

PREDICCIÓN ESTACIONAL DINÁMICA DEL CLIMA Y SUS APLICACIONES

F. J. Doblas-Reyes . European Centre for Medium Range Weather Forecasts

La variabilidad del tiempo en distintas escalas temporales, tales como la diaria, mensual o estacional, es uno de los factores que determina las variaciones en muchos procesos relacionados con la meteorología. El rendimiento de ciertas cosechas o la incidencia de algunas enfermedades tropicales infecciosas son buenos ejemplos de fenómenos influidos por la meteorología. Las variables meteorológicas que suelen controlar la influencia son precipitación, temperatura, radiación, humedad o velocidad del viento. Las predicciones de los sistemas relacionados con el tiempo requieren predicciones de estas variables con varias semanas e incluso meses de antelación. Sin embargo, el carácter caótico del tiempo es una característica comúnmente aceptada e implica que las predicciones detalladas de sus variaciones diarias son de hecho imposibles con una antelación superior a dos semanas. A pesar de ello, las predicciones climáticas estacionales son capaces de facilitar información sobre la evolución climática en el futuro. Esta capacidad procede del hecho de que la variabilidad oceánica en escalas de tiempo estacionales e interanuales es capaz de inducir fluctuaciones en las características del tiempo meteorológico (Neelin et al., 1998). Quizá el ejemplo más familiar de fenómeno climático en el que la dinámica del océano juega un papel esencial en el comportamiento de la atmósfera sea "El Niño" (Trenberth et al., 1998), el cual, con los sistemas disponibles en la actualidad, es predecible en una escala temporal de varios meses.

Las predicciones estacionales se pueden llevar a cabo usando modelos matemáticos del sistema climático. Estos modelos, cuyas predicciones son conocidas como predicciones dinámicas, son una extensión de los métodos numéricos usados para la predicción del tiempo con unos días de antelación. Dichos modelos representan el sistema climático mediante un conjunto de ecuaciones que se resuelven en un supercomputador. Dado que el océano juega un papel fundamental en la predicción a largo plazo, se requieren modelos en los que se representan tanto la atmósfera como el océano, así como su acoplamiento (Stockdale et al., 1998). Además de los sistemas de predicción dinámicos, existen predicciones a largo plazo realizadas con modelos empíricos (Moura y Hastenrath 2004). Estos modelos buscan relaciones estadísticas entre observaciones y condiciones climáticas en un momento determinado. Este artículo, sin embargo se centrará únicamente en la descripción de los métodos y los resultados obtenidos con métodos dinámicos.

Este trabajo intenta ofrecer un resumen de la evolución reciente en predicción estacional, así como de sus aplicaciones en distintos sectores socioeconómicos y de algunas de las futuras líneas de investigación. El texto continúa con una introducción del concepto de la predicción por conjuntos para abordar el problema de la incertidumbre en las condiciones iniciales así como en el desarrollo de los modelos. A continuación, se intenta una descripción más detallada de la aproximación de multimodelo por conjuntos como una solución

pragmática a las distintas incertidumbres que afectan a la predicción estacional dinámica. Luego se presenta la estrategia "end-to-end" para la evaluación de la utilidad de estas predicciones para distintos usuarios y se termina con un breve resumen y una perspectiva de la experimentación que se pretende llevar a cabo en el futuro.

Predicibilidad y Predicción por Conjuntos

La estimación de la predicibilidad del clima depende directamente de las aplicaciones para las que se van a usar las predicciones. Este hecho motiva la siguiente posible definición de predicibilidad: una variable x es predecible si la función de densidad de probabilidad (FDP) de las predicciones de x difiere suficientemente de la FDP climatológica de la misma variable para inducir la decisión de un usuario y obtener un beneficio superior al que se obtendría usando simplemente información climatológica. De esta definición se deduce que la predicción de la FDP, necesaria en los sistemas con incertidumbre, debe ser fiable y precisa.

Las predicciones de la evolución del sistema climático a escala estacional se ven afectadas fundamentalmente por dos fuentes de incertidumbre: falta de precisión en las condiciones iniciales e inadecuación del modelo. Con el fin de disminuir la incertidumbre ligada a las condiciones iniciales, los modelos dinámicos realizan varias predicciones a partir de condiciones iniciales ligeramente diferentes, aunque siempre dentro del margen de error de los análisis atmosféricos u oceánicos. El conjunto de predicciones que resulta puede usarse para predecir la FDP de una variable determinada. Sin embargo, en la predicción estacional es fundamental tener en cuenta también la incertidumbre que se origina al discretizar las ecuaciones de movimiento, de continuidad y termodinámica y al parametrizar distintos procesos que ocurren en escalas espaciales inferiores a la resolución del modelo (Palmer et al., 2005).

En la actualidad, no hay un formalismo adecuado para estimar la FDP de las predicciones teniendo en cuenta directamente la incertidumbre del modelo. Una aproximación práctica se basa en el hecho de que los modelos climáticos globales se han desarrollado de manera casi independiente en instituciones diferentes. Un conjunto de tales predicciones se conoce como conjunto multimodelo (Palmer et al., 2004). Sin embargo, existen otras formas de representar la incertidumbre asociada al modelo, como los esquemas de "física estocástica" (Palmer, 2001) o la aproximación de "perturbación de parámetros" (Murphy et al., 2004). Los posibles beneficios de estos tres métodos se evaluarán en el marco del proyecto europeo ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org>), dentro del cual se llevará a cabo una extensa serie de predicciones climáticas con estos tres métodos y se evaluará su beneficio para una serie de usuarios teniendo en cuenta que las predicciones a largo plazo deben formularse en un marco probabilista.

Predicción estacional multimodelo

El proyecto europeo DEMETER (Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to interannual prediction) permitió ilustrar el método de predicción estacional multimodelo por conjuntos. Palmer et al. (2004) ofrecen un resumen exhaustivo de los modelos acoplados, del diseño experimental, de la estructura del archivo de datos y de los diagnósticos comunes a todos los modelos. El sitio <http://www.ecmwf.int/research/demeter.html> ofrece información adicional.

El sistema DEMETER está compuesto por siete modelos globales acoplados océano-atmósfera. Las incertidumbres en el estado inicial se representaron por medio de un conjunto de nueve condiciones iniciales diferentes. Las condiciones iniciales de la atmósfera y de la superficie continental se tomaron del reanálisis ERA-40. La pericia predictiva del sistema DEMETER se ha evaluado a partir de una serie de predicciones para el pasado durante el periodo 1958-2001, aunque no todos los modelos realizaron simulaciones para todo el periodo. El periodo común a todos los modelos es 1980-2001. Cuatro simulaciones de 6 meses de duración y 9 miembros en el conjunto se realizaron con cada modelo.

Uno de los resultados más interesantes del proyecto es que el sistema de predicción multimodelo produce predicciones más fiables que las realizadas por un único modelo. Un ejemplo de la superioridad del multimodelo aparece en la Figura 1, donde se muestran predicciones de las anomalías (con respecto a la climatología del periodo 1980-2001) de la temperatura de la superficie del mar obtenidas con las cuatro predicciones que se realizaron cada año durante el periodo 1980-2001. En estos resultados, la temperatura de la superficie del mar se ha promediado sobre las regiones central y oriental del océano Pacífico tropical (la región conocida como Niño3.4) con los datos del segundo hasta el cuarto mes de las simulaciones. La Figura 1a muestra los resultados obtenidos con el modelo del ECMWF. Mientras que existe una pericia obvia en las predicciones del modelo del ECMWF (la correlación entre la referencia y la media de cada conjunto es de 0.88), el sistema no es totalmente fiable puesto que la verificación (el valor observado de la variable representado con un círculo rojo) se encuentra demasiado a menudo fuera del rango del conjunto. En el caso de la Figura 1b, el sistema multimodelo por conjuntos DEMETER con 7 modelos y 63 miembros muestra que la verificación se encuentra dentro del rango del conjunto de predicciones, lo que indica que el sistema es fiable. Además, la correlación entre la referencia y la media de cada conjunto es superior al caso anterior, 0.94. Este es un ejemplo, entre muchos otros, en el que el sistema DEMETER demuestra que es más fiable y ofrece una mayor pericia que un modelo individual (Hagedorn et al., 2005; Doblas-Reyes et al., 2005).

El sistema multimodelo DEMETER también ha demostrado pericia predictiva para otras variables y regiones de relevancia como, por ejemplo, para la predicción de producción agrícola (Challinor et al., 2005) o de la incidencia de enfermedades infecciosas en África (Thomson et al., 2005). La Figura 2 muestra la precipitación y la temperatura a dos metros pro-

mediadas sobre Australia para el final de la primavera (con tres meses de antelación) y el verano austral (con un mes de antelación), respectivamente. Estas predicciones tienen una correlación entre la verificación y la media del conjunto de 0.33 y 0.43, respectivamente (ambos valores estadísticamente significativos al 90% de confianza), valores superiores a los de la mayoría de los modelos individuales. Estas variables se usan para la predicción de la producción de cereales de uno de

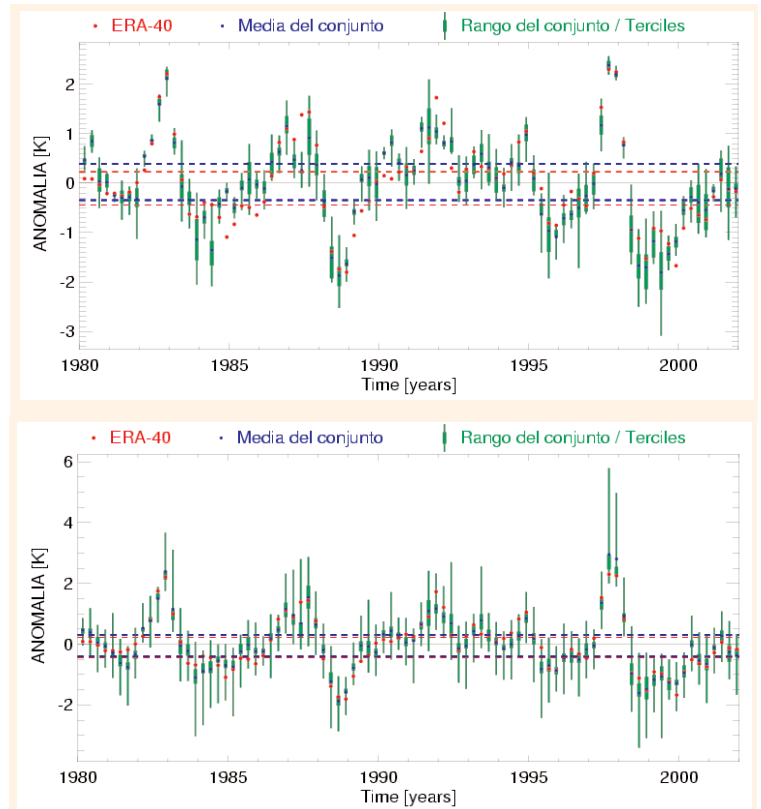


Figura 1

Arriba (a): Predicciones de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar promediadas sobre la región Niño3.4 (Pacífico tropical central) durante el periodo 1980-2001, basadas en el modelo acoplado del ECMWF. Las predicciones se inicializaron el primero de Febrero, Mayo, Agosto y Noviembre y los valores que se muestran corresponden al promedio estacional de los meses segundo a cuarto de la simulación. El círculo rojo corresponde a la verificación, tomada de ERA-40, y se encuentra a menudo fuera del rango del conjunto, representado con los diagramas "box-and-whisker" en verde. Los círculos azules indican la media del conjunto y las líneas horizontales corresponden a los terciles climatológicos de la verificación (en rojo) y de las predicciones (en azul).

Abajo (b): Predicciones correspondientes al conjunto multimodelo DEMETER, con 7 modelos y 63 miembros. La anomalía de referencia (en rojo) ahora se encuentra casi siempre dentro del rango del conjunto. La pericia predictiva, tanto para predicciones deterministas como probabilistas, del sistema multimodelo es superior a la del modelo individual.

los países exportadores que compite en el mercado mundial con la Unión Europea. La Comisión utiliza este tipo de predicciones operativas para otras regiones del mundo, así como predicciones de precipitación, temperatura y radiación diaria sobre Europa para obtener predicciones del rendimiento de una serie de cultivos en los distintos países europeos con el fin de gestionar la política agrícola común.

El proyecto DEMETER concentró gran parte de sus esfuerzos en aplicaciones específicas de la predicción estacional en distintos sectores socioeconómicos con el objetivo de ilustrar los beneficios de la aproximación multimodelo. Quizá una de las aplicaciones más interesantes, y que ofrece los resultados más espectaculares, consiste en la predicción de la incidencia

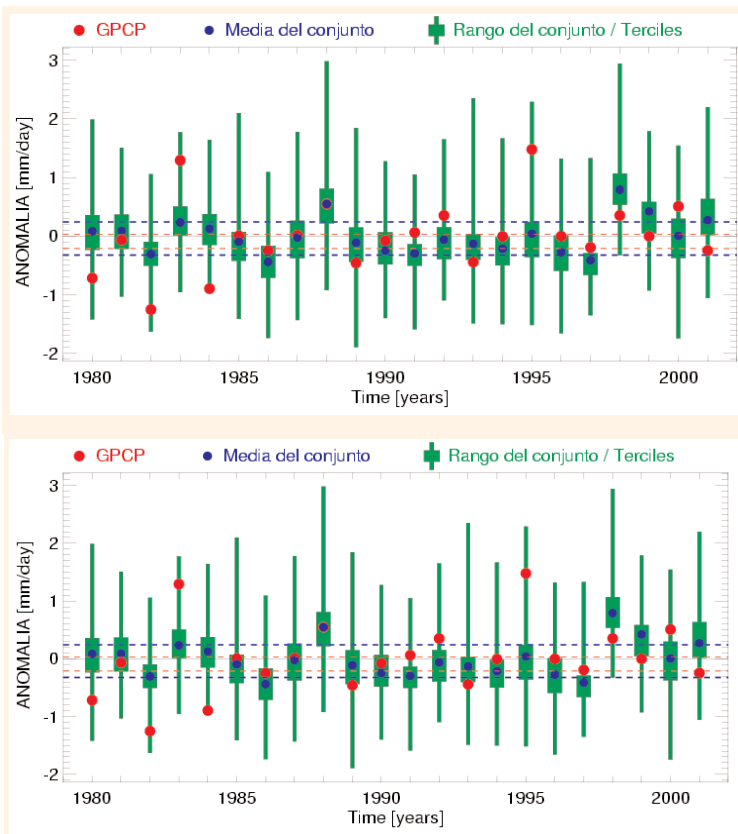


Figura 2

Predicciones estacionales multimodelo por conjuntos de la precipitación (mm/día) y temperatura ($^{\circ}\text{K}$) en Australia ($25^{\circ}\text{-}40^{\circ}\text{S}$, $142.5^{\circ}\text{-}152.5^{\circ}\text{E}$). Los 63 miembros (7 modelos) fueron inicializados el primero de Agosto en la figura de arriba (a) y el primero de Noviembre en la figura de abajo (b). Los valores mostrados corresponden a los promedios estacionales para los meses segundo y cuarto de la simulación. Los símbolos tienen la misma interpretación que los de la Figura 1.

de enfermedades infecciosas tropicales. Thomson et al. (2005) describen un método para la predicción de la incidencia de la malaria en Botswana en el que ajustaron una función cuadrática entre la precipitación observada en la región durante el verano austral y la serie temporal corregida de la incidencia de la malaria registrada por la red nacional del Ministerio de la Salud. Esta función se utilizó para convertir la precipitación predicha por cada miembro del conjunto DEMETER durante el periodo de noviembre a enero desde 1982 a 2002. La figura 3 muestra la función de densidad de probabilidad acumulada de las predicciones de incidencia de la malaria normalizada en Botswana para los cinco años de más alta (líneas en rojo) y baja (líneas en azul) incidencia durante el periodo 1982-2002, así como los valores registrados durante esos años (líneas verticales discontinuas). El sistema de predicción probabilista de la incidencia de la malaria es capaz de formular predicciones probabilistas con FDPs en los años en los que efectivamente se registran epidemias (curvas y rectas verticales rojas) totalmente distintas de las que se obtienen aquellos años en los que se registra una incidencia anormalmente baja. Thomson et al. (2005) demuestran que este sistema es capaz de ofrecer un incremento de cuatro meses en la predicción de epidemias con respecto a los sistemas de predicción usados en la actualidad, basados en el uso de la precipitación observada durante el verano, la cual sólo está disponible un mes antes de que se registren los primeros casos. Los beneficios de estas predicciones para los gestores de los limitados recursos sani-

tarios disponibles en países en desarrollo como el caso de Botswana son evidentes, por lo que se está preparando un sistema de predicción operativa basado en estos resultados.

Desarrollo de un sistema integrado de predicción estacional e interanual

Las predicciones estacionales son de utilidad para un amplio sector de la sociedad, ya sea por razones personales, comerciales o humanitarias (Pielke y Carbone, 2002). Sin embargo, experiencias como las descritas en la sección anterior demuestran que la aplicación de las predicciones no es una tarea simple. Los usuarios de este tipo de información presentan generalmente tres requisitos: **1.**, una predicción de calidad y fiable de la variabilidad climática que, al mismo tiempo, tenga en cuenta las incertidumbres descritas en secciones anteriores, lo que supone el uso de una aproximación probabilista; **2.**, una información con una escala espacial apropiada, normalmente no proporcionada por los modelos dinámicos actuales, por lo que se utilizan métodos de reducción de escala o "downscaling", basados tanto en métodos dinámicos como estadísticos; y **3.**, la integración de las predicciones dinámicas con información climática apropiada obtenida a partir de datos históricos, un proceso conocido como calibración, con el fin de incrementar el "conocimiento climático", que es el tipo de información de utilidad para los usuarios.

Desde el momento en el que existen usuarios que utilizan predicciones estacionales, es importante estimar los beneficios potenciales. Morse et al. (2005) presentan una metodología generalizada para la estimación del valor económico de las predicciones cuando se usan en la predicción de epidemias de malaria en África. Cuando un usuario utiliza un modelo cuantitativo que requiere información climática, como ocurre por ejemplo con los modelos de rendimiento de cultivo, se puede utilizar el resultado de cada miembro del conjunto para obtener un conjunto de predicciones de la variable de interés para el usuario (Palmer, 2002). El usuario puede entonces estimar una FDP para su variable, que a continuación puede utilizar en la formulación de predicciones probabilistas, más adecuadas para la toma de decisiones. La utilidad potencial del sistema de predicción, que incluye el modelo de predicción estacional y el del usuario, se puede estimar de la misma forma sugerida en secciones anteriores, es decir, analizando si es

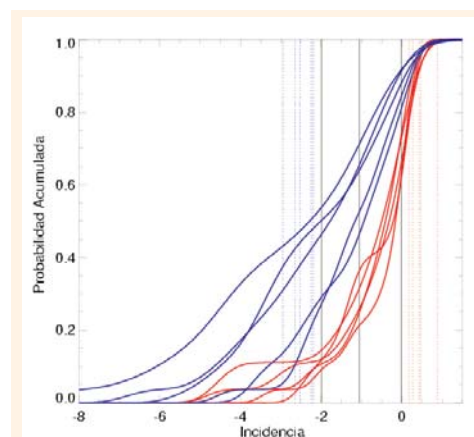


Figura 3

Función de densidad de probabilidad acumulada de las predicciones de incidencia de la malaria normalizada en Botswana para los cinco años de alta (líneas en rojo) y baja (líneas en azul) incidencia en el periodo 1982-2002. Las rectas negras verticales son a los cuartiles climatológicos de la incidencia (usados para definir los años de mayor y menor incidencia), mientras que las líneas discontinuas rojas y azules indican los valores registrados durante los cinco años de mayor y menor incidencia.

diferente con respecto a una FDP de referencia (climatológica, por ejemplo), con capacidad predictiva y suficientemente fiable para influir en el proceso de toma de decisiones.

La aproximación "end-to-end" (Buizer et al., 2000), en la que los usuarios trabajan en estrecha colaboración con los predictores climáticos en un proceso de ajuste continuo de todo el sistema de predicción, se puso en práctica en el proyecto DEMETER para ilustrar los beneficios asociados al uso de las predicciones estacionales multimodelo. Para que la aproximación funcione se requiere: **1.**, que los predictores climáticos tengan en cuenta desde el principio los requisitos de los usuarios; **2.**, que los usuarios desarrollen o adapten sus modelos para obtener el máximo beneficio de unas predicciones climáticas cuya pericia es limitada; **3.**, que las predicciones probabilistas climáticas y de los usuarios sean fiables (es decir, que las probabilidades formuladas sean, en promedio, semejantes a la frecuencia con la que se observa el suceso); y **4.**, que el proceso de valoración de la calidad de las predicciones incluya una estimación del valor económico obtenido por los usuarios, lo que requiere el desarrollo de estrategias de verificación orientadas al usuario. Ejemplos de cómo desarrollar estos aspectos se pueden encontrar en Feddersen y Andersen (2005) para el problema del "downscaling" y en Morse et al. (2005) para la valoración de las predicciones desde el punto de vista del usuario. Con el fin de favorecer el desarrollo de esta estrategia, así como para fomentar el análisis de la variabilidad climática, el proyecto DEMETER ha puesto las predicciones generadas por los modelos acoplados a disposición de la comunidad científica en el servidor público de datos del ECMWF: <http://data.ecmwf.int>.

Conclusiones

Muchos otros avances han tenido lugar recientemente en el campo de la predicción estacional. Uno de ellos consiste en la evaluación del beneficio relativo de la combinación de predicciones en la que se asignan coeficientes diferentes a cada modelo o sistema de predicción (Doblas-Reyes et al., 2005). En principio, una combinación no uniforme es apropiada cuando los distintos sistemas no están muy correlacionados y, por lo tanto, tienen una pericia predictiva distinta. En la combinación se pueden incluir también predicciones empírico/estadísticas (Stephenson et al., 2005), siempre que se maximice el contenido informativo de las predicciones.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, el "downscaling" es una pieza básica de la estrategia "end-to-end" para predicción climática (Palmer et al., 2004; Feddersen y Andersen, 2005). Sin embargo, hasta el momento no ha habido muchos ejemplos que muestren claramente los beneficios y limitaciones técnicas de este procedimiento. En el futuro se espera que se tenga en cuenta: **1.**, el uso combinado de modelos regionales dinámicos y métodos estadístico/empíricos, dado que ninguno ha dado pruebas claras de ser superior al otro; **2.**, la corrección de los errores sistemáticos del modelo global para proporcionar predicciones fiables, usando las muestras relativamente cortas (de 15 a 30 años) disponibles en la mayoría de los casos; **3.**, la disponibilidad de conjuntos de predicciones en lugar de predicciones deterministas, lo cual puede representar una limitación fundamental para los significativamente costosos (desde un punto

de vista computacional) modelos regionales dinámicos; y **4.**, la creación de series temporales de variables en superficie con alta resolución temporal, algo que casi siempre requiere el uso de generadores de tiempo cuando se usan métodos empírico/estadísticos.

Dado que el clima no se predice únicamente a escala estacional, existe un amplio rango de sistemas predictivos, desde los modelos de predicción a medio plazo, pasando por los modelos de predicción estacional, hasta aquéllos que se usan para la predicción decenal o la estimación del futuro cambio global. Las predicciones realizadas con estos sistemas se actualizan con una periodicidad muy diferente: desde cada 12 horas en el primer caso hasta una vez cada varios años, como ocurre en el caso de las predicciones de cambio climático. Los usuarios tienen que tener en cuenta las distintas predicciones formuladas por todos estos sistemas, actualizando sus decisiones a medida que nuevas predicciones se hacen disponibles, lo cual hace aún más difícil la integración de la información climática en sus sistemas. La combinación de las predicciones estacionales con otras a mucho más largo plazo (por ejemplo, predicciones decenales de la circulación del Océano Atlántico profundo) representa un enorme reto para el futuro.

Finalmente, en un sistema "end-to-end" operativo es importante llevar a cabo una evaluación exhaustiva de la calidad de las predicciones, tanto desde el punto de vista climático como desde el del usuario (Morse et al., 2005). Las variables del usuario integran de forma no lineal las distintas variables meteorológicas usadas, de forma que no es esperable una relación simple entre la pericia de éstas y la de la variable final del usuario. Por ejemplo, un sistema de predicción estacional de rendimiento de cultivos puede beneficiarse de manera considerable de unas predicciones de temperatura y precipitación de calidad limitada debido a la no linealidad que el modelo de cultivo implica.

Los próximos años prometen ser muy intensos en la investigación de estos aspectos, especialmente el de las aplicaciones de la información climática. Esperemos que estos retos sean la inspiración para una nueva serie de resultados excitantes.

Agradecimiento: Este trabajo tuvo financiación del proyecto europeo ENSEMBLES (GOCE-CT-2003-505539).

Referencias

- Buizer JL, ea.** (2000) Global impacts and regional actions: Preparing for the 1997-98 El Niño. *Bull Amer Meteor Soc* 81: 2121-2139
- Challinor AJ, ea.** (2005) Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles. *Tellus A* 57: 498-512
- Doblas-Reyes FJ, ea.** (2005) The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. II Calibration and combination. *Tellus A* 57: 234-252
- Feddersen H, ea.** (2005) A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions. *Tellus A* 57: 398-408
- Hagedorn R, ea.** (2005) The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. I Basic concept. *Tellus A* 57: 219-233

Morse AP, ea. (2005) First steps towards the integration of a dynamic malaria model within a probabilistic multi-model forecast system. *Tellus A* 57: 464-475

Moura AD, ea. (2004) Climate prediction for Brazil's Nordeste: Performance of empirical and numerical modeling methods. *J Clim* 17: 2667-2672

Murphy JM, ea. (2004) Quantifying uncertainties in climate change using a large ensemble of global climate model predictions. *Nature* 430: 768-772

Neelin JD, ea. (1998) ENSO theory. *J Geophys Res* 103: 14261-14290

Palmer TN (2001) A nonlinear dynamical perspective on model error: a proposal for nonlocal stochastic-dynamic parametrisation in weather and climate prediction models. *Q. J. Roy Met Soc* 127: 685-708

Palmer TN (2002) The economic value of ensemble forecasts as a tool for risk assessment: from days to decades. *Quart J Roy Meteor Soc* 128: 747-774

Palmer TN, ea. (2004) Development of a European multi-model ensemble system for seasonal to inter-annual prediction. *Bull Amer Meteor Soc* 85: 853-872

Palmer TN, ea. (2005) Representing model uncertainty in weather and climate prediction. *Annual Rev Earth Planet Sci* 33: 163-193

Pielke Jr R, ea. (2002) Weather impacts, forecasts, and policy. *Bull Amer Meteor Soc* 83: 393-403

Stephenson DB, ea. (2005) Forecast assimilation: a unified framework for the combination of multimodel weather and climate predictions. *Tellus A* 57: 253-264

Stockdale TN, ea. (1998) Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean-atmosphere model. *Nature* 392: 370-373

Thomson MC, ea. (2005) Multi-model ensemble seasonal climate forecasts for malaria early warning. *Nature* submitted

Trenberth KE, ea. (1998) Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J Geophys Res* 103: 14291-14324

Asociación Meteorológica Española

XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española

7º Encuentro Hispano-Luso de Meteorología

“Aplicaciones meteorológicas”

Pamplona, 24-26 de abril de 2006

COLABORAN

CENER
CENTRO NACIONAL DE ESTUDIOS Y RECURSOS METEOROLÓGICOS

INM
INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA