

# Progresos para lograr predicciones climatológicas estacionales e interanuales fiables y útiles

Por T. N. PALMER\*

*Este artículo, basado en una conferencia científica presentada en el Consejo Ejecutivo de la OMM de 2004, describe los avances realizados en el campo de la predicción climatológica estacional. A través del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), la OMM ha jugado un papel crucial en el desarrollo de la predicción climatológica estacional. Por ejemplo, en el proyecto sobre los Océanos Tropicales y la Atmósfera Mundial (TOGA), se estableció el paradigma básico de que las interacciones entre el aire y el mar, sobre todo las asociadas a El Niño, pueden transmitir predictibilidad estacional a partes remotas de la atmósfera mundial. El proyecto de estudio de la Variabilidad y Predictibilidad del Clima, CLIVAR, continuación del TOGA, elevó la predicción climatológica estacional a un estado en el que eran posibles las predicciones operativas basadas en los modelos globales acoplados océano-atmósfera. Los proyectos de aplicaciones como los Servicios de Información y Predicción del Clima (SIPC) de la OMM están explorando en la actualidad el potencial de la predicción climática estacional para el beneficio del conjunto de la sociedad.*

348

## Introducción

La transición de la investigación a las operaciones y a las aplicaciones potenciales requiere que las predicciones estacionales sean fiables. Como se dice más adelante, esto significa que debemos tener un conocimiento claro de las incertidumbres implicadas en las predicciones estacionales y ser capaces de expresar estas incertidumbres en forma de "barras de error" de las predicciones. De esta forma, el usuario puede saber la certidumbre que es posible que tengan las predicciones. Una de las incertidumbres clave en la predicción climatológica está asociada a procedimientos mal definidos en la representación informática de las ecuaciones básicas del movimiento del clima. En este artículo se aborda el diseño de sistemas fiables de predicción estacional utilizando conjuntos de varios modelos y su correspondiente aplicación a actividades sanitarias, agrónomas y de gestión del agua.

## ¿Qué es la predictibilidad?

Hace poco se celebraron los logros conseguidos por el CLIVAR durante la mitad de su vida en una importante conferencia en Baltimore, en los EE.UU., que atrajo a más de 600 participantes. La declaración de la misión del CLIVAR es:

*Observar, simular y predecir el sistema climático de la Tierra, centrándose en las interacciones entre el océano*

*y la atmósfera, para tener un mejor conocimiento de la variabilidad, la predictibilidad y el cambio del clima, para beneficio de la sociedad y del medio ambiente en el que vivimos.*

Como enuncia esta declaración, un objetivo del CLIVAR es un mejor conocimiento de la predictibilidad del clima. Otro objetivo es hacer posible que dicho conocimiento beneficie a la sociedad en general. ¿Son estos objetivos secuenciales? ¿Deberíamos tratar de aplicar la ciencia del CLIVAR sólo cuando podamos cuantificar primero completamente la predictibilidad del clima? El objetivo de esta sección es sugerir que el estudio de la predictibilidad no es la búsqueda de una "torre de marfil" sino algo que está intrínsecamente ligado a las aplicaciones para las que se hacen las predicciones. Los dos objetivos son, en cierto modo, paralelos y complementarios.

Para lograrlo, hagámonos una pregunta: ¿qué queremos decir exactamente con predictibilidad? Consideremos una variable meteorológica como, por ejemplo, la temperatura media estival en Ginebra. La variación interanual de esta variable puede describirse en términos de una distribución de probabilidad climatológica, representada esquemáticamente por la curva continua de la Figura 1(a) de una distribución normal o gaussiana.

Ahora, supongamos que tenemos un sistema de predicción que predice la distribución de probabilidad de la temperatura media estival de Ginebra con una estación de anticipo. Dicho sistema se basa, necesaria-

\* Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Medio Plazo (CEPMMP), Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, Reino Unido.

mente, en la metodología de la predicción por conjuntos, que se trata después. Supongamos que dicho sistema predice, para un verano particular, la curva discontinua de la Figura 1(a). Las dos distribuciones de probabilidad son claramente distintas, lo que indica una predictibilidad inequívoca para esta predicción estival: que la temperatura media estacional estará por encima de la media.

¿Y qué hay de la situación de la Figura 1(b)? A lo largo de la mayor parte del rango de temperatura, la diferencia entre la distribución de probabilidad de la predicción y la distribución de probabilidad climatológica es pequeña. Entonces, podríamos inclinarnos a de-

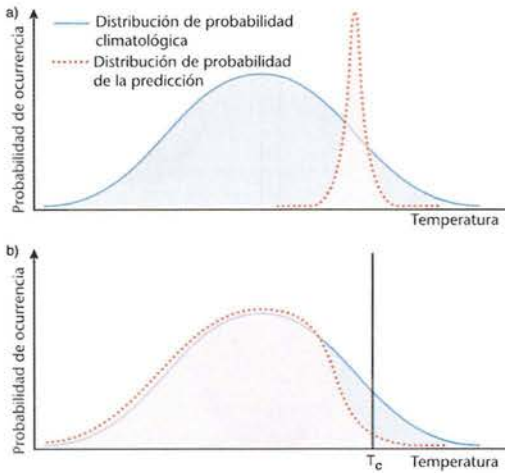


Figura 1 — (a) La línea continua es una ilustración esquemática de la probabilidad climatológica de una variable climatológica, como la temperatura superficial estacional media de Ginebra. La línea discontinua es una ilustración esquemática de la distribución de probabilidad de la predicción estacional que muestra una predictibilidad clara; (b) igual que (a) pero para una distribución de probabilidad de la predicción cuyo nivel global de predictibilidad es pequeño. Sin embargo, para ciertas aplicaciones que necesitan saber si la temperatura sobrepasa o no algún umbral, puede haber una predictibilidad importante.

cir que, en esta situación, la predictibilidad es, igualmente, bastante pequeña. Pero supongamos que estamos interesados sobre todo en la prevalencia de cierta enfermedad sensible a la meteorología, llamémosla "X", que sólo se propaga si la temperatura sobrepasa cierto umbral  $T_c$ , o supongamos que cierto cultivo "Y" no prospera si la temperatura sobrepasa  $T_c$ . Entonces, para estas aplicaciones sanitaria y agrícola, esta distribución de probabilidad de la predicción particular implicaría una predictibilidad muy útil e importante: que predice que la probabilidad de que la enfermedad X se propague o de que el cultivo

"Y" no prospere es muy pequeña para la próxima estación.

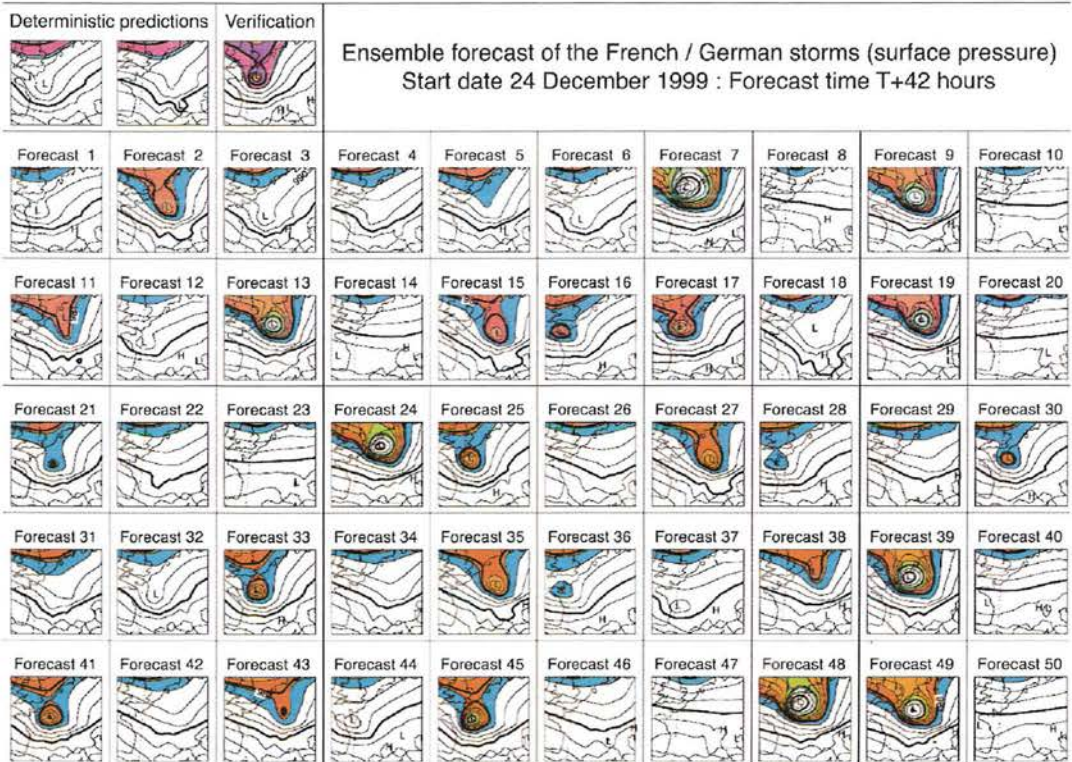


Figura 2 — Mapas de presión en superficie de la predicción por conjuntos a 42 horas del CEPMMF para el temporal fuerte Lothar



Estos dos ejemplos específicos (X e Y) son simplistas; sin embargo, el tema está en que la evaluación de si existe o no la predictibilidad está inherentemente unida a las aplicaciones para las que se utilizan las predicciones estacionales. Ciertamente, esto lleva a una definición plausible de la predictibilidad: una variable x es predecible si la distribución de probabilidad de la predicción de x difiere lo suficiente de la distribución de probabilidad climatológica para influir a los encargados de la toma de decisiones implicados.

Más adelante se ofrecen algunos ejemplos más realistas de este enfoque basado en las aplicaciones al tema de la cuantificación de la predictibilidad del clima. Sin embargo, hay que decir primero algunas palabras sobre cómo pueden hacerse las distribuciones de probabilidad de la predicción. Comencemos considerando la predicción meteorológica.

### Predicción meteorológica por conjuntos

Como todos sabemos, nunca se conocen perfectamente las condiciones iniciales para una predicción meteorológica. Sin embargo, con los superordenadores modernos podemos ejecutar modelos de predicción meteorológica muchas veces a partir de condiciones iniciales ligeramente distintas, coherentes con las incertidumbres: en el CEPMMP ejecutamos el modelo de predicción a medio plazo 52 veces dos veces al día. Las predicciones resultantes pueden combinarse para obtener una distribución de probabilidad de la predicción.

La Figura 2 es un ejemplo de una predic-



Figura 3 — La base científica de la predicción por conjuntos ilustrada utilizando el modelo prototipo de Lorenz (1963) del caos de orden bajo, que muestra que la predictibilidad de un sistema no lineal depende del flujo.

ción por conjuntos a 42 horas del infame y altamente dañino temporal *Lothar* de diciembre de 1999. La principal predicción determinista de alta resolución del CEPMMP erró completamente con este temporal. En este caso particular, la dispersión de los conjuntos del CEPMMP era enorme, lo que indica que el desarrollo del flujo era muy impredecible. Sin embargo, a pesar de esta impredecibilidad, los conjuntos indicaron una probabilidad significativa, o riesgo, de que se produjera un episodio de tiempo severo. Por supuesto, las predicciones meteorológicas a 42 horas no son generalmente tan impredecibles.

La base científica de la predicción por conjuntos se puede demostrar utilizando el modelo matemático original de Lorenz para el caos, que está basado en una simplificación de las ecuaciones de movimiento de la atmósfera, como se muestra en la Figura 3. Se muestra la evolución de tres conjuntos distintos. El tema es que, debido a que las ecuaciones fundamentales no son lineales, el crecimiento de la incertidumbre inicial depende enormemente de las condiciones iniciales. La parte práctica de esto es que la predictibilidad de las predicciones es variable; necesitamos conjuntos que nos digan con antelación lo predecible que es el sistema climático.

Hay muchas formas de demostrar la pericia de una predicción por conjuntos. Sin embargo, las predicciones por conjuntos también son valiosas económicamente para predecir el riesgo sensible a la meteorología (Palmer, 2002). Un modo convincente de demostrar el valor de las predicciones

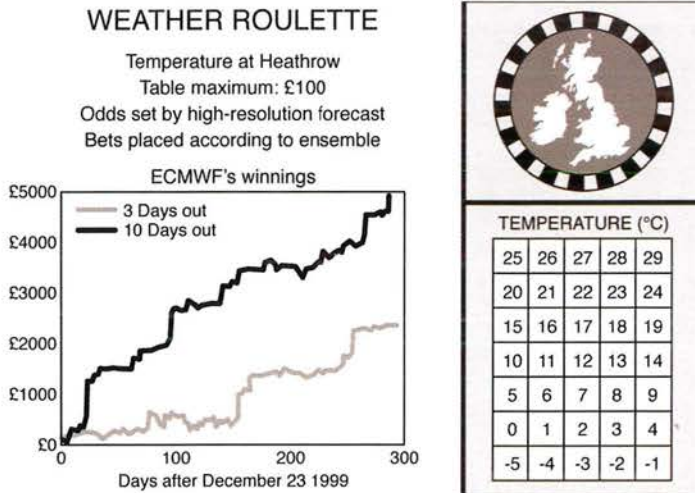


Figura 4 — Evaluación del valor económico del Sistema de Predicción por Conjuntos del CEPMMP, en comparación con la predicción determinista (Roulston y Smith, 2005).

**EPS Meteogram**  
**Geneva 46.0° N 5.8° E**  
**Deterministic Forecasts and EPS Distribution 18 August 2004 00 UTC**

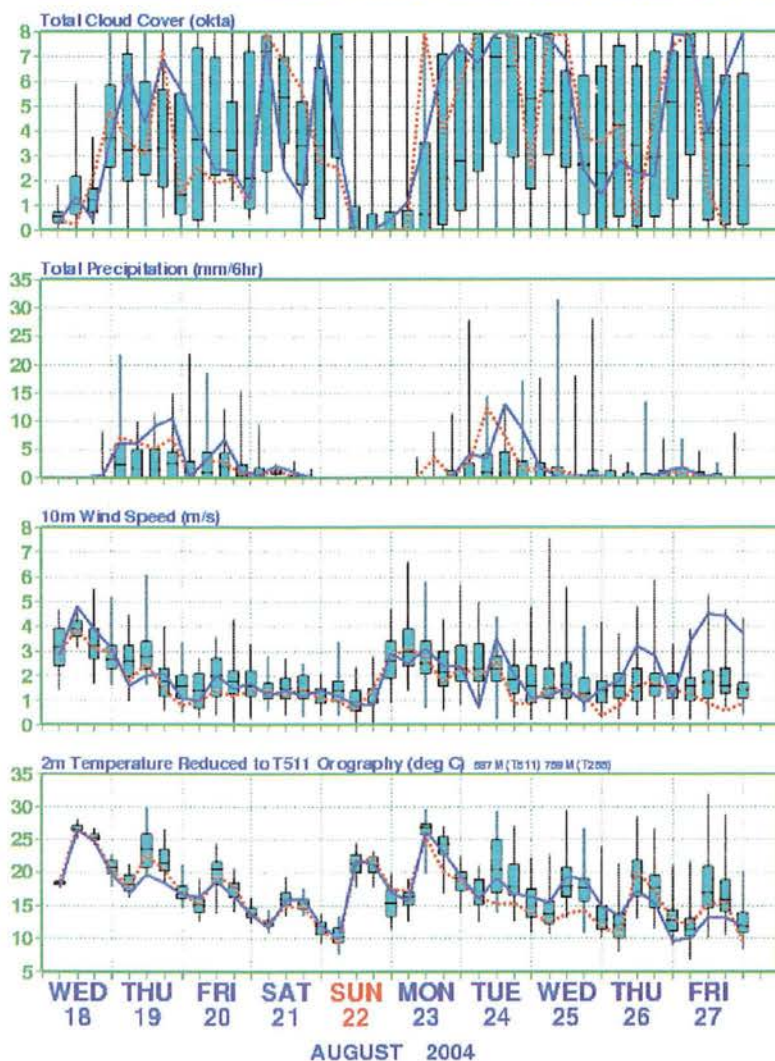


Figura 5 — Ejemplo de un meteograma rutinario del sistema de predicción por conjuntos de medio plazo del CEPMMMP. Definitivamente, va a estar más frío y más seco durante el próximo fin de semana aunque, de manera interesante, las temperaturas tienen más incertidumbre para el jueves 19 de agosto que para el sábado 21 de agosto.

meteorológicas por conjuntos frente a las predicciones deterministas convencionales es a través del tipo de análisis que se ilustra en la Figura 4, obtenido mediante una colaboración entre el CEPMMMP y la Escuela de Económicas de Londres. Imaginemos un casino que acepte apuestas sobre la temperatura de Londres-Heathrow para los días siguientes. Un jugador apuesta a ciertas temperaturas en relación a la probabilidad de que ocurran según predice el sistema de predicción por conjuntos del CEPMMMP. Por el contrario, el casino paga según la predicción hecha por la predicción determinista de alta resolución del CEPMMMP. Para evitar que la banca acabe en ban-

carrota en poco tiempo, se adereza la predicción de alta resolución aplicando una distribución de probabilidad gaussiana basada en su error pasado promedio. La Figura 4 muestra que el jugador ganará dinero a la banca tanto al principio como al final del plazo medio: más con el último que con el primero.

Antes de volver al problema de la predicción climatológica estacional, quiero hablar del problema de cómo puede utilizarse la predicción por conjuntos en los medios de comunicación. De hecho, en algunos países europeos ya se está utilizando la predicción por conjuntos. A menudo se afirma que no hay suficiente tiempo de emisión para hablar de probabilidades y que, de cualquier modo, puede que el público no entienda estas probabilidades. Mi propia opinión sobre este tema es que este asunto puede resolverse haciendo un uso mejor de Internet. Los predictores de los medios de comunicación deberían destacar que sus predicciones son los escenarios más probables, pero, por razones científicas perfectamente válidas (cf. Figura 3), las predicciones tienen, necesariamente, incertidumbres, unas veces más que

otras. Entonces los predictores pueden citar algún sitio en la red donde se puedan mostrar las predicciones probabilísticas al menos para ciudades importantes, p. ej., como en el ejemplo de la Figura 5 (para Ginebra).

### Predicción por conjuntos para la predicción climatológica estacional

Volvamos ahora a la predicción climatológica estacional. La base física de la predicción climatológica estacional descansa en los componentes del clima que varían lentamente en comparación con los episodios meteorológicos



individuales, es decir, el océano y la superficie terrestre (incluidos los componentes criosféricos). Como es bien sabido (gracias a proyectos como el TOGA y el CLIVAR), El Niño es el fenómeno prototipo con predictibilidad en la escala estacional. Para predecir el clima estacional por medios dinámicos, se necesitan modelos totalmente acoplados de océano, tierra y atmósfera. Como en la predicción meteorológica, las predicciones por conjuntos que utilizan estos modelos acoplados ofrecen predicciones probabilísticas de riesgo de episodios climatológicos. Sin embargo, para la predicción estacional por conjuntos es esencial tener en cuenta no solo la incertidumbre en las condiciones iniciales, sino también la incertidumbre en las propias ecuaciones del modelo. Esta última incertidumbre surge porque el proceso de parametrización, el modo en el que se representan los movimientos de escala inferior a la rejilla en los modelos meteorológicos y climatológicos, no es un procedimiento definido con precisión.

Una manera de representar la incertidumbre del modelo es incorporar dentro del conjunto modelos completamente distintos. El sistema de predicción por conjuntos resultante se conoce como sistema multi-modelos. (Hay otras maneras de representar la incertidumbre del modelo, p. ej., la física estocástica (Palmer, 2001)).

En un proyecto reciente de la Unión Europea llamado DEMETER (Palmer, 2004) se han explorado la pericia y la utilidad de los sistemas de predicción por conjuntos multi-modelos. Deméter fue la diosa griega de la fertilidad. Cuando su hija Perséfone fue raptada y llevada al infierno, Deméter lanzó sobre la Tierra una gran helada, de modo que no pudiera crecer ningún cultivo. Finalmente Zeus intervino y se permitió salir a Perséfone durante nueve meses al año. Deméter mantuvo la helada sobre la Tierra durante los tres meses restantes. Sin Deméter no tendríamos estaciones, y, por lo tanto, ¡tampoco proyectos de predicción estacional! De manera más prosaica, DEMETER significa Desarrollo de un Sistema Europeo Multi-Modelos para la Predicción Estacional a Interanual. En este proyecto se aprovecha uno de los puntos fuertes de la investigación climatológica europea: la existencia de modelos climatológicos globales casi independientes, modernos y exhaustivos, desarrollados en numerosos institutos de toda Europa.

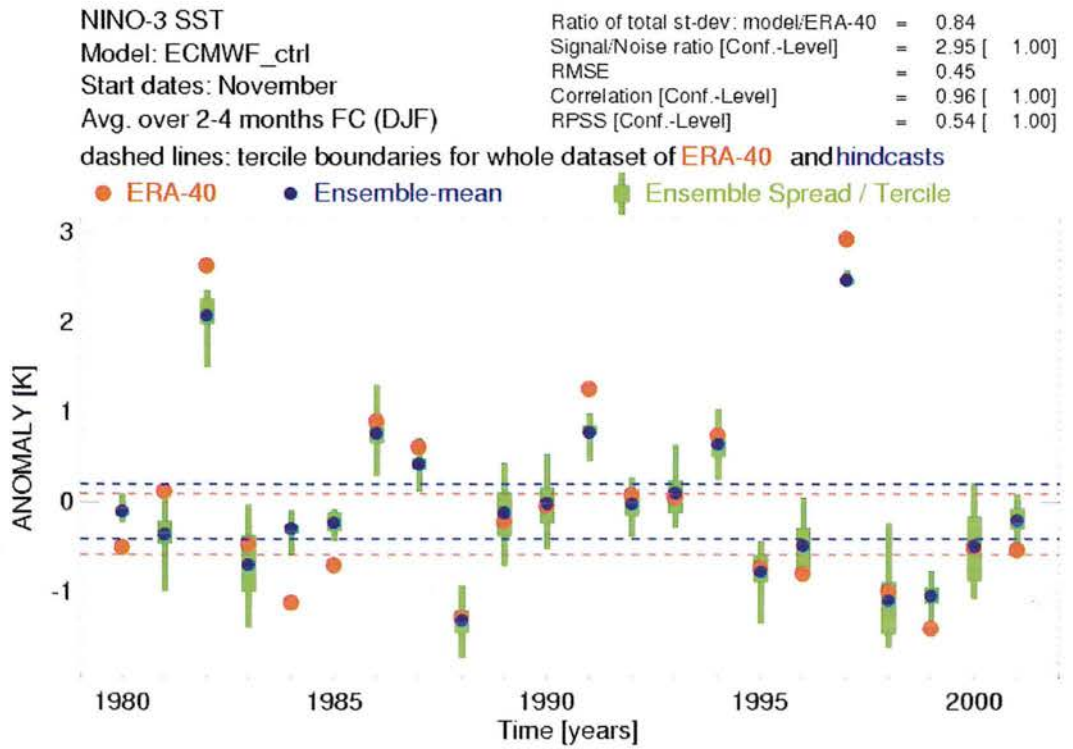
La Figura 6 ofrece un ejemplo de cómo realiza el sistema de predicción multi-modelos DEMETER predicciones estacionales más fiables. Se muestran predicciones de dos a cuatro meses de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar de El Niño a lo largo del período comprendido entre 1980 y 2001. Los puntos rojos muestran las anomalías de la temperatura de la superficie del mar de El Niño, los “cuadros y

barras” verdes muestran la distribución de probabilidad de la predicción de la anomalía de la temperatura de la superficie del mar de El Niño en términos de terciles. Las predicciones de la parte alta de la Figura 6 se basan solo en el modelo del CEPMP. Aunque hay una pericia clara, el sistema por conjuntos no es completamente fiable: hay muchos casos en los que la verificación queda fuera del rango del conjunto. El diagrama inferior es para todo el sistema por conjuntos multi-modelos DEMETER; ahora la verificación casi siempre cae dentro del rango del conjunto. Este es un ejemplo entre muchos que muestran de manera concluyente que el conjunto DEMETER es intrínsecamente más útil y más capaz que las predicciones de ningún otro modelo (p. ej., nacional). Si alguna vez hubo una razón para la colaboración internacional en la predicción climatológica, ¡es esta!

Una parte importante del proyecto DEMETER fue demostrar su valor para las aplicaciones sanitarias y agrícolas. Para estudiar esto de manera cuantitativa, se desarrolló un sistema que utilizaba socios expertos en la reducción de escalas, y socios expertos en la predicción de malaria, por una parte, y en la modelización de cultivos por otra. La Figura 7 es un ejemplo de la distribución de probabilidad de la predicción de DEMETER a 2-4 meses de la prevalencia de la malaria para un punto de rejilla del sur de África (Morse y otros, 2005). Al igual que con la distribución de la temperatura de la superficie del mar de El Niño, se muestran los terciles de la distribución de probabilidad de la predicción. Hay una variabilidad clara interanual, y la “verificación” (basada aquí en la ejecución del modelo de malaria que utiliza la meteorología ERA-40) queda dentro del conjunto de predicción.

Compañeros del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia (Thomson y otros, 2004) han realizado estudios de predicción de la malaria en Botswana utilizando datos de DEMETER. Los autores de este estudio estaban tan impresionados con los resultados del sistema de predicción de DEMETER que afirmaron que ahora es posible llevar a cabo la aspiración de la Declaración de Abuja de los ministros de sanidad africanos, de ofrecer predicciones fiables de la prevalencia de la malaria antes del inicio de las estaciones de lluvia.

La Figura 8 muestra las distribuciones de probabilidad de la predicción a 2-4 meses de DEMETER, pero basadas aquí en la producción de trigo en toneladas/hectárea en países específicos de Europa (Canteloube y Terres, 2005; véase también Marletto y otros, 2005). Aunque solo se han estudiado hasta ahora un número limitado de años, hay pruebas de una predictibilidad útil, y la Dirección General de Agricultura de la Comisión Europea ha mostrado un interés considera-



353

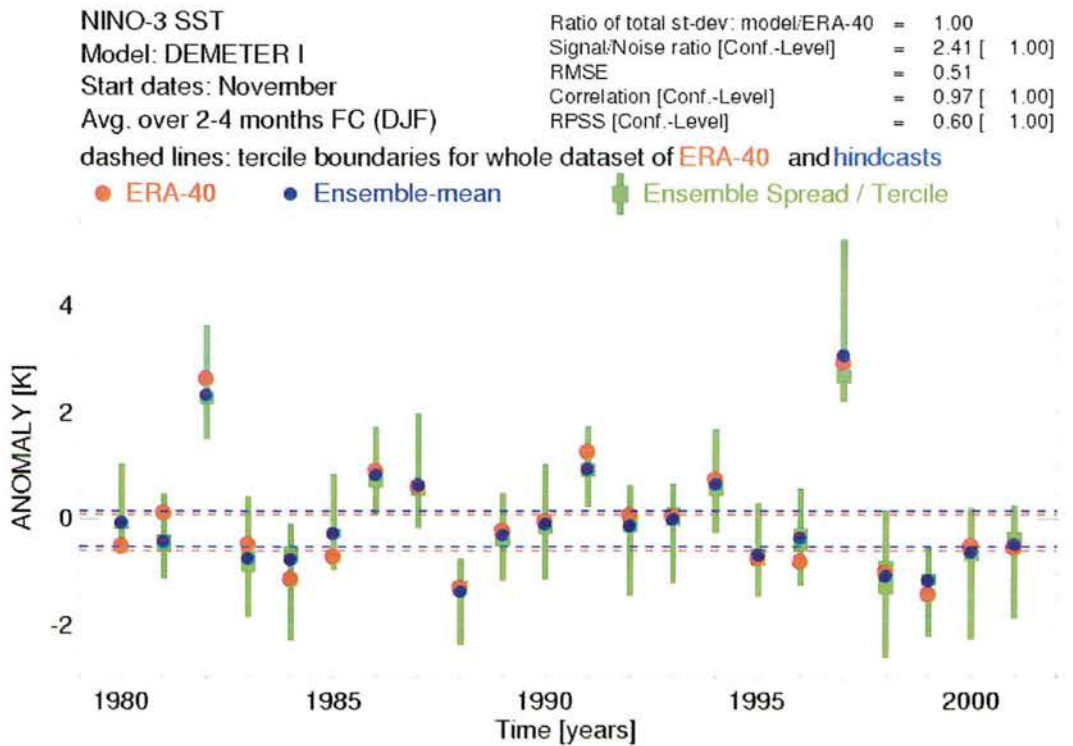


Figura 6 — Arriba: las distribuciones de probabilidad de la predicción estacional de El Niño basadas en el modelo del CEPMMMP dentro del proyecto DEMETER. El punto rojo muestra el valor observado, que a menudo queda fuera de la predicción. Abajo: igual que arriba, pero para el conjunto multi-modelos de DEMETER. La validación queda ahora casi siempre dentro del conjunto. La habilidad probabilística del conjunto multi-modelos de DEMETER es mucho mayor que la del conjunto de un único modelo.



ble en estos productos para sus evaluaciones operativas de producción de cosechas.

Los datos de DEMETER también tienen valor para la predicción de cosechas de cultivos en los trópicos (cacaahuets en Gujrat; Challinor y otros, 2005). También, en colaboración con el Instituto de Tecnología de Georgia y el Instituto Meteorológico de Bangladesh, la pericia de las predicciones de DEMETER acoplado con los modelos hidrológicos para las cuencas hidrográficas de Bangladesh, se utiliza para distribuciones de probabilidad de predicción de crecidas en Bangladesh (P. J. Webster y T. Hopson, comunicación personal).

Se anima a los científicos que deseen evaluar hasta qué punto hay predictibilidad útil en su parte del mundo para aplicaciones particulares de interés a que visiten el sitio Web de DEMETER. Los datos de DEMETER pueden descargarse gratuitamente de este sitio

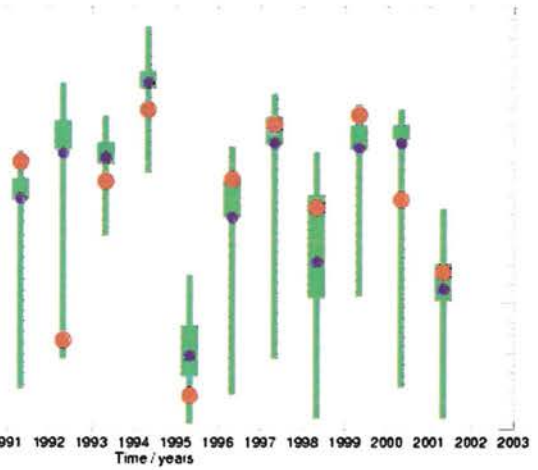


Figura 7 — Distribuciones de probabilidad de la predicción de la prevalencia de la malaria en el sur de África, basadas en el sistema por conjuntos multi-modelos de DEMETER acoplado con un modelo de predicción de malaria. El punto azul indica el valor medio del conjunto, y el punto rojo indica la prevalencia de la malaria cuando se fuerza el modelo de malaria con los análisis de rejilla de ERA-40 (la llamada validación en 2 niveles) (Fuente: Morse y otros, 2005).

Web, al igual que los datos de ERA-40 para validaciones.

Los resultados del proyecto DEMETER se basan en “repredicciones” a largo del período ERA-40 de reanálisis. Sin embargo, una herencia de DEMETER es un sistema de predicción estacional en tiempo real, basado actualmente en los modelos climatológicos del

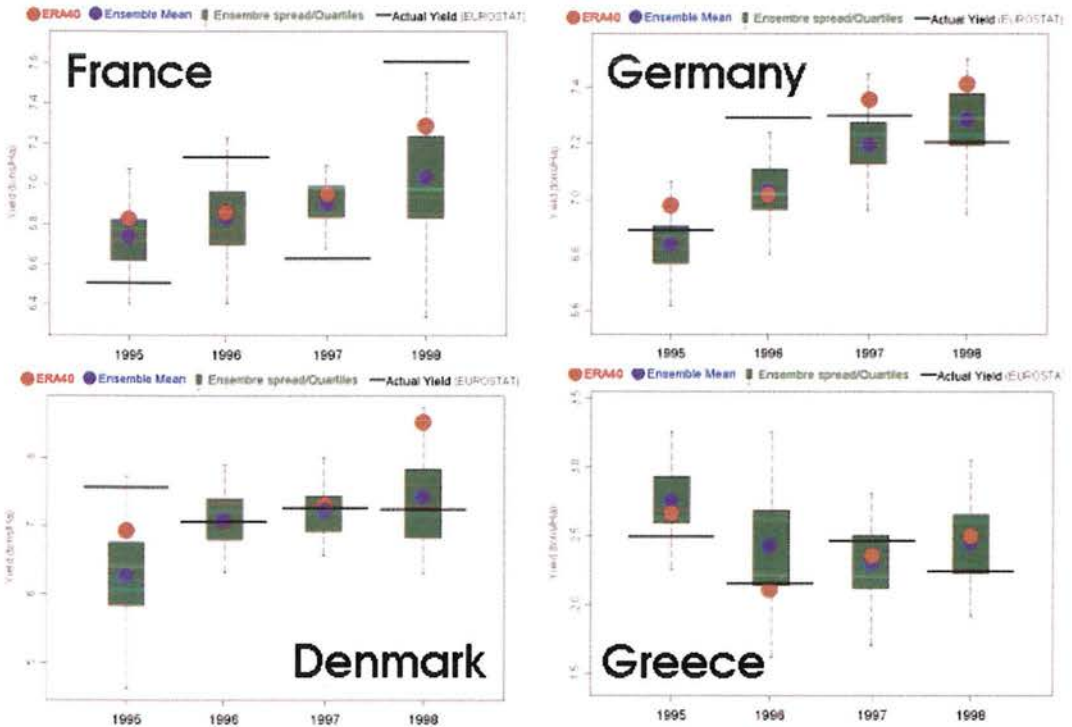


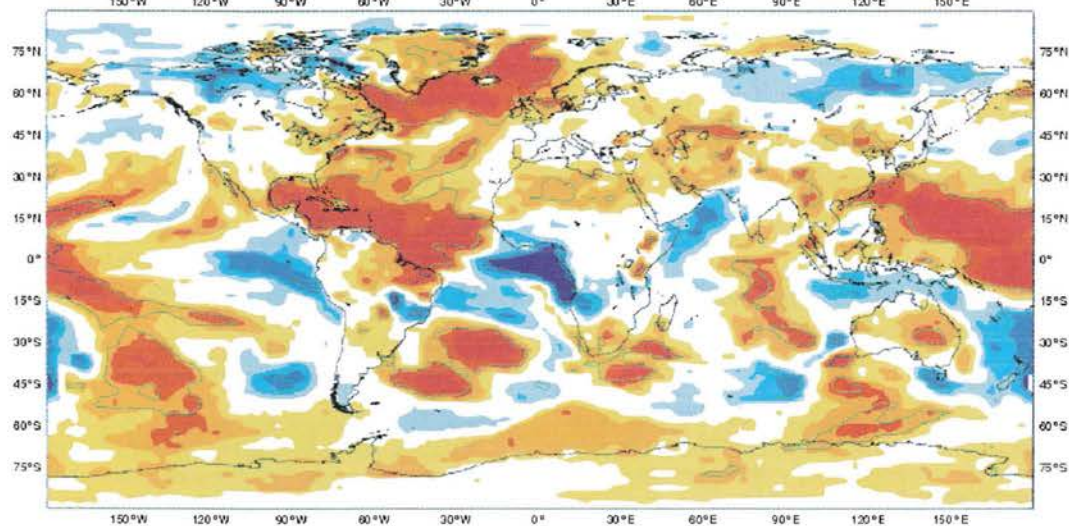
Figura 8 — Distribuciones de probabilidad de la producción de trigo para distintos países de Europa, basadas en las repredicciones multi-modelos de DEMETER (tomado de Canteloube y Terres, 2005). El punto azul indica el valor medio del conjunto, y el punto rojo indica la producción de la cosecha cuando el modelo de cosechas se fuerza con los análisis de rejilla de ERA-40. Las barras indican la producción de Eurostat.

## ECMWF Multi-model Seasonal Forecast Prob (2m temperature > median)

Forecast start reference is 01/04/04  
Ensemble size = 40, climate size = 75

ECMWF(S2)/UKMO  
JJA 2004

Solid contour at 1% significance level



## ECMWF Multi-model Seasonal Forecast Prob (precipitation > median)

Forecast start reference is 01/04/04  
Ensemble size = 40, climate size = 75

ECMWF(S2)/UKMO  
JJA 2004

Solid contour at 1% significance level

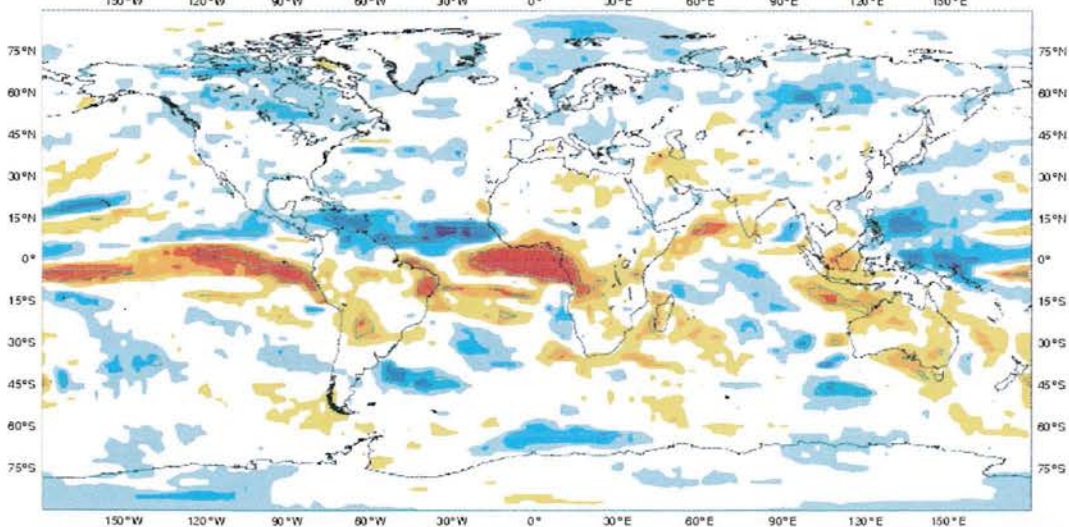


Figura 9 — Ejemplo de una predicción estacional de múltiples modelos en tiempo real, basada en los modelos de predicción estacional del Met Office, del Reino Unido y del CEPMMMP

CEPMMP, Met Office y Météo-France. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de un par de productos en tiempo real de este sistema en tiempo real.

En este artículo, se ha hablado del valor inherente de las predicciones estacionales para una serie de aplicaciones. Sin embargo, la predicción estacional también juega

un papel en la mejora de la predicción numérica del tiempo, y para la validación de la predicción por conjuntos multi-modelos utilizada para el cambio climático, p. ej. en el proceso AR4 del IPCC. No hay espacio en este artículo para hablar de estos importantes aspectos del trabajo de la predicción estacional.



## Conclusiones

En conclusión, el trabajo reciente para reconocer de manera explícita la incertidumbre inherente en la formulación de modelos climatológicos ha llevado a un sistema fiable de predicción estacional por conjuntos, que puede utilizarse en la sanidad, la agricultura, la hidrología, la gestión del agua y muchas otras aplicaciones. La investigación que conduce a dicho sistema multi-modelos aprovecha la clase de colaboración internacional fomentada por la OMM. El proyecto DEMETER seguirá desarrollándose en el proyecto FP6 ENSEMBLES de la UE que, a su vez, contribuirá de manera importante a la nueva iniciativa COPES del PMIC. El sistema multi-modelos está siendo evaluado en la actualidad dentro de la predicción numérica del tiempo como parte del proyecto THORPEX.

## Referencias

- CANTELOUBE, P. y J.-M. TERRES, 2005: Use of seasonal weather forecasts in crop yield modelling. Aparecerá en *Tellus 57A* (también disponible en: <http://www.ecmwf.int/research/demeter/news/tellusa.html>).
- 356 CHALLINOR, A. J., J. M. Ó, T. R. WHEELER y F. J. DOBLAS-REYES. Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles. Aparecerá en *Tellus 57A* (también disponible en: <http://www.ecmwf.int/research/demeter/news/tellusa.html>).
- HAGEDORN, R., F. J. DOBLAS-REYES y T. N. PALMER, 2004: The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. Aparecerá en *Tellus 57A* (también disponible en: <http://www.ecmwf.int/research/demeter/news/tellusa.html>).
- LORENZ, E. N., 1963: Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.* 42: 433-471.
- MARLETTO, V., F. ZINONI, L. CRISCUOLO, G. FONTANA, S. MARCHESE, A. MORGILLO, M. R. M. VAN SOETENDAEL, E. CEOTTO y U. ANDERSON, 2005: Evaluation of downscaled DEMETER multi-model ensemble seasonal hindcasts in Northern Italy by means of a model of wheat growth and soil water balance. Aparecerá en *Tellus 57A* (también disponible en: <http://www.ecmwf.int/research/demeter/news/tellusa.html>).
- MORSE, A. P., F. J. DOBLAS-REYES, M. B. HOSHEN, R. HAGEDORN, M. C. THOMSON y T. N. PALMER, 2005: First steps towards the integration of a dynamic malaria model within a probabilistic multi-model forecast system. Aparecerá en *Tellus 57A* (también disponible en: <http://www.ecmwf.int/research/demeter/news/tellusa.html>).
- PALMER, T. N., 2001: A nonlinear dynamical perspective on model error: a proposal for nonlocal stochastic-dynamic parametrisation in weather and climate prediction models. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 127, 685-708.
- PALMER, T. N., 2002: The economic value of ensemble forecasts as a tool for risk assessment: from days to decades. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 128, 747-774.
- PALMER, T. N., A. ALESSANDRI, U. ANDERSEN, P. CANTELOUBE, M. DAVEY, P. DÉLÉCLUSE, M. DEQUÉ, E. DÍEZ, F. J. DOBLAS-REYES, H. FEDDERSEN, R. GRAHAM, S. GUALDI, J.-F. GUÉRÉMY, R. HAGEDORN, M. HOSHEN, N. KEENLYSIDE, M. LATIE, A. LAZAR, E. MAISONNAVE, V. MARLETTO, A. P. MORSE, B. ORFILA, P. ROGEL, J.-M. TERRES y M. C. THOMSON, 2004: Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to interannual prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 853-872.
- ROULSTON, M. y L. SMITH, 2005: Weather roulette: demonstrating the value of medium-range ensemble prediction systems. *Weather*. Presentado.
- THOMSON, M. C., S. J. MASON, S. J. CONNOR, T. PHINDELA, F. J. DOBLAS-REYES, R. HAGEDORN, A. P. MORSE y T. N. PALMER, 2004: Malaria epidemics predicted using DEMETER seasonal climate forecasts. Presentado a *Science*.

# Predicción operativa de las tempestades de polvo en China: visión de conjunto

Por ZHANG Guocai y SONG Zhenxin\*

## Introducción

La erosión por el viento constituye un grave problema medioambiental en las regiones áridas y semiáridas de China y en muchas otras partes del mundo. Las zonas desérticas ocupan, aproximadamente, el trece por ciento de la tierra continental de China y son importantes fuentes de tempestades de polvo en Asia.

Estas áreas incluyen las regiones áridas templadas situadas entre los 75°E y 125°E y entre los 35°N y 50°N. Las tempestades de polvo en China se producen sobre todo en primavera e invierno, pero con mayor frecuencia en abril, donde se dan entre un tercio y la mitad del total del año. En primavera, la tierra helada de la superficie está especialmente suelta, favoreciendo la erosión eólica. Los episodios de polvo están impulsados por viento fuerte asociado a un sistema frontal.

\* Centro Meteorológico Nacional de Pekín, China.