



Implicando predictores humanos en los sistemas numéricos de predicción

Víctor Homar¹ and David Stensrud²

¹Grup de Meteorologia. Departament Física. Universitat de les Illes Balears

²National Severe Storms Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration. USA

Recibido: 25-VII-2006 – Aceptado: 19-X-2006 – **Versión Traducida**

Correspondencia a: victor.homar@uib.es

Resumen

Los predictores humanos mejoran rutinariamente las salidas de los modelos de predicción meteorológica numérica y a menudo tienen conocimientos precisos sobre las tendencias del modelo y sus defectos. Esta riqueza de conocimiento sobre el rendimiento del modelo está sin explotar, sin embargo, ya que es utilizada sólo en el punto final del proceso de previsión para interpretar los campos predichos por el modelo. Aún así, no hay razones para que los predictores humanos no puedan intervenir en otras etapas del proceso de previsión numérica del tiempo, especialmente cuando se está utilizando un sistema de predicción por conjuntos. La intervención humana en la creación de conjuntos de simulaciones puede ser especialmente útil para la predicción de acontecimientos poco frecuentes, tales como acontecimientos de tiempo severo, que típicamente no están bien predichos por los modelos numéricos. El Spring Program 2003 del USA/NOAA SPC/NSSL evaluó un método de generación de predicciones por conjuntos donde los predictores humanos se implicaron en el proceso de creación de conjuntos. El predictor encargado del día era consultado respecto a las estructuras atmosféricas de interés y, utilizando un modelo adjunto, se obtenía un conjunto de perturbaciones que se utilizaban para generar un sistema de 32 miembros. Los resultados muestran que este conjunto experimental mejora las previsiones numéricas operacionales de tiempo severo. El conjunto generado por humanos proporciona mejores resultados para acontecimientos meteorológicos de alto impacto, pero le falta dispersión global y produce previsiones poco fiables para los acontecimientos meteorológicos no peligrosos. Resultados posteriores obtenidos para un conjunto construido combinando miembros del sistema operativo con miembros generados por los predictores humanos muestran unos resultados muy prometedores para la previsión de tiempo severo mientras evitan el problema de la baja dispersión global. El valor de los seres humanos en la creación de conjuntos diseñados para acontecimientos meteorológicos específicos de alto impacto es potencialmente grande. Aún así, se requieren aún esfuerzos importantes de investigación para analizar el valor potencial de la intervención de los predictores en el proceso de predicción numérica del tiempo. Queda todavía mucho por aprender sobre cómo crear conjuntos para previsiones de corto alcance de tiempo severo, y tenemos que hacer un mejor uso de la habilidad y la experiencia de los predictores humanos en este proceso de aprendizaje.

1 Introducción

La previsión numérica de los fenómenos de mesoescala y de tiempo severo convectivo plantea uno de los problemas más desafiantes con los que se enfrenta hoy en día la comunidad atmosférica. La física de los modelos, la resolución y la técnica de asimilación de datos están mejorando conti-

nuamente y pueden encontrarse publicaciones que enseñan simulaciones con resultados muy realistas de sistemas convectivos severos. Sin embargo, los modelos todavía no proporcionan una guía fiable y consistente para operaciones respecto a aspectos importantes del tiempo severo tales como la iniciación, el modo, la intensidad y la evolución de la convección. Se reconoce que las previsiones numéricas de



mesoescala de corto alcance están deterioradas debido a los errores de muestreo de observación en mesoescala y pequeña escala, que son desconocidos en gran parte, así como también por las deficiencias en las fuentes de los modelos como los esquemas de parametrización física. Además, se sabe poco sobre los límites de predicibilidad en las escalas espaciales y temporales de sistemas meteorológicos intermitentes responsables de producir tiempo severo. La percepción que múltiples fuentes de incertidumbre podrían degradar fuertemente la previsión mina la confianza del predictor en la salida producida por los modelos numéricos de mesoescala, incluso cuando proporcionan previsiones que parecen muy realísticas. Inevitablemente, los errores observacionales y las deficiencias de los modelos, así como los asuntos de predicibilidad, introducen incertidumbres inherentes que siempre están presentes en la previsión.

Las técnicas de predicción por conjuntos son un método que puede ser utilizado para incorporar explícitamente las incertidumbres en el sistema numérico de previsión y su uso podría ayudar a los predictores a la hora de comprobar los niveles apropiados de confianza en la predicción. Sin embargo, identificar, cuantificar y representar estas incertidumbres en el sistema de previsión es una tarea compleja. Es bien sabido que combinar las soluciones de un número de simulaciones numéricas ligeramente distintas no sólo produce una previsión mejor que cada simulación individual cuando se examinan muchos casos (Leith, 1974), sino que también proporciona una indicación cuantitativa de incertidumbre de la previsión. La forma de cómo se tienen que construir estas realizaciones (p.e. miembros de conjunto) es hoy en día el foco de mucha atención en la comunidad de investigación meteorológica (Shapiro y Thorpe, 2004).

Se han propuesto múltiples métodos para escoger un conjunto de realizaciones óptimas que explique los errores de análisis. Para las previsiones de medio alcance, los mayores centros operacionales de los Estados Unidos y Europa han adoptado dos estrategias bien establecidas. Las técnicas de vectores de cultivo (Breeding Toth y Kalnay, 1993) y de vectores singulares (Buizza y Palmer, 1995) han proporcionado mejoras notables en la competencia de las previsiones de medio alcance, incluso sin considerar las deficiencias de modelo. Desgraciadamente, tener en cuenta los errores en las condiciones iniciales para aplicaciones en la mesoescala se hace más complejo por culpa del error de análisis más grande y menos conocido, el importante papel que juegan los esquemas de parametrización de los procesos físicos en las previsiones de modelo de tiempo “cercano”, y la gran dependencia más visible del usuario final de las previsiones fiables.

Xu et al. (2001) propone un método para generar miembros para sistemas de predicción de corto alcance que se beneficie del conocimiento de los predictores a la hora de identificar las áreas donde hay probabilidades significativas de tiempo peligroso en la previsión y de las características atmosféricas que puedan influenciar su desarrollo. El enfoque de Xu et al. (2001) asume que la experiencia y la competen-

cia de los predictores humanos es un factor útil para el proceso de crear sistemas de predicción por conjuntos. Es bien sabido que los predictores mejoran rutinariamente las predicciones numéricas, como se ve claramente en predicciones de precipitación (Olson et al., 1995, p.e.). Además, los predictores del *USA/NOAA/Storm Prediction Center* identifican regularmente las regiones de mesoescala con un potencial importante de tiempo severo y confeccionan previsiones y avisos de tiempo severo con altos niveles de precisión. No existen razones para asumir que este conocimiento y esta experiencia, aunque sean subjetivos, no puedan resultar útiles para la creación de miembros de un sistema de predicción por conjuntos y por tanto beneficiar el proceso de previsión operacional, especialmente para acontecimientos poco frecuentes e importantes.

Con el objetivo de comprobar el valor de los sistemas de predicción por conjuntos de de corto alcance para la previsión operacional de tiempo severo, el Storm Prediction Center y el National Severe Storms Laboratory, dos centros USA/NOAA, dirigieron el experimento del *Spring Programa 2003* (SP03) enfocado principalmente en la generación e interpretación de sistemas de predicción mesoescalar por conjuntos de corto alcance. Animado por las prometedoras conclusiones de Xu et al. (2001), el SP03 incluía un subexperimento para comprobar su método para un nombre mayor de casos que utilizaban predictores operacionales como principales conductores del sistema. La idea de base era crear un conjunto diario, adaptado para proporcionar una guía a los predictores sobre las amenazas de tiempo severo en las 48 horas siguientes. Esencialmente, el objetivo era generar dispersión en el conjunto en zonas específicas, y sólo en campos de interés específicos, como oposición a la totalidad del territorio, o siguiendo modos de crecimiento rápido bajo normas genéricas globales. Este estudio presenta un resumen de los resultados de verificación de este conjunto de evaluaciones realizadas dentro del SP03.

2 Generación de conjunto

El sistema de predicción por conjuntos generado por el predictor consiste en 32 miembros producidos utilizando el Modelo de mesoescala de Quinta Generación no-hidrostático (MM5V3, www.mmm.ucar.edu/mm5/) de la Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research. Este conjunto de evaluaciones realizadas dentro del SP03 (MM5ADJ) funcionó los días laborables desde el 28 de abril al 6 de junio (el SP03 no funcionaba los fines de semana). Para generar el conjunto de distintas condiciones iniciales para el conjunto, se siguió el método detallado para Xu et al. (2001): cada día un predictor humano con experiencia en tiempo severo tenía que identificar 16 características de interés en la predicción de control que, según la opinión del predictor, eran importantes para el potencial desarrollo y/o evolución del tiempo severo del día siguiente (12 UTC a 12 UTC día 2). El predictor podía seleccionar estructuras atmosféricas a cualquier hora (en intervalos de 6 h) de la pre-

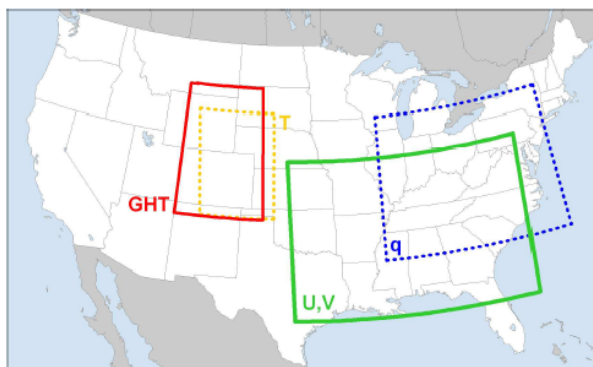


Fig. 1a

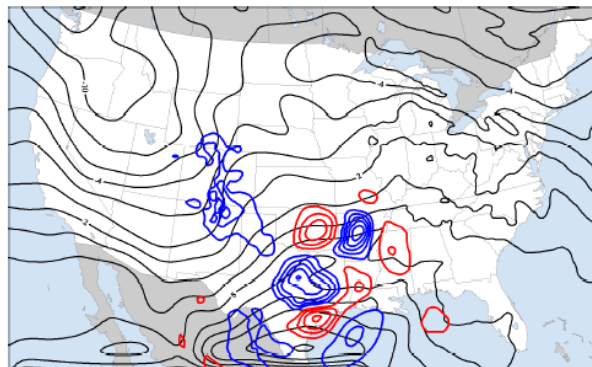


Fig. 1b

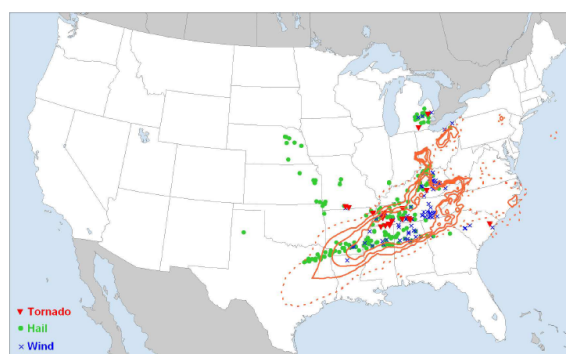


Fig 1c

Figura 1. Pasos ilustrativos del proceso propuesto de generación de predicciones por conjuntos: a) Zonas y campos seleccionados por el predictor (aquí, altura geopotencial (GHT), temperatura (T), componentes de viento (U,V) y humedad específica (q)); b) Ejemplo de perturbación de temperatura sobre las condiciones iniciales a 700 hPa (los contornos negros representan temperaturas no-perturbadas, el rojo y el azul muestran las perturbaciones positivas y negativas (es decir: calientes y frías)) utilizado para generar un único miembro de conjunto y derivado de un modelo adjunto aplicado a los campos mostrados en a); y c) Registros de tormentas y probabilidad de tiempo severo (líneas naranjas en intervalos de 25%) como previsión del sistema de previsión por conjuntos de test para el período de 24 h empezando a las 12 UTC del 5 de mayo. Las líneas punteadas representan el 5% de las probabilidades.

visión de control del modelo Eta de 48 h. Como ejemplo, la figura 1a muestra las características de interés destacadas por el predictor en el ciclo de previsión del 5 de mayo de 2003.

Cada día, para cada una de las 16 características de interés seleccionadas por el predictor, se inició una integración de modelo adjunto (Errico, 1997) y se obtuvieron las zonas sensibles de cada una de las condiciones iniciales. El modelo adjunto utilizado es el *MM5 Adjoint Modelling System* desarrollado por el National Center for Atmospheric Research. Una vez obtenidos los campos de sensibilidad, se reescalaron los componentes de viento horizontal y la temperatura a una amplitud máxima de 8.0 m s^{-1} y 4.0 K , respectivamente. Finalmente, se lanzaron dos simulaciones de MM5 para cada característica destacada, cada una de ellas utilizando perturbaciones en las dos direcciones (positiva y negativa). La figura 1b muestra un ejemplo de estas perturbaciones para el campo de temperatura a 700 hPa. Como se le pidió al predictor que seleccionara 16 características cada día, se produjeron 32 miembros para formar el conjunto MM5ADJ.

Aunque el modelo adjunto sea tangente lineal, y por lo tanto las perturbaciones fueron definidas estrictamente para

cambiar la característica seleccionada por el predictor en sentido lineal, la evolución no-lineal de la perturbación puede ser interpretada como una perturbación estocástica para la trayectoria en el espacio de fases del modelo inicial. Sin embargo, este componente estocástico de la perturbación se limitará muy probablemente a la zona de interés en la previsión y hora seleccionada por el predictor. Esencialmente, utilizando las perturbaciones positivas y negativas, la característica de interés se amplía y se reduce igualmente en sentido lineal. La evolución no lineal de las perturbaciones positivas y negativas, sin embargo, podrían producir resultados inesperados ya que la característica de interés especificada no se amplía ni se reduce simétricamente en las dos previsiones no-lineales. Este comportamiento no-lineal se ve como una aportación positiva al sistema, asegurando una diversidad rica de soluciones entre los miembros del sistema de predicción por conjuntos sobre las regiones importantes definidas por el predictor, en oposición a los efectos triviales de la evolución puramente lineal de las perturbaciones derivadas linealmente.

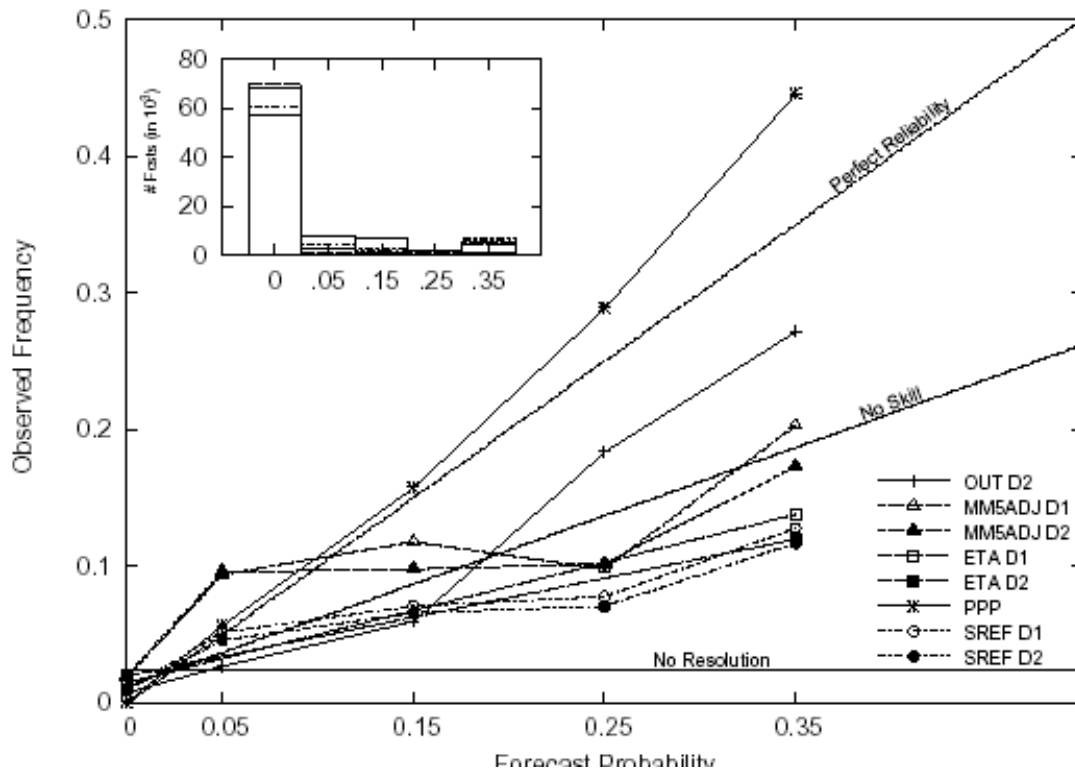


Figura 2. Diagramas atribuidos para la probabilidad de tiempo severo obtenidos en: previsiones preliminares del Día 2 del SP03, T+24 y T+48 h MM5ADJ, Eta y SREF.

3 Conjuntos de datos de verificación

La evaluación del MM5ADJ se basó en observaciones de tiempo severo sobre los Estados Unidos continentales (CONUS), al este de las Rocosas. El conjunto de datos observacionales utilizados para la verificación son los registros de tiempo severo del SPC. Esta base de datos contiene un listado de los informes de daños de tornados, granizo grande (más de 20 mm) y viento convectivo (más fuerte de 50 nudos) de los Estados Unidos con información sobre la intensidad del acontecimiento y su localización en el espacio y en el tiempo. La figura 1c muestra un ejemplo de los registros en la base de datos del SPC.

Además de la verificación objetiva con el conjunto de datos observacionales, el valor relativo del MM5ADJ se comprueba comparándolo con las previsiones operacionales de corto alcance disponibles para el mismo período:

- Previsiones subjetivas para el Día 2: El predictor del SP03 emitía diariamente una previsión experimental de tiempo severo para el Día 2, siguiendo las mismas pautas utilizadas para las previsiones rutinarias operacionales del SPC. Como las previsiones del SPC se emiten utilizando cinco categorías discretas de probabilidad: 0.00, 0.05, 0.15, 0.25 y 0.35, y para garantizar una comparación justa entre las predicciones considera-

das, todas las previsiones consideradas en este estudio están divididas en estas categorías.

- Eta operacional: Los resultados diarios del modelo operacional Eta de las 12 UTC se incluye para añadir una referencia de un modelo determinista a la comparación.
- Sistema NCEP SREF: El sistema de predicción por conjuntos del NCEP para previsiones de corto alcance estaba formado por 10 miembros durante la SP03, cinco Eta y cinco miembros del Modelo Espectral Regional (RSM). Desgraciadamente, debido a problemas con el archivo de los datos, sólo se dispone de 11 días para hacer la comparación durante el período que duró la SP03. Todos los resultados obtenidos de esta pequeña muestra de 11 días se completa con un test de significancia estadística.
- Pronóstico prácticamente perfecto: Brooks et al. (2003) discuten el concepto de los programas prácticamente perfectos (PPP) y presentan las características principales. Esta previsión hipotética es tan precisa como podía esperarse de un predictor ya enterado de los registros, dadas las limitaciones de la previsión del mundo real.

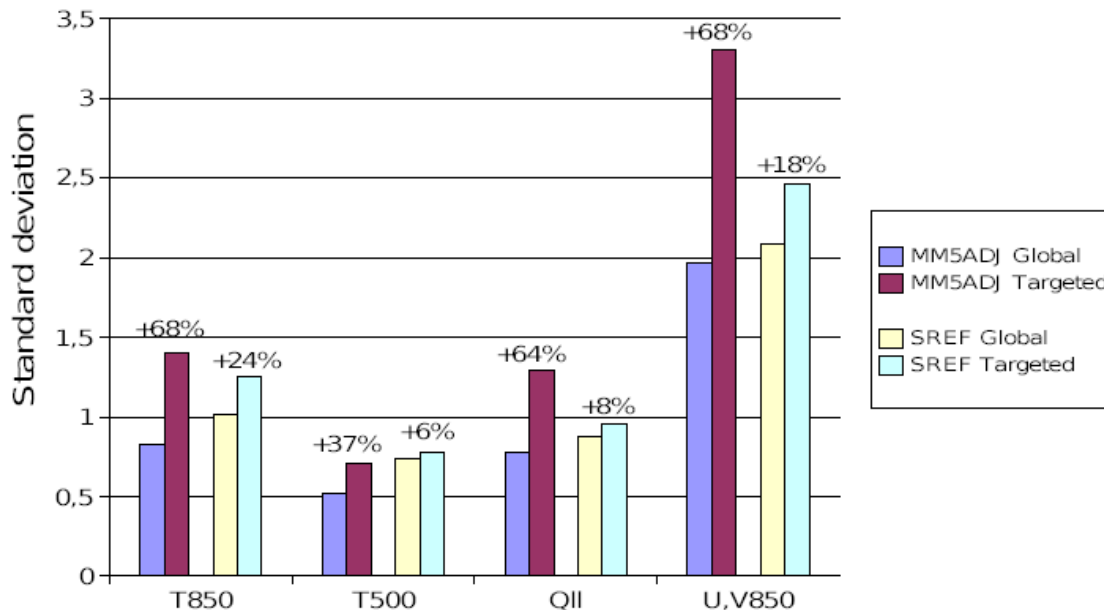


Figura 3. Media de la desviación estándar de la predicción de 36 h, calculada en los lugares de sondeo. Los valores globales están calculados de media en el CONUS este de las Rocosas, y los Estudiados sólo incluyen zonas delineadas por el predictor cuando define las perturbaciones. Los valores por encima de las barras indican el cambio de porcentaje de la verificación global a la estudiada. QII se refiere a la media de la desviación estándar de Q a 1000, 850 y 700 hPa.

4 Verificación de previsiones de tiempo severo

A diferencia de las previsiones confeccionadas por predictores humanos, los modelos actuales no prevén explícitamente el tiempo severo. El diagnóstico de tiempo severo a partir de análisis o modelos que no resuelven explícitamente la convección puede ser deducido, al menos en parte, a través de indicios que caracterizan el ambiente favorable y pueden permitir algunas discriminaciones básicas respecto al tipo o de la intensidad de los fenómenos convectivos. En este estudio, se considera que un modelo prevé tiempo severo cuando en una caja de la cuadrícula ambos el *Supercell Composite Parameter* (Thompson et al., 2002, SPC) > 1 y la activación del modelo tienen lugar simultáneamente. Juntas, estas dos cantidades especifican regiones donde el modelo predice conjuntamente un ambiente favorable a las tormentas supercelulares, y donde se desarrolla la convección.

Por lo tanto, la probabilidad de que haya tiempo severo durante un período de 24 h en cada punto de cuadrícula se define sencillamente como el número de miembros del conjunto que tienen un SCP superior a 1 y precipitación simultánea convectiva en ese punto de cuadrícula en cualquier momento durante ese período de 24 h, dividido por el número total de miembros del conjunto. La figura 1c muestra un ejemplo de este campo de probabilidad del MM5ADJ.

La verificación de las previsiones probabilísticas para todos los casos se hace utilizando el diagrama de atributos. Este diagrama muestra la frecuencia observada de un acontecimiento

como una función de la categoría de predicción y permite una interpretación para cada categoría de predicción separadamente. La figura 2 muestra el diagrama de atributos para todas las previsiones comparadas en este estudio. La frecuencia climatológica de la muestra es 0.016 registros de acontecimientos de tiempo severo por punto de cuadrícula durante 24 h. Como era de esperar para la predicción de acontecimientos improbables, todas las previsiones de la comparación muestran una buena capacidad en predecir la ausencia de acontecimientos severos (0.00 probabilidades), con las previsiones humanas mostrando la más alta fiabilidad en esta categoría. Para las probabilidades bajas (0.05) y moderadas (0.15), el MM5ADJ y el SREF son las únicas previsiones que muestran una cierta competencia, con una fiabilidad especial buena para el SREF en las predicciones de baja probabilidad.

Para las probabilidades más altas (cuando una mayoría de los miembros del conjunto está de acuerdo), el MM5ADJ es el único modelo que muestra un poco de competencia en la categoría de probabilidad de 0.35 y todavía existe alguna resolución entre las previsiones de 0.25 y 0.35. Sin embargo, las previsiones humanas muestran competencia en las categorías de alta probabilidad, revelando la habilidad de los predictores cuando muestran mucha seguridad en la intensidad de la situación del día y deciden utilizar las probabilidades altas en las previsiones. En cambio, las previsiones del modelo Eta son claramente inferiores en este tipo de verificación de probabilidad, mostrando una clara sobrepredicción de tiempo severo. Aunque los resultados del SREF muestren una fiabilidad casi perfecta para la categoría baja, no tiene competen-

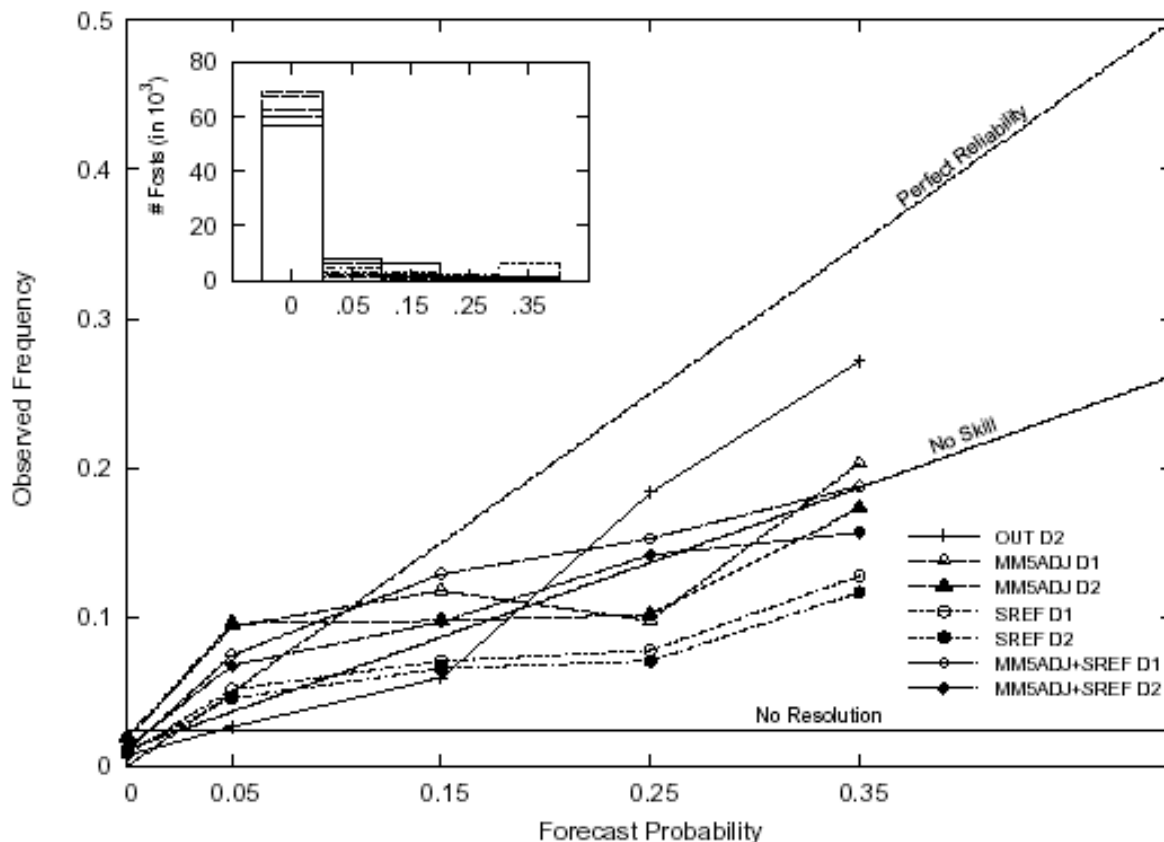


Figura 4. Como en la Fig. 2 pero para el sistema de 42 ENS.

cia para las categorías de probabilidad más alta. La significancia estadística de las diferencias entre los resultados del MM5ADJ y del SREF ha sido evaluada utilizando un test no-paramétrico de *bootstrap* con 10000 muestras. La mayoría de las diferencias entre el MM5ADJ y el SREF visibles en la figura 2 son importantes en un nivel de confianza del 99%.

Este resultado muestra con claridad la ventaja del MM5ADJ sobre el SREF a la hora de predecir probabilidades de tiempo severo a partir de 0.15, normalmente asociado con los episodios más intensos y perjudiciales. Esto es muy probablemente consecuencia del diseño adaptado del MM5ADJ para centrarse en las zonas de amenaza de tiempo severo, mientras que el sistema SREF está diseñado para cubrir una amplia gama de aspectos de previsión de mesoescala y muestra su fuerza en la parte del espectro de episodios severos de baja probabilidad.

4.1 Dispersión dirigida

Para entender mejor las diferencias entre los sistemas MM5ADJ y SREF a la hora de predecir episodios de alta probabilidad (0.25) de tiempo severo, analizamos la capacidad del MM5ADJ para generar dispersión especialmente so-

bre las zonas en cuestión definidas por el predictor. Se calculan dos versiones de la dispersión para cada modelo (figura 3): la dispersión Global es la media de la dispersión calculada en cada sitio de sondeo dentro del CONUS, al este de las Montañas Rocosas; la dispersión estudiada se calcula teniendo en cuenta sólo la previsión de los lugares de sondeo dentro de las zonas en cuestión y los tiempos designados por el predictor cuando construye el conjunto. El aumento relativo de dispersión de la global a la estudiada es mucho mayor en el MM5ADJ que en el SREF, especialmente en los niveles bajos donde se obtienen aumentos de dispersión del 65 al 70%. Por lo tanto, la técnica de los vectores de *breeding* (así como la diversidad de modelo) en el sistema SREF produce una gran dispersión en un sentido global, mientras que el adaptado MM5ADJ apunta con éxito a la dispersión de conjunto espacial y temporalmente por encima de la región seleccionada por el predictor.

5 Test del conjunto mixto

Para comprobar el efecto de añadir miembros al sistema MM5ADJ que proporcionan dispersión a lo largo de todo

el dominio, evaluamos las predicciones de un conjunto generado combinando los 32 miembros del MM5ADJ y los 10 del SREF para producir un conjunto de 42 miembros (42 ENS). Este conjunto no sólo se beneficiará de un gran número de miembros sino también de ser multimodelo y de incluir dos técnicas de perturbación de condiciones iniciales. Este conjunto todavía está centrado principalmente en el tiempo severo pero también podría beneficiarse de los mejores resultados a nivel global de los 10 miembros del SREF.

Las previsiones de tiempo severo para este sistema se generan para los 42 ENS siguiendo el mismo método presentado en la sección anterior. El test no-paramétrico de *bootstrap* también se utiliza para comprobar la significancia estadística de las diferencias entre los resultados de los 42 ENS y los del MM5ADJ. La curva del diagrama de atributos para las previsiones de los 42 ENS muestra una competencia superior de esta configuración comparada con el MM5ADJ para casi todos los intervalos de probabilidad (Fig. 4). Sólo para las categorías del 15 y del 30%, los 42 ENS no aportan resultados significativamente mejores que el MM5ADJ tanto para el Día 1 como para el 2.

6 Conclusiones

El *Spring Program 2003* del SPC/NSSL incluía un conjunto experimental enfocado a comprobar para un período de tiempo extenso el método de generación de predicciones por conjuntos de Xu et al. (2001) propuesto, utilizando predictores humanos para identificar características atmosféricas que ellos creían importantes para el desarrollo y la evolución del tiempo severo durante el período de previsión de 24-48 h. Utilizando un modelo adjunto, se identifican y se utilizan perturbaciones de las condiciones iniciales del modelo de previsión que influenciarían estas características atmosféricas seleccionadas por el predictor para crear un conjunto de previsiones de modelo. El rendimiento de este conjunto experimental se evalúa utilizando registros de tiempo severo.

El experimento fue diseñado para funcionar a tiempo real, con la esperanza inicial de que los predictores tendrían tiempo para examinar y comprobar las previsiones de conjunto y ganar experiencia en la selección de los campos de perturbación, los niveles verticales, y las zonas. Desgraciadamente, las limitaciones de los ordenadores no permitieron que se diera esta experiencia de aprendizaje ya que las previsiones estaban disponibles a una hora demasiado tardía del día. Así, a los predictores sólo se les dieron consejos básicos sobre cómo generar las perturbaciones. Hay muchos otros aspectos del experimento que son imperfectos y que deberían mejorarse en nuevas ediciones futuras de experimentos similares. Aún así, los resultados iniciales son sugerentes y garantizan consideraciones curiosas.

Los resultados de las verificaciones muestran el valor de las previsiones experimentales del sistema por conjuntos

MM5ADJ comparadas con el sistema operacional SREF, a pesar de las múltiples mejoras todavía posibles para el sistema experimental. En el experimento se utiliza sólo un modelo, siendo las perturbaciones seleccionadas por los humanos la única fuente de dispersión en el sistema. Aunque se proporcionara una formación básica al principio de cada semana experimental del SP03 cubriendo una selección de campos, niveles, medidas, y tiempo de las estructuras estudiadas, no se dieron normas definitivas a los predictores sobre la construcción de las perturbaciones, porque antes eso no había sido nunca dirigido como un experimento a tiempo real. Además, los predictores no tenían experiencia previa con este tipo de creación de conjuntos y no se les proporcionó realimentación cuantitativa durante el experimento. Investigaciones posteriores podrían indicar si ciertas medidas, ciertos campos y niveles son más adecuados para definir las perturbaciones para unos tipos específicos de tiempo pronosticado.

A pesar de la falta de conocimiento y experiencia previos utilizando esta técnica, el conjunto experimental muestra una mejora en las previsiones numéricas de tiempo severo, argumentable porque el sistema es capaz de generar satisfactoriamente dispersión sobre las áreas escogidas por el predictor. Sin embargo, las previsiones de baja probabilidad de tiempo severo obtenidas del sistema experimental son menos precisas que las del SREF y del Eta operacional. Una conclusión clara de estos resultados es que a este conjunto, adaptado para centrarse exclusivamente en tiempo peligroso y de alta intensidad, le falta dispersión global y aporta previsiones no fiables para los acontecimientos de tiempo no-peligroso. Los resultados de un conjunto construido combinando miembros globalmente perturbados (del SREF) y miembros humanamente perturbados (del MM5ADJ) muestran una capacidad de predicción prometedora para las previsiones de tiempo severo. Mientras que el montaje experimental no va a ser perfecto, los resultados indican que el valor de los seres humanos en la creación de conjuntos diseñados para centrarse en tiempo severo específicamente es potencialmente grande.

Se recomienda vigorosamente más investigación del valor potencial de la intervención del ser humano como parte del proceso de creación del conjunto de predicciones, incluso si el resultado final es el de aprender cómo los predictores pueden proporcionar input de tiempo real en un sistema de generación de conjuntos automatizado. Todavía tenemos mucho que aprender sobre cómo crear sistemas de predicción por conjuntos para previsiones de corto alcance de tiempo de alto impacto, y tenemos que hacer mejor uso de las habilidades y la experiencia de los predictores humanos en este proceso de aprendizaje.

Referencias

Brooks, H., Doswell-III, C. A., y Kay, M. P., 2003: *Climatological estimates of local daily tornado probability for the united states*,

- Weather Forecast., **18**, 626-640.
- Buizza, R. y Palmer, T. N., 1995: *The singular vector structure of the atmospheric general circulation*, J. Atmos. Sci., **52**, 1434–1456.
- Errico, R. M., 1997: *What is an adjoint model?*, Bull. Amer. Meteorol. Soc., **78**, 2577–2591.
- Leith, C. E., 1974: *Theoretical skill of monte carlo forecasts*, Mon. Weather Rev., **102**, 401–418.
- Olson, D. A., Junker, N. W., y Korty, B., 1995: *Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC*, Weather Forecast., **10**, 498–511.
- Shapiro, M. A. y Thorpe, A. J., 2004: *Thorpex international science plan*, Tech. rep. World Meteorological Organization, **Version 3**.
- Thompson, R. L., Edwards, R., y Hart, J. A., 2002: *Evaluation and interpretation of the supercell composite and significant tornado parameters at the storm rediction center*, 21st Conference on Severe Local Storms, Amer. Meteorol. Soc., San Antonio, TX, USA, pp. J11–J14.
- Toth, Z. y Kalnay, E., 1993: *Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations*, Bull. Amer. Meteorol. Soc., **74**, 2317–2330.
- Xu, M., Stensrud, D. J., Bao, J.-W., y Warner, T. T., 2001: *Applications of the adjoint technique to short-range ensemble forecasting of mesoscale convective systems*, Mon. Weather Rev., **129**, 1395–1418.