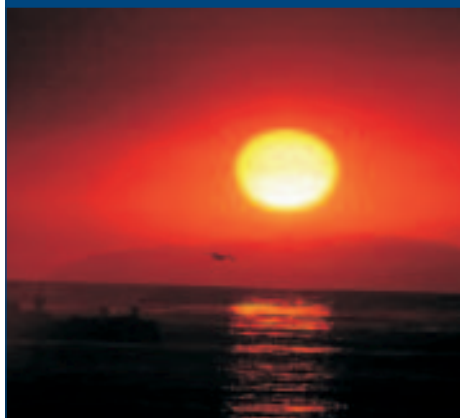


Modelos acoplados: variaciones a corto plazo



Por Michel Déqué,
Météo-France/CNRM/GAME

Introducción

Una vez que los ordenadores numéricos permitieron resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos con cierta precisión, comenzó el desarrollo de modelos atmosféricos y oceánicos de manera independiente. Los modelos atmosféricos se utilizaron para investigar la predictibilidad (incluida la predictibilidad a largo plazo), mientras que los modelos oceánicos se dedicaron a estudios más teóricos.

A finales de la década de 1980, la necesidad de modelos acoplados de océano y atmósfera se vio motivada esencialmente por la gran cuestión del cambio climático antropogénico. Ni un modelo oceánico con un forzamiento atmosférico sencillo ni un modelo atmosférico integral acoplado a uno oceánico sencillo pudieron dar una respuesta creíble.

Unos 10 años después, el desarrollo de las técnicas de acoplamiento ha permitido que las mismas herramientas se utilicen para la predicción estacional.

Una de las razones de este retraso es el hecho de que las predicciones estacionales acopladas requieren un buen conocimiento del estado inicial del océano. Antes de la era de los satélites, no se disponía de dicha información, al contrario de lo que pasaba con la atmósfera. En este artículo vamos a describir cómo y por qué se emiten las predicciones estacionales operativas: se va a destacar el papel del acoplamiento con el océano.

¿Qué es el pronóstico estacional?

En el inicio de la ciencia meteorológica, a finales del siglo XIX, la palabra “pronóstico” tenía un significado confuso. El público era consciente de que los pronósticos meteorológicos no eran lo suficientemente precisos como para merecer el nombre de predicción. Un pronosticador meteorológico hacía una hipótesis razonable, no decía la verdad sobre el futuro, al menos un pronosticador razonable. Con el progreso de la ciencia meteorológica, las palabras pronóstico y predicción han convergido hasta un significado común para el público.

La gente acepta que las predicciones meteorológicas fallan, pero no con demasiada frecuencia (por ejemplo, un caso de cada diez). Para intervalos mayores (una semana), el público acepta que el índice de error aumente. Ciertamente,

es posible corregir una predicción a medida que se acerca la fecha objetivo y, así, el usuario medio puede adaptarse (cancelar una comida al aire libre, posponer un viaje, etc.). Hay que reconocer que a principios de mayo de 2003 no pudimos predecir el período de calor de 10 días de agosto de Francia con una precisión de un día. Pero la gente espera que un pronóstico estacional sea capaz de anunciar que un verano será más cálido que los anteriores.

Sin embargo, la Naturaleza es menos determinista —o la concepción que tenemos de la Naturaleza a través de las leyes de la física es errónea—. Desde Poincaré (1881), los científicos han creído que hay un límite a la predicción determinista de los fenómenos atmosféricos. Esto se debe al tipo de ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Los intentos de resolver estas ecuaciones con ordenadores durante la segunda mitad del siglo XX han demostrado que este límite está entre 10 y 20 días.

¿Qué podemos hacer para llegar más lejos? Entramos en el dominio del enfoque probabilista. Hay varias posibilidades para la atmósfera, y estas posibilidades no tienen la misma probabilidad. Los científicos llaman “predicción estacional” al cálculo de las distintas probabilidades. Pero la Naturaleza elegirá una de estas posibilidades —no necesariamente la más probable— y ningún modelo puede predecir, más allá de unas pocas semanas, qué posibilidad será la elegida. Por esto ni siquiera se puede predecir una media estacional de manera determinista.

En la literatura científica, se pueden encontrar con frecuencia aciertos deterministas de predicciones estacionales (la lista de referencias sería demasiado larga) pero esto es solo un primer paso para garantizar que el modelo de predicción no está produciendo únicamente ruido. No es una evaluación de la pericia práctica. Algunos sitios Web muestran mapas de medias estacionales para la siguiente estación, pero solo es una manera, fácil de comprender, de

**El efecto
mariposa
es fácil de
demostrar
en los modelos numéricos,
pero imposible de probar con
observaciones.**



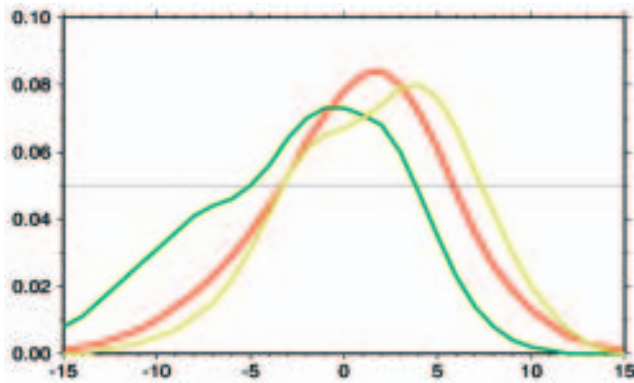


Figura 1 — Función de densidad de probabilidad de la temperatura diaria de invierno a 2 m en Toulouse para la climatología (en rojo), el invierno frío de 1962-1963 (en verde) y el invierno cálido de 2000-2001 (en amarillo)

mostrar la distribución de probabilidad. No es el producto final, del que puede obtener beneficio un usuario.

La Figura 1 muestra la función empírica de distribución de probabilidad (fdp) de la temperatura diaria invernal en Toulouse (Francia). Los dos inviernos extremos (de promedio) en los 50 últimos años son el de 1962-1963 (curva verde) y el de 2000-2001 (curva amarilla). Una buena predicción estacional debería ser capaz de obtener fdp de acuerdo con éstas. Todavía no estamos en este caso, y el primer desafío es superar la predicción climatológica (curva roja) correspondiente a la fdp de los 50 inviernos.

Para el público, utilizar probabilidades puede parecer una manera de escapar a las críticas en caso de error. En el corto plazo, la predicción meteorológica también es un ejercicio probabilista, pero la función de densidad de probabilidad es afilada. El papel de un predictor meteorológico es transformar la información probabilista (utilizando varias salidas de modelos, su memoria de situaciones pasadas análogas) en una determinista. Al hacerlo, fallará de vez en cuando, pero hará lo correcto. Si un predictor a corto plazo transmitiera simplemente la información probabilista, el usuario tendría que tomar la decisión por sí mismo. De esta forma, sería responsable de los fallos y no es eso lo que quiere. En el caso de predicciones estacionales, el nivel de predictibilidad es mucho más bajo, y se puede esperar poco de un "predictor experimentado". Por esto el número de

usuarios realmente interesados en la predicción estacional es pequeño.

¿Por qué hacer predicciones estacionales?

La mayor parte de los Servicios Meteorológicos, incluido *Météo-France*, realizan predicciones estacionales; algunos las difunden. La razón principal para hacerlo es el bajo coste marginal que representa para un Servicio Meteorológico llevar a cabo predicciones meteorológicas numéricas operativas: no es necesaria una red de observación de gran densidad, ni un ordenador nuevo ni predictores en distintas regiones.

Adaptar el modelo numérico a plazos mayores y dedicar una fracción de la capacidad de cálculo a predicciones a más largo plazo supone una inversión pequeña, comparada con la recepción de un sistema *ex nihilo* de observación, asimilación y predicción. Los modelos de predicción a corto plazo necesitan entregar sus salidas lo más rápidamente posible, pero no necesariamente cada hora: esto deja algo de tiempo libre al ordenador para las predicciones estacionales, que no hay que difundir en las próximas horas.

Los modelos numéricos en uso para la predicción estacional se basan en versiones de modelos de predicción de corto y medio plazo. Pueden ser idénticos, como en el Centro Europeo de Predicción Meteorológica de Medio Plazo (CEPMMP). Un Servicio Meteoro-

rológico lleva a cabo la investigación para mejorar los aspectos específicos del modelo que no se necesitan en un pronóstico a corto plazo, y la comercialización para convencer a los clientes potenciales de que utilicen un producto con una fiabilidad muy inferior al 100%.

En el caso de centros meteorológicos que no realizan análisis oceánicos, siempre existe la posibilidad de utilizar productos realizados en el exterior, ya que la asimilación oceánica puede hacerse de manera independiente al modelo atmosférico. En *Météo-France*, los análisis del océano son suministrados por el consorcio MERCATOR.

Las predicciones estacionales son viables, al menos en los centros meteorológicos que ya están implicados en la predicción numérica.

Una analogía básica en la física

La atmósfera obedece leyes, por lo tanto el tiempo es predecible y también debería serlo la próxima estación. Una moneda lanzada al aire siempre obedece leyes. Pero el uso de estas leyes indica que, si la moneda está fabricada con un material uniforme, la probabilidad de que salga cara o cruz es de un 50 por ciento. Si una cara está cubierta con un material denso, se pueden seguir dos aproximaciones. La primera consiste en repetir el experimento cientos de veces y estimar la nueva frecuencia de que salga cara contando. La segunda consiste en utilizar un modelo numérico basado en las leyes de la mecánica, en particular el Principio de Arquímedes.

La predicción estacional funciona como el segundo ejemplo. Predecir un 50 por ciento de caras corresponde a la predicción climatológica. La predicción climatológica no es solo decir que la temperatura de invierno en Toulouse es de 5°C, sino ofrecer la función de distribución de probabilidad (la curva roja de la Figura 1). Esta información puede ser muy útil para algunos usuarios.

La repetición de los experimentos de la moneda del último ejemplo corresponde a la predicción estadística. Hace muchos años, esta era la única solución, ya que no existían los ordenadores o no eran lo suficientemente potentes. La Oscilación Austral se descubrió gracias a predictores que investigaban el monzón en el Índico. Los refranes meteorológicos surgen del enfoque estadístico básico de nuestros antepasados. En unas pocas decenas de casos se basaban en el intervalo estacional, y sesgados hacia los fenómenos extremos, que eran mas fáciles de recordar: esto explica por qué no funcionan. En la actualidad, tenemos muchos más datos, métodos sin sesgo y ordenadores para obtener resultados en pocos segundos. Sin embargo este enfoque tiene una limitación.

Lanzar una moneda al aire puede repetirse con tanta frecuencia como sea necesario para obtener una respuesta significativa estadísticamente. En la predicción estadística estacional, tenemos unos 50 años, lo que implica 50 casos. Dada la complejidad de la atmósfera, ¿necesitamos 50, 500 ó 5 000 años? Durante la segunda mitad del siglo XX, se produjeron dos importantes episodios de El Niño-Oscilación Austral (ENOA): uno en el invierno de 1982-1983 y otro en el invierno de 1997-1998. Si tenemos en cuenta la temperatura del invierno en Francia, el primer invierno fue normal, el segundo, cálido. Esto ilustra la dificultad de encontrar en el pasado reciente un número suficiente de situaciones análogas para calcular estadísticos de condiciones estables.

Siguiendo la analogía de la moneda lanzada al aire, el uso de un modelo numérico para el movimiento de la moneda no homogénea es similar a lo que hacemos en la predicción numérica del tiempo. Tenemos que utilizar un enfoque probabilista, lo que significa obtener un conjunto de simulaciones. Calcular una trayectoria no tiene sentido, ni para la moneda ni para la atmósfera. La probabilidad

de la moneda no se puede calcular analíticamente.

Para la atmósfera, el enfoque analítico tiene incluso peor solución. En ambos casos, tenemos que utilizar un modelo determinista, y realizar muchas simulaciones modificando las condiciones iniciales. En *Météo-France* este modelo es el ARPEGE (Déqué y otros, 1994). Una vez que hemos elegido las ecuaciones para describir el fenómeno y un modelo numérico para resolverlas mediante aproximaciones, necesitamos un tercer ingrediente: el forzamiento. Si ignoramos el forzamiento, la probabilidad es del 50 por ciento para la moneda, y la distribución climatológica para la atmósfera. En el caso de la moneda, el forzamiento es sencillo: necesitamos la densidad y la profundidad de los dos materiales. En el caso de la atmósfera necesitamos saber, por ejemplo, en qué sentido un invierno frío como el de 1962-1963 o uno cálido como el de 2000-2001 (Figura 1) es distinto a otros inviernos.

¿De dónde viene la predictibilidad?

Lorenz popularizó en la década de 1960 el efecto mariposa y lo ilustró mediante el famoso modelo de tres variables (Lorenz, 1963). Consta de la divergencia rápida (unas pocas decenas de días) de dos trayectorias inicialmente muy cercanas una a la otra (distintas en el aleteo de una mariposa). Este efecto pone de relieve que el hecho de saber las condiciones de hoy sin una precisión perfecta (densidad de red, errores de observación) impide decir nada sobre la próxima estación. El efecto mariposa es fácil de demostrar en modelos numéricos, pero es imposible de probar con observaciones (necesitamos miles de años para encontrar dos situaciones atmosféricas que sean casi idénticas en el mundo para todos los parámetros mensurables).

Los refranes meteorológicos surgen del enfoque estadístico básico de nuestros antepasados. En el intervalo estacional se basaron en unas pocas decenas de casos, y sesgados hacia los fenómenos extremos, que eran mas fáciles de recordar: esto explica por qué no funcionan.

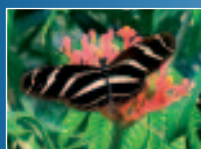
En la predicción estacional, cambian de un año a otro dos entradas del modelo: las condiciones iniciales y las condiciones de contorno. Si el modelo atmosférico no está acoplado con un modelo oceánico, la temperatura de la superficie del mar y la extensión del hielo marino constituyen condiciones de contorno claves para la predicción estacional. Otras condiciones de contorno juegan un papel menor (los aerosoles volcánicos, los gases de efecto invernadero antropogénicos, la constante solar) porque su forzamiento en la atmósfera es débil en escalas temporales cortas.

Respecto a las condiciones iniciales hay que decir que el estado de la atmósfera, la humedad del suelo y la cubierta de nieve son predictores potenciales. A pesar del efecto mariposa, el estado inicial de la atmósfera desempeña cierto papel en las latitudes medias a través de las configuraciones de teleconexión de evolución lenta (p. ej., la Oscilación del Atlántico Norte): las predicciones estacionales con una atmósfera inicial errónea ofrecen aciertos menores que las predicciones con la atmósfera correcta.

Experimentos numéricos simplificados con forzamientos extremos han puesto de relieve el potencial de predictibilidad de la humedad del suelo o la cubierta de nieve iniciales. Sin



En la escala temporal de una estación,



no predomina el efecto mariposa en el océano y la evolución de la temperatura de la superficie del mar tropical puede considerarse determinista.

embargo, el parámetro principal en los modelos actuales es la anomalía de la temperatura de la superficie del mar (TSM) en los océanos tropicales. Al calentar o enfriar la columna atmosférica superior y al excitar las ondas de Rossby que se propagan hacia latitudes medias, se producen diferencias interanuales en la circulación general. Estas diferencias son de naturaleza estadística: debido a las mariposas, una estación dada puede comportarse de manera distinta a lo que cabría esperar estadísticamente.

Como la TSM es el forzamiento principal, necesitamos predecirla. Pero esta TSM depende de los flujos atmosféricos, así que el problema que hay que resolver es acoplado. En el caso de los modelos acoplados de océano y atmósfera, el forzamiento principal no es una condición de contorno, sino la condición inicial del océano. En la escala temporal de una estación, no predomina el efecto mariposa en el océano y la evolución de la temperatura de la superficie del mar tropical puede considerarse determinista.

¿Cómo predecir el océano?

Una buena predicción de la temperatura de la superficie del mar es la clave para la predicción estacional. Sin embargo, no es una condición suficiente. En el proyecto europeo PROVOST (Doblas-

Reyes y otros, 2000) se forzaron modelos atmosféricos mediante la temperatura de la superficie del mar media observada mensualmente. Los aciertos fueron alentadores, pero modestos. A pesar del forzamiento, la atmósfera tiene la libertad suficiente para crear estaciones a partir de su propia fantasía. Una moneda con la cara de plomo y la cruz de aluminio no saldría cruz de manera sistemática al ser lanzada al aire.

Météo-France ha utilizado un modelo atmosférico no acoplado desde 1999 de manera operativa. Se predice la temperatura de la superficie del mar mediante un modelo estadístico basado en la persistencia. Este sistema se utiliza, o se ha utilizado, en muchos Servicios Meteorológicos (Canadá, Marruecos, Reino Unido). El sistema alternativo es un sistema acoplado de océano y atmósfera (en funcionamiento durante muchos años en el CEPMMMP y en Centros Nacionales de Predicción Medioambiental). El proyecto europeo DEMETER (Palmer y otros, 2004) ha supuesto una oportunidad para crear un experimento internacional multi-anual de repredicción utilizando modelos acoplados. El gran número de casos (44 para cada estación) permite estimaciones fiables de aciertos de predicción, incluso a escalas locales.

La Figura 2 muestra las correlaciones de la temperatura en invierno (basadas en series de medias de 44 estaciones) en Europa para el modelo de *Météo-France*. Los tres primeros gráficos ((a), (b) y (c)) corresponden a predicciones no acopladas mientras que el cuarto corresponde a predicciones acopladas de DEMETER. En realidad, la Figura 2(a) no es una predicción ya que se ha utilizado la TSM observada, como en PROVOST. En la Figura 2(b), la TSM está realmente predicha, utilizando el mismo modelo estadístico que el conjunto operativo de *Météo-France*. En la Figura 2(c) la TSM proviene de DEMETER: aunque la TSM es la misma (en promedio mensual) que en la Figura 2(d), los aciertos son mayores con el acoplamiento. Esto pone de manifiesto que la interacción entre el

océano y la atmósfera juega un papel y explica por qué es importante tener en cuenta predicciones acopladas.

En invierno, las predicciones acopladas son las mejores. En verano (no se muestra), los aciertos son peores o negativos, excepto al prescribir la TSM observada. El contraste entre el verano y el invierno es una característica del modelo de *Météo-France*. Con el modelo del CEPMMMP, los aciertos son mayores en verano que en invierno. La superioridad del enfoque acoplado frente al no acoplado también se obtiene en las predicciones de la precipitación tropical (Guérémy y otros, 2005), y con el modelo del *Met Office* del Reino Unido. Por esta razón, el CEPMMMP, el *Met Office* del Reino Unido y *Météo-France* han decidido seguir con la actividad de DEMETER en tiempo real para obtener una predicción operativa de múltiples modelos.

En el sitio Web de DEMETER: <http://www.ecmwf.int/research/demeter/d/charts/verification>, se pueden encontrar muchos aciertos.

En este punto del artículo, todavía no hemos evaluado las predicciones de probabilidad, pero podemos decir que en algunas regiones o estaciones las predicciones deterministas no son independientes de los datos que predicen. Las predicciones estacionales son creíbles.

Adaptación estadística

¿Todavía necesitamos predicciones no acopladas? La primera respuesta es que este enfoque es distinto y, por lo tanto, complementario al enfoque acoplado. DEMETER ha demostrado que el uso de varios modelos es preferible al uso de un modelo sencillo, aunque sea el mejor. La segunda respuesta es que el resultado final de una predicción estacional no solo es la salida del modelo. Las predicciones pueden adaptarse a una escala menor que la del modelo (300 km para *Météo-France*).



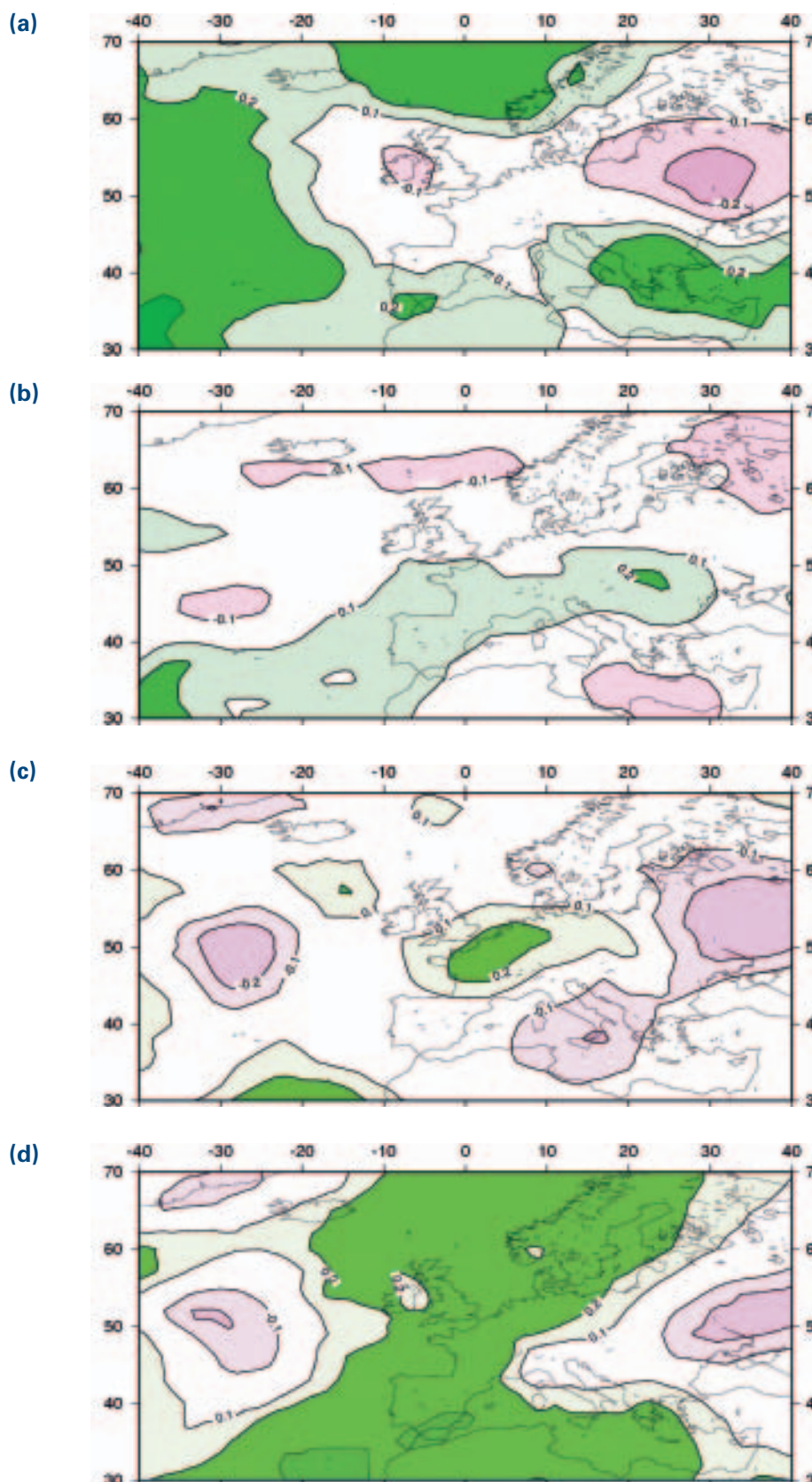
Figura 2 — Correlación de la temperatura a 850 hPa de 44 inviernos (DJF) con ARPEGE y la temperatura de la superficie del mar prescrita: (a) observada; (b) calculada con un modelo estadístico; (c) calculada con DEMETER; el gráfico (d) corresponde a las predicciones con el modelo acoplado (DEMETER); líneas de $\pm 0,1$, $\pm 0,2$ y $\pm 0,3$.

Se pueden corregir algunas desviaciones mediante las estadísticas de salida de modelos. Esto es exactamente el mismo enfoque que en la predicción a corto plazo. Una diferencia importante es que no se alcanza el tamaño de las muestras necesario para un ajuste bueno y robusto si nos limitamos a los 10 últimos años. Por otra parte, para obtener el máximo beneficio de un modelo acoplado, se necesitan análisis del océano de buena calidad. Solo se dispone de esta clase de datos desde finales de la década de 1980.

La realización de predicciones de probabilidad también requiere un tipo de posproceso estadístico. Ciertamente, el modelo produce predicciones deterministas y el considerar un conjunto de predicciones como una representación de la función de distribución de probabilidad se basa en la hipótesis errónea de que el modelo es perfecto. Las técnicas basadas en análogos (Clark y Déqué, 2003) dan predicciones de probabilidad sin sesgos. Otras técnicas son el enfoque de múltiples modelos o un modelo que utilice en su física términos aleatorios.

¿Cómo utilizar las predicciones estacionales?

El hecho de que la correlación no sea cero no es suficiente para que una predicción sea útil. Una aproximación de la evaluación de las predicciones se basa en la expectativa de beneficio con un modelo de coste/pérdida. Palmer (2000) describe este modelo económico muy sencillo. Se ha aplicado a las predicciones de *Météo-France* de la



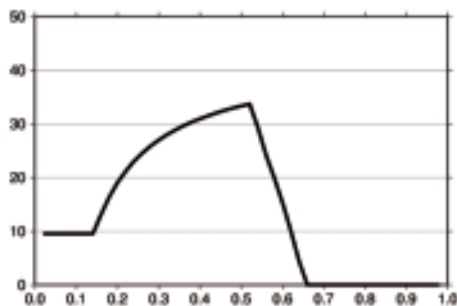


Figura 3 — Valor económico (en %) para la predicción estacional de la temperatura de invierno en Toulouse como función de la razón coste/pérdida para una predicción estacional más cálida de lo normal frente a una más fría de lo normal

precipitación tropical en Déqué (2001). Este método se aplica a predicciones binarias para las que se emite un pronóstico de probabilidad.

La Figura 3 muestra una ilustración de la temperatura de invierno más fría de lo normal frente a una más cálida de lo normal. Si las consecuencias de una decisión basada en la predicción son un coste C o una pérdida P , el beneficio esperado frente a la estrategia básica basada en la predicción climatológica puede calcularse como una función de C , P y la matriz 2×2 de probabilidad de aparición del suceso (predicho frente a observado). Al ponderarlo con el beneficio esperado con el mejor pronóstico posible, el resultado sólo depende de la relación C/P . Este beneficio relativo se llama "valor económico".

La Figura 3 indica que este valor es máximo cuando C/P está próximo a 0,5. La probabilidad del suceso es ciertamente 0,46 (temperatura de invierno en Toulouse por debajo de la media estacional). Cuando C/P es mayor que 0,65, es mejor una predicción climatológica que la predicción de DEMETER. Pero entre 0,45 y 0,55, el beneficio es de alrededor del 30 por ciento del de una predicción perfecta.

Así que las predicciones estacionales son útiles, al menos para algunos usuarios.

Conclusión

¿Son las predicciones estacionales viables, creíbles y útiles? Hemos demostrado en las secciones anteriores que la respuesta a las tres preguntas es "sí". Dada la generación actual de modelos numéricos y la capacidad de cálculo disponible, es factible ejecutar en un par de días un modelo de 10 predicciones cada mes para los próximos seis meses.

Los experimentos internacionales de repredicción han puesto de relieve que los aciertos, aunque sean débiles, no pueden obtenerse mediante un proceso aleatorio simple y no son resultado de un accidente, evaluando la credibilidad de las predicciones más allá de un mes. Los enfoques económicos sencillos (y el uso real por parte de gente que no es meteoróloga en algunos casos) muestran que estas predicciones pueden ser útiles, siempre que el problema esté bien planteado: conocimiento de los costes y de los beneficios de los éxitos y de los errores, posibilidad de evaluación en un período grande del pasado, aproximación probabilística en un contexto multifactorial de decisiones. Habría que tener en cuenta que el hecho de que el problema esté bien planteado no implica necesariamente que su solución sea satisfactoria.

El principal mensaje de los últimos avances científicos es que las predicciones estacionales no son —ni serán durante mucho tiempo— de la misma naturaleza que las predicciones a corto plazo. Nadie puede decir cómo será el futuro en ese plazo, ni siquiera con un margen de error. Pero las predicciones estacionales ayudan a tomar una decisión cuando las consecuencias de esta decisión dependen del tiempo de los próximos meses. El progreso en la modelización y en la asimilación de la atmósfera y del océano hará que nuestras predicciones estacionales sean más creíbles y útiles... pero no absolutamente ciertas todavía.

Referencias

- CLARK, R. T. y M. DÉQUÉ, 2003: Conditional probability seasonal predictions of precipitation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, 1-15.
- DÉQUÉ, M., C. DREVETON, A. BRAUN y D. CARIOLLE, 1994: The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Clim. Dyn.*, 10, 249-266.
- DÉQUÉ, M., 2001: Seasonal predictability of tropical rainfall: probabilistic formulation and validation. *Tellus*, 53A, 500-512.
- DOBLAS-REYES, F. J., M. DÉQUÉ y J. Ph. PIEDELIEVRE, 2000: Model and multi-model spread in the PROVOST seasonal forecasts: application to probabilistic forecasts. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 2069-2088.
- GUÉRÉMY, J. F., M. DÉQUÉ, A. BRAUN y J. P. PIEDELIEVRE, 2005: Actual and potential skill of seasonal predictions using the CNRM contribution to DEMETER: coupled versus uncoupled model. *Tellus*, 57A, 308-319.
- LORENZ, E. N., 1963: Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20, 130-141.
- PALMER, T. N., C. BRANKOVIC y D. S. RICHARDSON, 2000: A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 2013-2033.
- PALMER, T. N., A. ALESSANDRI, U. ANDERSEN, P. CANTELAUBE, M. DAVEY, P. DÉLÉCLUSE, M. DÉQUÉ, E. DÍEZ, F. J. DOBLAS-REYES, H. FEDDERSEN, R. GRAHAM, S. GUALDI, J.-F. GUÉRÉMY, R. HAGEDORN, M. HOSHEN, N. KEENLYSIDE, M. LATIF, 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 inter-annual Prediction (DEMETER). *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85, 853-872.
- POINCARÉ, H., 1881: Mémoire sur les courbes définies par une équation différentielle. *J. de Math.*, 7, 375-442.