



*México, octubre de 1993 – Julián y Thelma Adem  
Fotografía: H. Taba*

internacional. Ella tenía muchos años de experiencia en la preparación de la revista trimestral *Geofísica Internacional* y es la editora técnica de la nueva revista *"Atmósfera"*. Puesto que queríamos una revista de calidad, invitamos a prestigiosos científicos internacionales a formar parte del consejo editorial. El primer número apareció el 1 de abril de 1988 y desde entonces ha aparecido puntualmente cada tres meses. Incluye artículos de investigación teórica, empírica y aplicada en todos los aspectos de las ciencias

doctorales y, desde luego, continuaré como editor de *"Atmósfera"*. Disfruto inmensamente todas estas actividades y pretendo continuar trabajando tanto tiempo como me sea posible.

**H.T. – Le felicito, Prof. Adem, por sus logros científicos, incluidos, estoy seguro de ello, los que aún están por venir.**

atmosféricas. A fin de asegurar la originalidad y la correcta presentación de los artículos, se someten los trabajos de los autores, que proceden de todo el mundo, a un estricto proceso de revisión.

**H. T. – ¿Qué planes tiene para el futuro?**

J. A. – Mi último período como director terminará el 24 de noviembre de 1993, por lo que podré dedicar más tiempo a la investigación. Continuaré impartiendo cursos y dirigiendo tesis

## **PREDICCIÓN MENSUAL EN LAS LATITUDES MEDIAS**

Por M.S.J. HARRISON\*

Hay dos fuentes para la predicción de la atmósfera. La primera está basada en el conocimiento del estado actual de la atmósfera y puede ser empleada como base para predecir la evolu-

ción de la atmósfera en los próximos días. Las predicciones a corto plazo con modelos operativos en los Centros Meteorológicos Nacionales se aprovechan de este tipo de predicción; se

\* Jefe de Investigación de la Predicción a Largo Plazo, del Meteorological Office del Reino Unido, London Road, Bracknell, Berks. RG12 2SZ

suministra a los modelos un análisis detallado del estado de la atmósfera en un instante determinado y a continuación proporciona una predicción integrando las ecuaciones de la hidrodinámica para un período dado. La segunda fuente de predicción se basa en las influencias recíprocas entre la atmósfera y la superficie subyacente del planeta. Al igual que el clima puede explicarse en función de, entre otras cosas, por las perturbaciones de la circulación atmosférica debidas a la distribución geográfica del intercambio de calor entre los continentes, los océanos y la atmósfera, así las variaciones de estos intercambios de calor a escalas cronológicas de una estación o dos pueden imponer ajustes duraderos de la circulación que pueden emplearse por los predictores.

Las evaluaciones actuales indican que las predicciones a más largo plazo que pueden hacerse con el primer tipo de predicciones es del orden de dos semanas para las latitudes medias (Lorenz, 1982). Así, aun con modelos "perfectos" de la atmósfera no podremos hacer predicciones diarias más allá de los catorce días. Los límites prácticos de predicción son en la actualidad, alrededor de cinco días en el hemisferio Norte (un límite impuesto por la calidad de los modelos actuales y de los datos disponibles para los modelos), tres días en el hemisferio Sur (principalmente a causa de que hay menos observaciones en el Sur) y sólo un día o dos entre los trópicos. El segundo tipo de predicción, no obstante, da la posibilidad de predecir las condiciones medias para períodos largos en estas regiones del globo en las cuales los cambios de clima en una estación o más están íntimamente ligados a los cambios en la distribución de las temperaturas de la superficie del mar, de la capa de hielo o de la humedad del suelo continental. Estas regiones parecen encontrarse en los trópicos y subtrópicos, aunque hay algunas zonas de las latitudes medias, incluyendo partes de América del Norte, en las cuales pueden hacerse predicciones de este tipo en algunos períodos del año. Así, ya es posible hacer evaluaciones de la precipitación total en una estación con alto grado de fiabilidad en algunas regiones de África, América del Sur y otras partes, empleando el conocimiento de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en sectores oceánicos específicos (Hastenrath, 1990). No obstante, sólo pueden hacerse predicciones aproximadas sobre períodos largos, quizá para períodos no más cortos que una estación; no pueden darse ni predicciones diarias ni predicciones medias semanales ni mensuales. El período más largo para una predicción de este tipo es mayor que una estación y puede ser tan largo como 18 meses; la pre-

dicción por estaciones, que puede ser quizá, de hasta cinco estaciones, podrán ser posibles en el futuro (por ejemplo, Barnett y col., 1994).

La predicción mensual se encuentra entre los límites de predictibilidad esbozados arriba; inicialmente, parece ser un plazo demasiado largo para emplear el conocimiento del estado actual de la atmósfera y un plazo demasiado breve para aplicar la información disponible sobre las distribuciones de la temperatura de la superficie del mar, con independencia de la situación tropical o extratropical. Sin embargo, ya se han hecho intentos de predicciones mensuales durante muchos años en algunos centros de investigación de Europa, Norteamérica y Asia y no sin algunos resultados alentadores (Gruza y Shevchenko, 1988; Toth, 1989; Tracton y col., 1989; Brankovic y col., 1990; Yamada y col., 1991; Déqué y Royer, 1992). Este artículo se refiere a la experiencia en el Meteorological Office del Reino Unido, que es, de todos modos, típica.

Los primeros trabajos en predicción mensual en el Reino Unido fueron de naturaleza empírica y tenían por objeto proporcionar predicciones aproximadas de la situación durante el mes próximo, sin dar detalles de cambios durante ese período. Se suponía que el conocimiento del estado atmosférico futuro podría deducirse comparando la información de su pasado reciente con la de los registros históricos. Los llamados análogos proporcionaron la base para las predicciones durante los años sesenta. Para encontrar períodos análogos de un mes o una quincena en la misma época del año se buscaban con campos de circulación atmosférica semejante a la del mes o quincena recientes. Una vez que se habían descubierto uno o más análogos, podía formularse una predicción empleando los datos acerca de la circulación en el mes siguiente a cada análogo. Inicialmente pareció que los análogos funcionaban satisfactoriamente pero, después de algunos años, los niveles de fiabilidad empezaron a fallar y, desde entonces, no han sido empleados en el Reino Unido, aunque aún se usan en algunos países. Durante los años setenta se elaboraron y comprobaron otras técnicas empíricas, con resultados variables. Un problema común a todas las técnicas empíricas de aquella época es que eran muy laboriosas y por ello se decidió emplear los ordenadores, para automatizar los métodos. Esto dio lugar a dos nuevas técnicas informáticas que se introdujeron hacia 1980 (Folland y Woodcock, 1986). Ambos proyectos presentaban las medidas del estado reciente de la circulación atmosférica, empleando una técnica de regresión y el otro un método conocido como análisis del discriminante. Como se verá más adelante, los niveles de fiabilidad de las

predicciones parecían responder positivamente a estas nuevas técnicas.

La llegada en los primeros años ochenta de modelos numéricos para la atmósfera que cubrían todo el globo (al contrario que una superficie limitada) significó un gran paso adelante, al proporcionar por primera vez la posibilidad de hacer predicciones numéricas para más de algunos días. Su llegada no obstante, fue acompañada por la creciente comprensión de la importancia de los resultados de la predictibilidad de la atmósfera, una consecuencia de un campo científico relativamente nuevo —la teoría del caos. La teoría del caos se aplica a sistemas cuyas ecuaciones diferenciales incluyen términos que no son lineales. En estos sistemas es bastante posible que un cambio pequeño del estado actual del sistema dé lugar a un cambio substancial del sistema en algún instante futuro, como se demostró por primera vez con un modelo sencillo de atmósfera por Lorenz (1963). Se acepta fácilmente que “un pequeño cambio” en meteorología se presenta en el estado actual de la atmósfera. Con frecuencia los errores de medida no son detectables a simple vista en los campos analizados pero, no obstante, pueden ser suficientemente grandes para producir predicciones bastante diferentes con los modelos numéricos que las que se habrían obtenido si no hubiera habido errores. En la práctica los errores están siempre presentes en las medidas de la atmósfera y, por lo tanto, en la información proporcionada al modelo. Esto no será importante cuando la predicción resultante no dependa de los errores en el campo inicial; pero, en otros casos, puede resultar que la producción del modelo sea una predicción sin valor.

Dependiendo de detalles precisos, en cualquier momento dado, de la sensibilidad de las predicciones del modelo a los errores en el campo inicial, el período en el cual cualquier conjunto de predicciones diarias puede ser fiable, varía desde sólo un día o dos hasta quizá siete u ocho días, de acuerdo con los modelos actuales. Evidentemente, sería útil saber por anticipado cuál será probablemente la fiabilidad de la predicción. Al mismo tiempo, es preocupante admitir que cualquier predicción puede ser errónea sin previo aviso, a causa de pequeños errores en la información proporcionada al modelo. Además, si sucede esto en las predicciones a corto plazo, entonces las perspectivas para las predicciones mensuales empleando modelos no parecen ser recomendables. Este conocimiento puede usarse provechosamente, sin embargo, y parece que el caos puede emplearse de un modo beneficioso para la predicción mensual, particularmente si se hacen predicciones promedio de períodos (tales como valores medios

de todo el mes) mejor que predicciones para períodos específicos.

Pueden generarse conjuntos de predicciones poniendo en marcha el modelo con algunas condiciones iniciales que difieren ligeramente entre sí. Obviamente, esto resulta costoso en el uso del ordenador, pero es una técnica que se usa cada vez más en la predicción de diversos intervalos de tiempo y ha sido empleada operativamente en las predicciones mensuales en el Meteorological Office desde diciembre de 1988. En parte, la idea es probar la sensibilidad de las predicciones a los cambios en las condiciones iniciales. Así, si todos los ensayos dan predicciones semejantes, entonces hay una sensibilidad pequeña a los cambios y la predicción será fiable y la confianza en la predicción será grande. Inversamente, si se obtienen predicciones diferentes, entonces el modelo es sensible a los cambios y la confianza es relativamente pequeña. En cualquier caso, la predicción mejor en teoría es el promedio mayor del conjunto, no el menor, porque no está justificado científicamente elegir ninguno de los miembros individuales del conjunto.

La teoría y la práctica no siempre coinciden y es posible, por ejemplo, que todos los miembros de un conjunto den predicciones semejantes (sugiriendo así una gran confianza en la predicción) mientras que la atmósfera termina en un estado muy diferente del predicho. Además, y es muy importante, que haya posiblemente dos o más resultados distintos dentro de un conjunto (figura 1). Cuando sucede esto, es claramente inapropiado el promedio del conjunto, ya que no sería representativo de ninguno de los resultados y daría lugar a una predicción con un aspecto extraño. Ni es factible seleccionar el promedio entre uno de los conjuntos de predicciones semejantes, a menos de que haya una fuerte evidencia independiente, apuntando a esta solución. La solución que se da a este problema en el Meteorological Office es considerar cada miembro como una predicción de igual probabilidad, con lo cual puede calcularse una distribución de probabilidades de las predicciones. Dada una amplia dispersión de las predicciones, esta distribución no puede ser diferente de la distribución climatológica, pero, en muchos casos, resultarán predicciones marcadamente monomodales, quizá bimodales (figura 2). La probabilidad de predicciones de esta naturaleza, está aún en el proceso de desarrollo. entre tanto, el predictor, enfrentado con el problema de diferenciar las predicciones en el conjunto, tiene que tomar la onerosa decisión de hacer una selección sobre la base de una predicción determinista. Frecuentemente se usan predicciones empíricas independientes para ayudar en la selección.



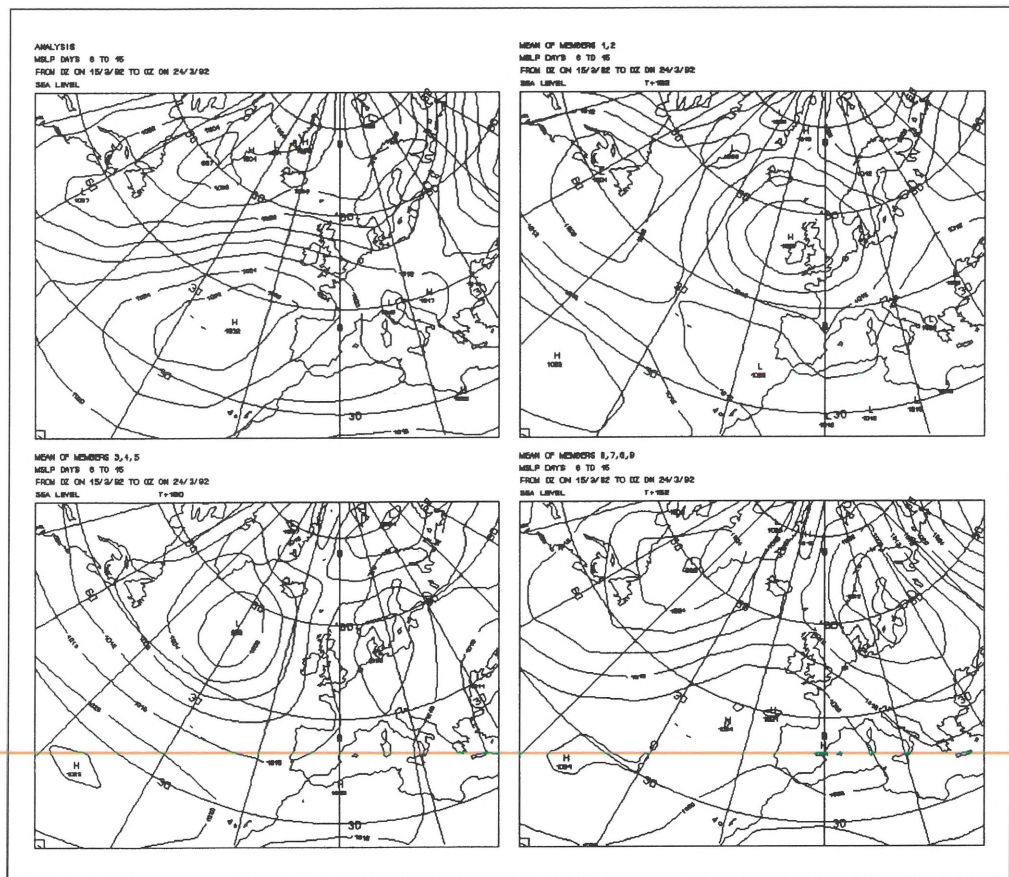


Figura 1.— Ejemplo del intervalo de soluciones generadas por un conjunto de predicciones. Campos de presión al nivel del mar, promediados para los días de predicción 6–15, para el análisis de comprobación (arriba a la izquierda) y tres agrupaciones diferentes formadas con los nueve miembros del conjunto. Dos agrupaciones (arriba a la derecha con dos miembros y abajo a la izquierda con tres) no tienen ninguna fiabilidad de predicción. La tercera agrupación (abajo derecha con cuatro miembros) tiene una fiabilidad razonable.

Las técnicas esbozadas anteriormente han sido empleadas durante muchos años para hacer predicciones mensuales en el Reino Unido. En años recientes éstas han tomado la forma de predicciones de temperatura y lluvia en diez zonas del reino, presentadas normalmente como la quinta más probable de la distribución climológica de temperaturas y análogamente la tercera de la precipitación. La valoración de las predicciones emplea una medida conocida como puntuación de la pericia Folland–Painting, la cual valora la precisión con la cual se han predicho la quinta o tercera exactas (Folland y col., 1986). Los valores de esta medida varían el + 100 por ciento, cuando coinciden tanto la posibilidad y la climatología esperada, hasta puntuar el 0 por ciento. Durante los años 60, cuando la técnica de la predicción se basaba en los análogos, las predicciones de temperatura tenían alguna pericia, mientras que había muy poca pericia aparente en las lluvias. Esta situación se invirtió du-

rante los años 70, cuando se emplearon varias técnicas. Pero es desde 1980, cuando se introdujeron los nuevos métodos empíricos automáticos, cuando los niveles de pericia tanto en la temperatura como en la precipitación parecen haber mejorado, la pluviosidad escalonadamente y la temperatura con una tendencia creciente continua, que se invirtió algo en los últimos años (figura 3). Quizá debiera indicarse que la pericia típica de una predicción para los cinco días primeros en esta escala es del orden 40–50 por ciento. Es difícil detectar, en los diagramas particulares de la figura 3, una contribución sustancial por la introducción de los grupos a fines de 1988, pero otra evidencia sugiere una mejora del orden del 5–10 por ciento.

Con las técnicas empíricas automáticas y más tarde con los conjuntos, se han creado también predicciones como promedios de los días 1 a 5, 6 a 15 y 16 a 30. El análisis estadístico de los resultados sugiere que se han conse-

## PREDICCION DE CONJUNTO TEMPERATURA 9/12/85, DIAS 6 A 15

CATEGORIA 1 – MUY INFERIOR A LA MEDIA

CATEGORIA 2 – INFERIOR A LA MEDIA

CATEGORIA 3 – MEDIA

CATEGORIA 4 – SUPERIOR A LA MEDIA

CATEGORIA 5 – MUY SUPERIOR A LA MEDIA

■ CATEGORIA  
■ OBSERVADA

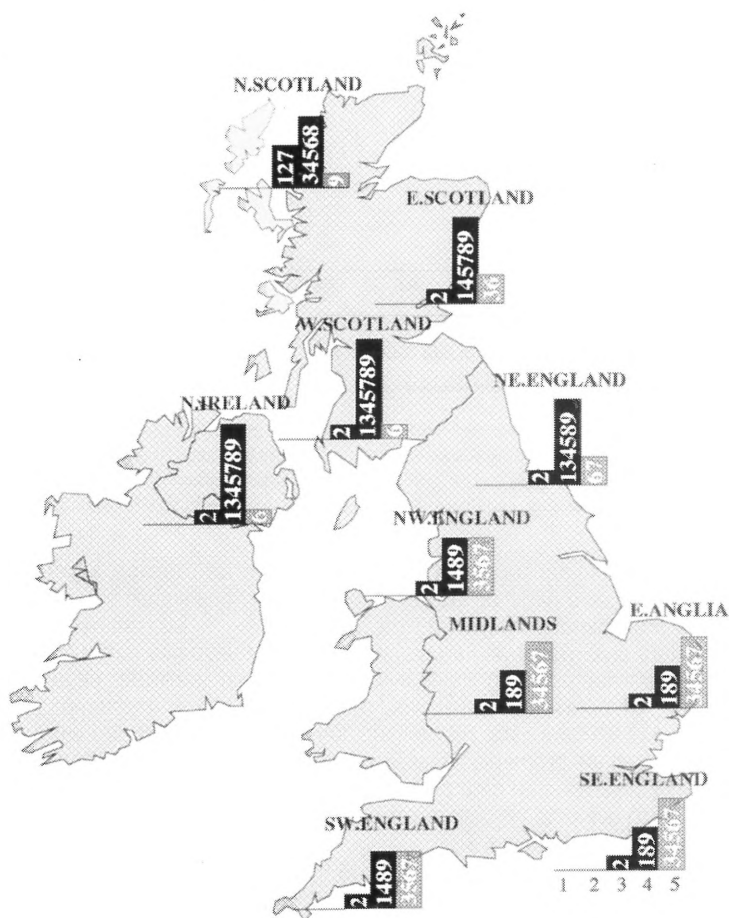


Figura 2.- Ejemplo de una predicción probabilística de temperatura deducida de un conjunto de nueve miembros. Para cada uno de los diez distritos se hace una predicción de la distribución de probabilidades contando el número de miembros del conjunto que predicen cada una de las cinco quintas de temperatura. El número de miembros se escribe en la barra de cada histograma. Las quintas observadas se escriben en la barra tramada.

guido notables niveles de pericia para los días 1 a 5 y 6 a 15, pero que los resultados son marginales para las temperaturas en los días 16 a 30. No hay pericia en la predicción de la precipitación en los días 16 a 30. Las pericias en las predicciones mensuales de temperatura y precipitación son estadísticamente significativas.

En la actualidad no se sabe dónde está el origen de la pericia. La introducción de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar, el segundo tipo de predicciones discutido anteriormente, se emplea tanto en las predicciones empíricas como en las numéricas, pero hay una evidencia limitada de la hipótesis de que

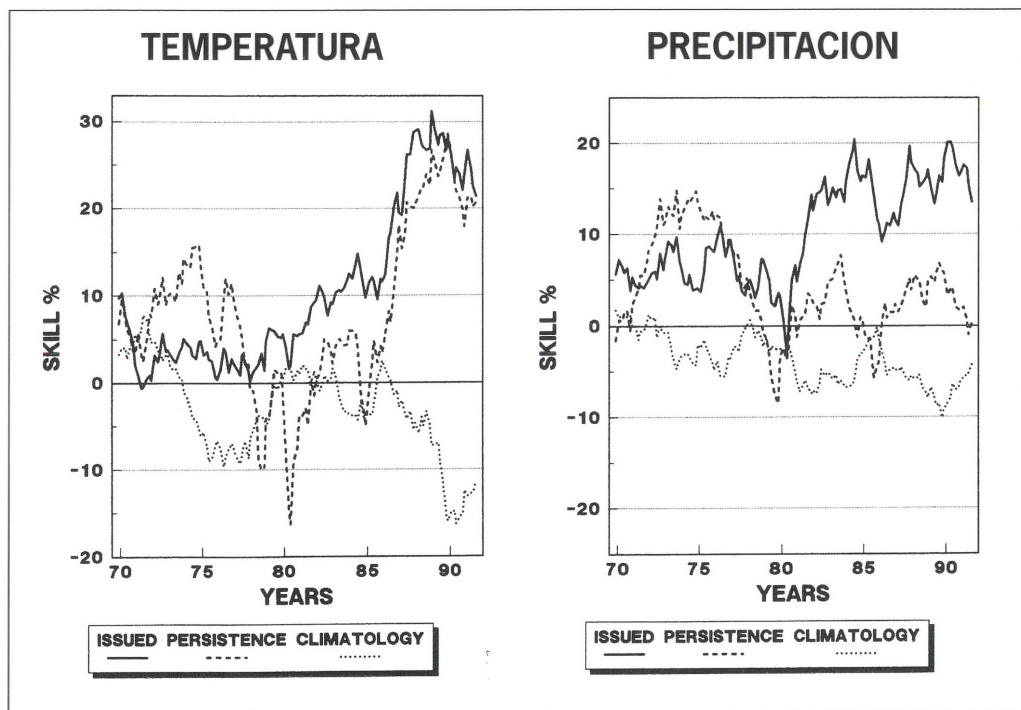


Figura 3.— Fiabilidad de las predicciones mensuales de temperatura y precipitación para los diez distritos del Reino Unido de la Figura 2. Las gráficas son las fiables medias móviles de cuatro años, habiéndose transcrito los valores al final de cada período. En el texto se describe la fiabilidad Folland–Painting.

sea el origen de la pericia. En algunas ocasiones, la predicción a partir de las condiciones iniciales es probable que influya. La circulación de la atmósfera en el Oeste de Europa tiende a ser un tanto persistente, y esto puede ayudar a la predictibilidad; nótese que la fiabilidad de las temperaturas tiende a estar relacionada con la persistencia en los promedios a largo plazo (pero no necesariamente para períodos más breves), pero que esto no parece ser cierto para la precipitación (figura 3).

Una cuestión importante es la de si los niveles de fiabilidad obtenidos son significativos en el mundo real. Se han hecho pruebas en las cuales se han proporcionado predicciones a algunas empresas del Reino Unido, para permitirles estimar el valor práctico de la información. Casualmente, estos ensayos se hicieron coincidiendo con el período de fiabilidad máxima conseguida en las predicciones, una coincidencia que puede haber ayudado al resultado positivo de los ensayos (Harrison y col., 1994). Sin embargo, parece que aquellas empresas que aún reciben predicciones se benefician de la información. En los EE.UU. las predicciones mensuales se han suministrado durante años a todos los grupos interesados, pero ha habido pocas tentativas para determinar los niveles de beneficio conseguidos por

los usuarios. Sin embargo, hay indicaciones de que se han obtenido beneficios positivos.

En resumen, la predicción mensual en las latitudes medias sigue siendo una de las tareas más difíciles de los predictores. Conforme se han acumulado pruebas de la limitación de la predictibilidad en el período, se han desarrollado nuevos métodos que parecen haber proporcionado pruebas de fiabilidad en las predicciones. Los nuevos métodos han culminado con los conjuntos de predicciones numéricas que ahora se estudian por varios equipos en todo el mundo. Nuevos proyectos, tales como programas para examinar la predicción extratropical estacional (en donde las influencias de la superficie pueden desempeñar un papel importante), pueden muy bien conducir a ulteriores desarrollos de la predicción mensual. También se está explorando en el Reino Unido un nuevo camino hacia la predicción mensual empleando los conjuntos, se emplean todos los miembros para elaborar distribuciones de probabilidad. Es poco probable que las predicciones mensuales puedan proporcionarse alguna vez con niveles consistentes y altos de fiabilidad, pero hay alguna razón para esperar que puedan conseguirse predicciones con adecuados niveles de fiabilidad para su uso en aplicaciones adecuadas.



## Referencias

- BARNETT, T.P., L. BENGTSSON, K. ARPE, M. FLÜGEL, N. GRAHAM, M. LATIF, J. RITCHIE, E. ROECKNER, U. SCHLESE, U. SCHULZWEIDA y M. TYREE, 1994: Forecasting global ENSO-related climate anomalies. Enviado a *Tellus*.
- BRANKOVIC, C., T. N. PALMER, F. MOLteni, S. TIBALDI y U. CUBASCH, 1990: Extended-range prediction with ECMWF models: time-lagged ensemble forecasting. *Quart. Jour. Royal Meteor. Soc.*, **116**, 867–912.
- DÉQUÉ, M. y J. F. ROYER, 1992: The skill of Extended-range extra-tropical winter dynamical forecasts. *Jour. Climate*, **5**, 1346–1356.
- FOLLAND, C. K. y A. WOODCOCK, 1986: Experimental monthly long-range forecasts for the United Kingdom. Part I: Description of the forecasting system. *Meteor. Mag.*, **115**, 377–395.
- FOLLAND, C. K., A. WOODCOCK y L. D. VARAH, 1986: Experimental monthly long-range forecasts for the United Kingdom. Part II: Skill of the monthly forecast. *Meteor. Mag.*, **115**, 301–317.
- GRUZA, G. V. y N. N. SHEVCHENKO, 1988: The climate signal, climate noise and limiting possibilities of long-term forecasting. *Soviet Meteor. and Hydrol.*, **6**, 1–7.
- HASTENRATH, S., 1990: Tropical climate prediction: a progress report 1985–1990. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 819–825.
- HARRISON, M. S. J., V. M. VALLENTINE, R. J. STOBBS y P. BUCHANAN, 1994: A practical determination of the value of the Meteorological Office monthly forecasts in the United Kingdom. Provisionally accepted by *Int. Jour. Climatol.*
- LORENZ, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *Jour. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141.
- LORENZ, E. N., 1982: Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, **34A**, 505–513.
- TOTH, Z., 1989: Long-range weather forecasting using an analog approach. *Jour. Climate*, **2**, 594–607.
- TRACTON, M. S. K., MO, W. CHEN, E. KALNAY, R. KISTLER y G. WHITE, 1989: Dynamical extended range forecast (DERF) at the National Meteorological Center. *Monthly Weather Rev.*, **117**, 1604–1635.
- YAMADA, S., S. MAEDA, T. KUDO, T. IWASAKI y T. TSUYUKI, 1991: Dynamical one-month forecast experiments with the JMA global prediction model. *Jour. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 153–159.

# PERSPECTIVAS DE LA PREDICCIÓN CLIMÁTICA ESTACIONAL A INTERANUAL Y APLICACIONES PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE

Por A.D. MOURA\*

## El problema y su naturaleza mundial

La capacidad para predecir con exactitud las variaciones climáticas representa probablemente el elemento más importante para planificar, de una manera inteligente, las actividades futuras de las sociedades modernas.

Desgraciadamente, los actuales conocimientos científicos sólo han mostrado progresos a ciertas escalas, en especial a escalas cronológicas de estacionales (100 días) a interanuales (1 000 días), para las que se ha demostrado exactitud en la predicción, particularmente respecto al fenómeno del ENOS (El Niño/Oscilación del Sur). Este progreso científico es uno de los

mayores logros del programa PMIC/TOGA (Océano Tropical y Atmósfera Mundial), un programa internacional de investigación de diez años de duración, auspiciado por la OMM, el CIUC y la COI, que finaliza en diciembre de 1994 (OMM, 1985). Se espera que las actividades posteriores al TOGA, dentro del marco del nuevo programa CLIVAR, alcancen los objetivos posteriores del TOGA, en lo relativo a la modelización, la predicción, los estudios de los procesos y un sistema de observación apropiado.

El fenómeno del ENOS, como núcleo del TOGA, ha sido estudiado durante decenios, pero antes de 1980 ni siquiera se sabía cuándo se iniciaba un episodio del ENOS en el Pacífico. No había sistemas de observación apropiados, debido principalmente a la amplitud de

\* INPE: Instituto Nacional de Investigación Espacial, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Brasil