1997, se han llevado a cabo otros dos períodos de pruebas

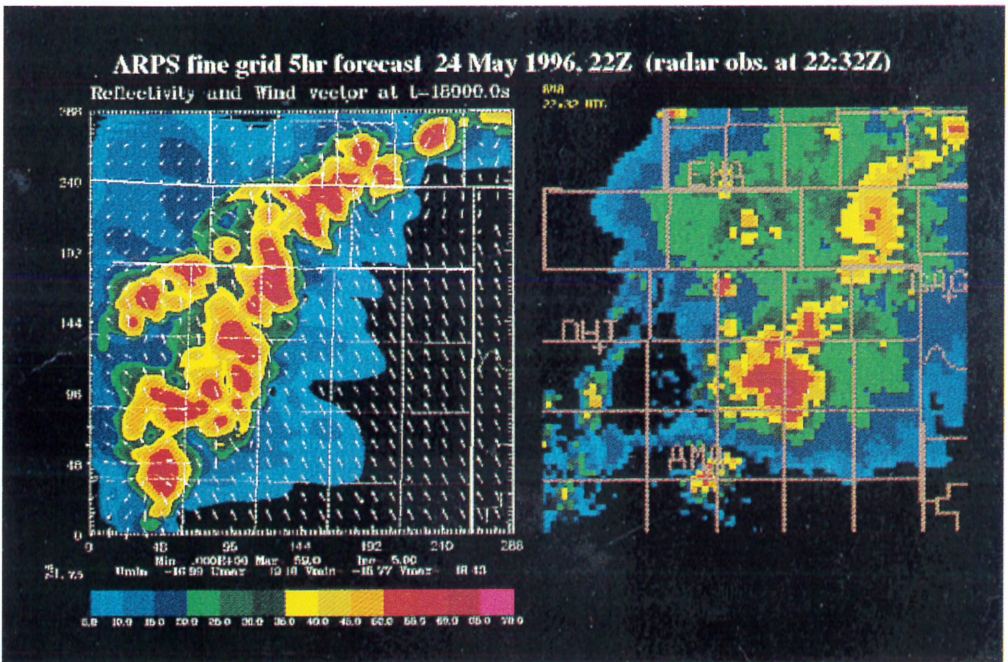
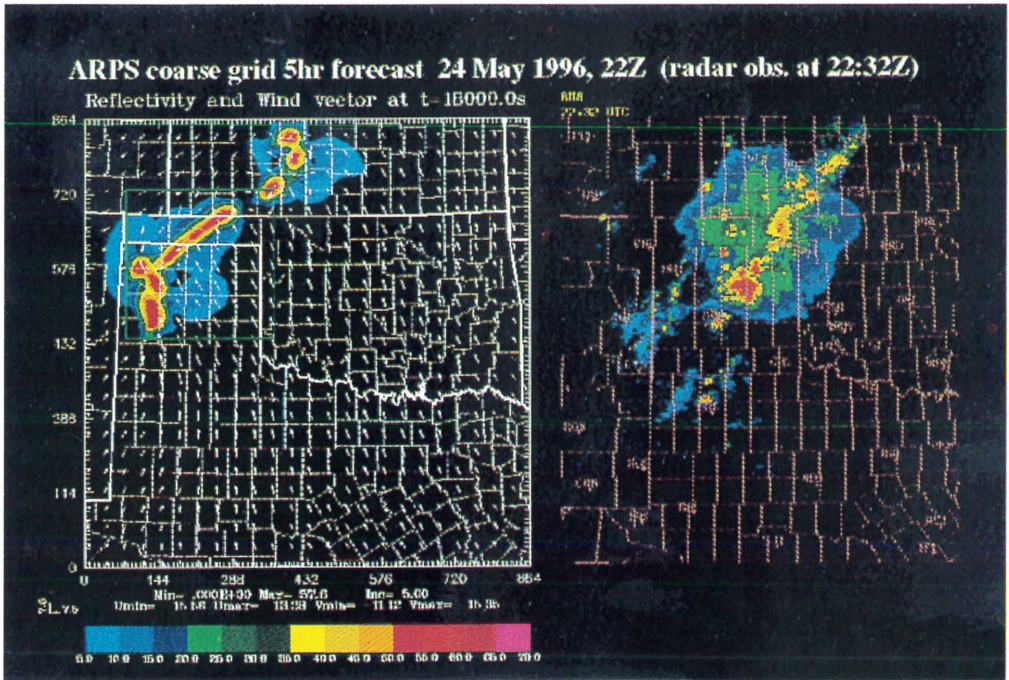


Figura 7 — Predicción del ARPS a las 22Z del 24 de mayo de 1996 sobre rejilla gruesa (arriba) y fina (abajo); la reflectividad equivalente del modelo se muestra a la izquierda y la correspondiente a las imágenes radar, a la derecha.

operativas en tiempo real, como parte de una colaboración de desarrollo e investigación entre el CAPS y American Airlines que busca determinar el valor de la PNT a escala de tormenta en la aviación comercial. Estas pruebas utilizaron datos NIDS en tiempo real de unos 20 radares WSR-88D, y representaron la primera ejecución totalmente automática del sistema completo de predicción. Los resultados del período de pruebas invernal fueron publicados por Carpenter y col., 1997, y se anima al lector a visitar la página CAPS de la Web en <http://www.caps.ou.edu> para examinar los resultados de las experiencias de primavera.

### **Planes para el futuro próximo**

El CAPS planea continuar sus pruebas operativas en tiempo real y comenzar las realizaciones diarias al final de 1997. Se está organizando por el CAPS una prueba intensiva, implicando a muchos modelos, para el período meteorológico severo de la primavera de 1998 en el sur de las Grandes Llanuras de los EE.UU., para el que el CAPS espera utilizar datos de ancho de banda en tiempo real de diversos radares WSR-88D, rejillas anidadas de dos vías por debajo de 1 km de resolución, un análisis 3-D de nubes basado en satélite y elementos de su sistema adjunto de recuperación de parámetros y de asimilación de datos. Está en camino la prueba de asimilación intermitente de datos, ciclos continuos de pronóstico y conjuntos de predicciones, esperándose que pueda evaluarse de manera operativa en 1999. La determinación completa sobre la factibilidad de la PNT a escala de tormenta se obtendrá cuando esas capacidades sean efectivas.

### **El futuro de la PNT operativa a escala de tormenta**

Con el advenimiento de una red nacional de exploración de radares Doppler, la disponibilidad de los superordenadores con procesadores en paralelo más potentes del mundo y un conocimiento más profundo de la pequeña escala atmosférica mediante intensa investigación en todos los sectores de la comunidad meteorológica, la capacidad de predecir explícitamente la iniciación y evolución de tormentas convectivas individuales y sus equivalentes invernales aparece a nuestro alcance. En vista de estos avances, los centros de predicción operativa encaran extraordinarios retos para determinar la mejor forma de realizar la PNT a escala de tormenta.

Existen varias opciones. Dado que el tiempo a escalas pequeñas es dominado, a menudo, por efectos muy locales, nos debemos preguntar si la PNT a escala de tormenta debe conducirse de manera cen-

tralizada o distribuída. El valor de la eficacia de una operación centralizada es obvio, pero un escenario distribuído regionalmente, en el que las oficinas locales de predicción, o bien ejecuten sus propias versiones específicas de un modelo unificado (quizá en colaboración con universidades o institutos de investigación cercanos), o bien quien la ejecución de modelos operados centralizadamente sobre su región geográfica particular, es otra posibilidad atractiva. Otro tema es el que se refiere al modo de operación del modelo. Se puede prever una estrategia de ciclos continuos de predicción, tal y como es ahora el caso en la mayoría de los centros; sin embargo, la naturaleza intermitente y muy localizada del tiempo a escala de tormenta nos sugiere que pueden ser efectivos los modelos que puedan volver a recolocarse y ejecutarse "bajo petición" sobre áreas definidas con una meteorología particularmente activa.

Existen otros muchos obstáculos, pero no son insuperables. Los fundamentos de la posibilidad de predicción de los movimientos a pequeña escala están por determinarse, pero pueden ser determinados sólo mediante experiencias prácticas, más que por análisis teóricos. El acceso a datos radar de enormes volúmenes en tiempo real, así como su procesamiento, es otro reto formidable, particularmente debido a los gastos de ejecución del sistema de predicción cuando se consideran la asimilación de datos adjunto y la predicción conjunta. Finalmente, la representación precisa de los procesos en la superficie del suelo, particularmente todos los relacionados con la sensibilidad inducida por las variaciones espaciales y cronológicas en la cubierta vegetal y en la humedad del suelo, será probablemente muy importante para el éxito de la PNT operativa a escala de tormenta.

### **Agradecimientos**

*El autor agradece con satisfacción a los estudiantes y científicos del Centro para el Análisis y la Predicción de Tormentas de la Universidad de Oklahoma sus esfuerzos en el desarrollo y dirección de las pruebas operativas con el Sistema Avanzado de Predicción Regional. Estas gracias especiales son extensibles a los predictores de la National Weather Service Forecast Office, al Centro de Predicción de Tormentas de la NOAA y a American Airlines. Finalmente, nuestro agradecimiento al Centro de Superordenadores de Pittsburgh, que suministró los recursos informáticos para la predicción en tiempo real y una gran colaboración en el cálculo paralelo y de redes. Esta investigación fue apoyada por la National Science Foundation bajo la subvención ATM91-20009,*

mediante un suplemento a esta subvención por parte de la Federal Aviation Administration y por otra subvención de AMR Corporation y de American Airlines.

## Referencias

- BENJAMIN, S.G., K.J. BRUNDAGE, P.A. MILLER, T.L. SMITH, G.A. GRELL, D. KIM, J.M. BROWN and T.W. SCHLATTER, 1994: The Rapid Update Cycle at NMC. Preprints, 10th Conf. on Num. Wea. Pred., 17-21 July, Amer. Meteor. Soc., Portland, OR, 566-568.
- BERRI, G.J. and J. PAEGLE, 1990: Sensitivity of local predictions to initial conditions. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 256-267.
- BROOKS, H.E., 1992: Operational implications of the sensitivity of modelled thunderstorms to thermal perturbations. Preprints, 4th AES/CMOS Workshop on Operational Meteorology, Whistler, BC, 15-18 September, 10 pp.
- BROOKS, H.E., C.A. DOSWELL III, and R.A. MADDOX, 1992: On the use of mesoscale and cloud-scale models in operational forecasting. *Wea. and Forecasting*, **7**, 120-132.
- CARPENTER, R.L., Jr., K.K. DROEGEMEIER, G.M. BASSETT, W.L. QUALLEY and R. STRASSER, 1997: Project Hub-CAPS: Storms-scale NWP for commercial aviation. Preprints, 7th Conf. on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, 2-7 February, Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., 474-479.
- CARR, F.H. et al., 1996: Quantitative verification of non-hydrostatic model forecasts of convective phenomena. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, 19-23 Feb., Amer. Meteor. Soc., San Francisco, CA, 174-177.
- DROEGEMEIER, K., 1990: Toward a science of storm-scale prediction. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Provincial Park, Alberta, Amer. Meteor. Soc., 256-262.
- DROEGEMEIER, K. and J. LEVIT, 1993: The sensitivity of numerically-simulated storm evolution to initial conditions. Preprints, 17th conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 431-435.
- DROEGEMEIER, K., S.M. LAZARUS and R.P. DAVIES-JONES, 1993: The influence of helicity on numerically simulated convective storms. *Mon. Wea. Rev.* **121**, 2 005-2 029.
- DROEGEMEIER, K., M. XUE, A. SATHYE, K. BREWSTER, G. BASSETT, J. ZHANG, Y. LIU, M. ZOU, A. CROOK, V. WONG and R. CARPENTER, 1996 (a): Real-time numerical prediction of storm-scale weather during VORTEX'95, Part I: Goals and methodology. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, 15-20 Jan., Amer. Meteor. Soc., San Francisco, CA, 6-10.
- DROEGEMEIER, K., M. XUE, K. BREWSTER, Y. LIU, S.K. PARK, F. CARR, J. MEWES, J. ZONG, A. SATHYE, G. BASSETT, M. ZOU, R. CARPENTER, D. MCCARTHY, D. ANDRA, P. JANISH, R. GRAHAM, S. SANIEVICI, J. BROWN, B. LOFTIS and K. McLAN, 1996 (b): The 1996 CAPS spring operational forecasting period—Real-time storm-scale NWP, Part I: Goals and methodology. Preprints, 11th Conf. on Num. Wea. Pred. 19-23 August, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 294-296.
- ERRICO, R. and D. BAUMHEFNER, 1987: Predictability experiments using a high-resolution limited-area model. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 488-504.
- JANISH, P.R., K.K. DROEGEMEIER, M. XUE, K. BREWSTER and J. LEVIT, 1995: Evaluation of the advanced regional prediction system (ARPS) for storm-scale modeling applications in operational forecasting. Proc., 14th Conf. on Wea. and Forecasting, 15-20 January, Amer. Meteor. Soc., Dallas, TX, 224-229.
- KAPITZA, H., 1991: Numerical experiments with the adjoint of a non-hydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2 993-3 011.
- LEDIMET, F.X. and O. TALAGRANO, 1986: Variational algorithms for the analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects. *Tellus*, **38A**, 97-110.
- LILLY, D.K., 1986 (a): The structure, energetics and propagation of rotating convective storms, Part I: Energy exchange with the mean flow. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 113-125.
- LILLY, D.K., 1986 (b): The structure, energetics and propagation of rotating convective storms, Part II: Helicity and storm stabilization. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 126-140.
- LILLY, D.K., 1990: Numerical prediction of thunders-torms—has its time come? *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 779-798.
- MCPHERSON, R.A. and K.K. DROEGEMEIER, 1991: Numerical predictability experiments of the 20 May 1997, Del City, OK supercell storm. Preprints, 9th Conf. on Num. Wea. Pred., Denver, Amer. Meteor. Soc., 734-738.
- MOLTENI, F., R. BUIZZA, T.N. PALMER and T. PETROLIAGIS, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122A**, 73-119.
- PIELKE, R.A., Jr., 1997: Workshop on the social and economic impacts of weather. Available from the National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 136pp.
- SHAPIRO, A., L. ZHAO, S. WEYGANDT, K. BREWSTER, S. LAZARUS and K.K. DROEGEMEIER, 1996: Initial forecast fields created from single-Doppler wind retrieval, thermodynamic retrieval and ADAS. Preprints, 11th Conference on Numerical Weather Prediction, 19-23 Aug., Amer. Meteor. Soc., Norfolk, VA, 119-121.

- SHUKLA, J., 1985: Predictability. *Adv. Geophys.*, **28B**, 87-122.
- SKAMAROCK, W.C. and J.B. KLEMP, 1993: Adaptive grid refinement for two-dimensional and three-dimensional non-hydrostatic atmospheric flow. *Mon. Wea. Rev.*, **3**, 788-804.
- SUN, J. and N.A. CROOK, 1994: Wind and thermodynamic retrieval from single-Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix II. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1 075-1 091.
- SUN, J. and N.A. CROOK, 1995: Retrieval of the dynamical and microphysical variables in observed Florida convective storms using a cloud model and its adjoint. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 555-559.
- SUN, J. and N.A. CROOK, 1997: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1 642-1 661.
- SUN, J., D.W. FLICKER and D.K. LILLY, 1991: Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 876-890.
- SUN, J., N.A. CROOK and L.J. MILLER, 1995: Retrieval of the dynamical and microphysical structure of convective storms in CAPE using a cloud model and its adjoint. Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc., 820-822.
- TAO, W.-K. and J. SIMPSON, 1993: The Goddard Cumulus Ensemble Model, Part I: Model description. *Terrestrial, Atmos. and Oceanic Sciences*, **4**, 35072.
- TOTH, Z. and E. KALNEY, 1993: Ensemble forecasting at the NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2 317-2 330.
- VAN TUYL, A.H. and R.M. ERRICO, 1990: Scale interaction and predictability in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 495-517.
- VERLINDE, J. and W.R. COTTON, 1993: Fitting microphysical observations of non-steady convective clouds to a numerical model: An application of the adjoint technique of data assimilation to a kinematic model. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2 776-2 793.
- VUKICEVIC, T., 1991: Nonlinear and linear evolution of initial forecast errors. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1 602-1 611.
- VUKICEVIC, T. and J. PAEGLE, 1989: The influence of one-way interacting lateral boundary conditions upon predictability of flow in bounded numerical models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 340-350.
- VUKICEVIC, T. and R.M. ERRICO, 1990: The influence of artificial and physical factors upon predictability estimates using a complex limited-area model. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1 460-1 482.
- WARNER, T.T., L.E. KEY and A.M. LARIO, 1989: Sensitivity of mesoscale-model forecast skill to some initial-data characteristics, data density, data position, analysis procedure and measurement error. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1 281-1 310.
- WEYGANDT, S., A. SHAPIRO and K.K. DROEGEMEIER, 1995: Adaptation of a single-Doppler velocity retrieval for use on a deep convective storm. Preprints, 27th Conference on Radar Meteorology, 9-13 October, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc., 264-266.
- WILKS, D.S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 464 pp.
- XU, Q. and C. QIU, 1995: Adjoint-method retrievals of low-altitude wind fields from single-Doppler reflectivity and radial-wind data. *J. Atmos. and Oceanic Technology*, **12**, 1 111-1 119.
- XU, Q., C. QIU, H. GU and J. YU, 1995: simple adjoint retrievals of microburst winds from single-Doppler radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1 822-1 833.
- XUE, M. and K.K. DROEGEMEIER, 1997: The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multiscale non-hydrostatic atmospheric simulation and prediction tool: Model dynamics. Submitted to *Mon. Wea. Rev.*
- XUE, M., K.K. DROEGEMEIER, V. WONG, A. SAPHIRO and K. BREWSTER, 1995: ARPS Version 4.0 User's Guide, 380 pp. Available from the Center for Analysis and Prediction of Storms, 100 East Boyd Street, Norman, OK, 73019.
- XUE, M., K. BREWSTER, K.K. DROEGEMEIER, F. CARR, V. WONG, Y. LIU, A. SATHYE, G. BASSETT, P. JANISH, J. LEVIT and P. BOTHWELL, 1996 (a): Real-time numerical prediction of storm-scale weather during VORTEX'95, Part II: Operations summary and example predictions. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, 19-23 Feb., Amer. Meteor. Soc., San Francisco, CA, 178-182.
- XUE, M., K. BREWSTER, K.K. DROEGEMEIER, V. WONG, D. WANG, F. CARR, A. SAPHIRO, L. ZHAO, S. WEYGANDT, D. ANDRA and P. JANISH, 1996 (b): The 1996 CAPS spring operational forecasting period—Real-time storm-scale NWP, Part II: Operational summary and sample cases. Preprints, 11th Conf. on Num. Wea. Pred. 19-23 August, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 297-300.

□