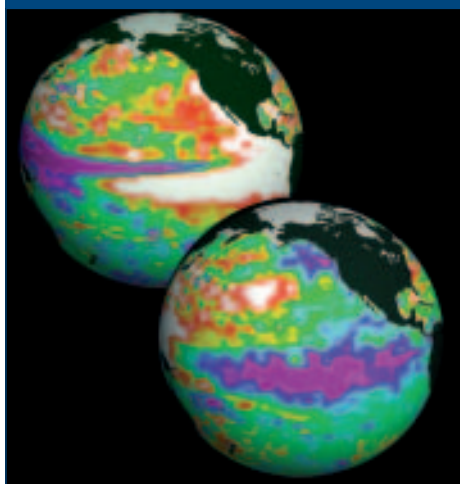


Predictibilidad y predicción del clima con modelos acoplados



El Niño tal vez sea una de las interacciones mejor conocidas entre el océano, la atmósfera y la tierra. (Imagen: JPL, NOAA)

**Por Ben P. Kirtman,
del Centro de Estudios del Océano,
la Tierra y la Atmósfera y el Programa
de Dinámica del Clima de la
Universidad de George Mason**

El gran desafío al que se enfrenta la comunidad científica es determinar hasta qué punto es predecible el clima y, después, realizar predicciones climáticas que sean beneficiosas para la sociedad. Al reconocer este desafío y esta oportunidad, el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) ha puesto en marcha una importante estrategia de investigación interna-

Observación y Predicción Coordinadas del Sistema Terrestre

El PMIC ha definido un nuevo marco estratégico para los próximos diez años que, bajo el título de Observación y Predicción Coordinadas del Sistema Terrestre (COPES), sacará provecho del progreso pasado con el objetivo de facilitar el análisis y la predicción de la variabilidad y el cambio del sistema terrestre para su uso en un conjunto cada vez mayor de aplicaciones prácticas de importancia, beneficio y valor directos para la sociedad.

La COPES ofrecerá el contexto unificador y un programa de trabajo para la amplia gama de ciencias climatológicas coordinadas por los proyectos centrales del PMIC y otras actividades, y realizada a través de ellos, y para demostrar su importancia para la sociedad.

Bajo este marco estratégico, el PMIC pretenderá determinar qué aspectos del clima son predecibles, y con cuánta antelación y para qué regiones pueden predecirse. Esta información ofrecerá aportaciones valiosas para la gestión de los riesgos climatológicos en los sectores público y privado, contribuirá a la planificación para el desarrollo sostenible y sentará una base para la reducción y la mitigación de desastres por riesgos naturales. Un paso esencial para predecir mejor el clima y su aplicación es observar y comprender el estado actual del clima. Las deficiencias en el conocimiento revelarán la necesidad de nuevas estrategias de observación (tanto para sistemas de teledetección como *in situ*), de estudios de procesos y de mejores modelos de predicción.

cional denominada Observaciones y Predicción Coordinadas del Sistema Terrestre (COPES) (véase el recuadro). La consolidación de la COPES supone el reconocimiento (basado en parte en varios años de investigación coordinada por el PMIC) de que el éxito de la predicción del clima requiere modelos informáticos integrales que incluyan todas las interacciones de todas las componentes del sistema climático (atmósfera, océano, tierra, hielo). Tal vez, las más conocidas de todas estas interacciones, sobre todo debido al acoplamiento entre el aire y el mar en el Pacífico tropical, sean las asociadas al fenómeno de El Niño/Oscilación Austral (ENOA). La COPES va, necesariamente, más allá del ENOA para fomentar el uso de modelos integrales acoplados de circulación general (MACG) de océanos, tierra, atmósfera y hielo para mejorar la predicción de estacional a interanual.

Por ejemplo, ¿cómo afectan las interacciones entre la tierra, la atmósfera y el océano a la predictibilidad del

clima fuera del Pacífico tropical? Ciertamente, como el clima cambia a escalas temporales mayores, la captura de todas estas interacciones se convierte en algo muy importante para las predicciones estacionales a interanuales de utilidad. A la luz de las actividades emergentes de la COPES, este artículo pretende estudiar brevemente el estado actual de los MACG en términos tanto de la simulación como de la predicción de las variaciones climáticas de estacionales a interanuales. La cuestión clave radica en cómo simulan y predicen los MACG las temperaturas de la superficie del mar tropical, y se presta especial atención a algunos de los errores bastante desalentadores de los modelos que ponen de manifiesto que el colectivo de los MACG tiene mucho trabajo por delante.

Durante la última década ha habido un progreso continuado en la simulación de la variabilidad climática mundial de estacional a interanual utilizando MACG (Davey y otros, 2002; Achuta

Rao y Sperber, 2002). A lo largo de los últimos años, la física parametrizada (es decir, cómo interactúa la radiación solar con las nubes y los procesos de precipitación en escalas espaciales que los MACG siguen sin resolver) se ha vuelto más exhaustiva (Gregory y otros, 2000; Collins y otros, 2001; Kiehl y Gent, 2004), la resolución horizontal y vertical, sobre todo en el modelo de componentes atmosféricas ha crecido notablemente (Guilyardi y otros, 2004) y la aplicación de las observaciones en la inicialización de predicciones se ha vuelto más sofisticada (Alves y otros, 2004). A pesar de este progreso, persisten graves errores sistemáticos tanto en el clima medio como en la variabilidad natural simulados. Por ejemplo, el llamado problema de la “doble ZCIT” observado por Mechoso y otros (1995) sigue siendo una fuente importante de errores al simular el ciclo anual en los trópicos. Esto afecta, en última instancia, a la fidelidad de la temperatura de la superficie del mar (TSM) simulada y a la precisión de las predicciones.

El problema de la doble ZCIT se ve como una tendencia marcada en los MACG a producir una banda errónea de precipitación intensa al sur del ecuador en el este de los océanos Pacífico y Atlántico. El hecho de que este problema siga estropeando los MACG de vanguardia actuales pone de relieve que continúan existiendo problemas fundamentales de modelización en términos de conocer cómo interactúan la convección atmosférica y la capa límite con la superficie del océano.

Respecto a la evaluación de los MACG, una medida clave ha sido comparar las temperaturas simulada y observada de la superficie del mar a lo largo del ecuador. En la Figura 1 se muestran ejemplos basados en algunas simulaciones de MACG. La línea negra gruesa corresponde a las observaciones y las diferentes líneas de color corresponden a las distintas

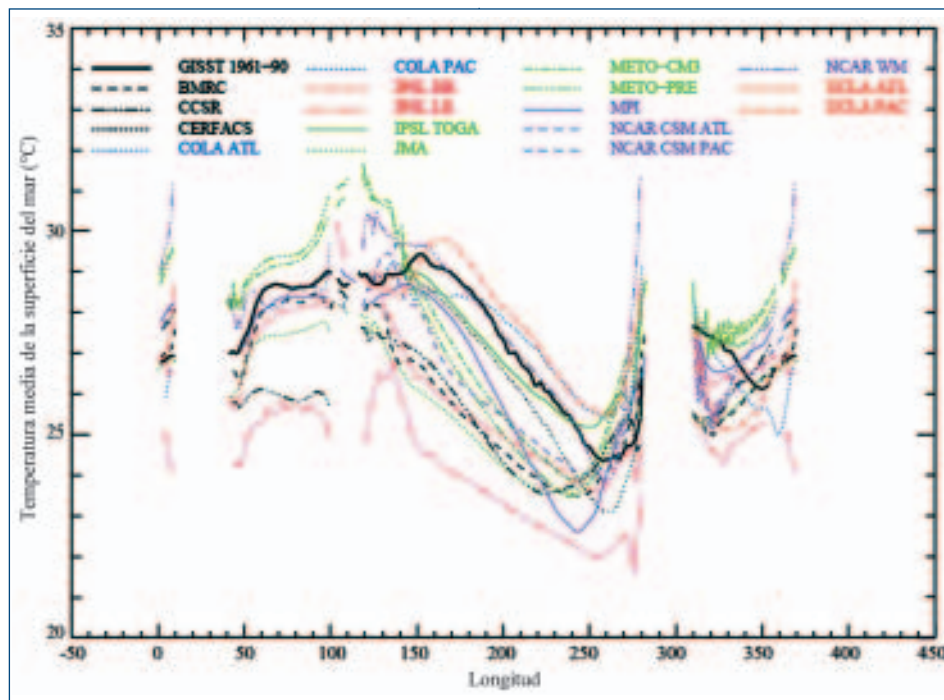


Figura 1 — Temperatura media anual de la superficie del mar, 2°N-2°S, sin corrección de flujo

simulaciones de MACG. El Grupo de Trabajo de CLIVAR sobre Predicción Estacional a Interanual (GTPEI) del PMIC coordinó los resultados que aparecen en la Figura 1.

En la mayor parte del Pacífico ecuatorial hay una tendencia global de los modelos a ser demasiado fríos, aunque simulan un contraste entre un Pacífico occidental cálido y uno oriental frío. En las proximidades de la costa oriental de América del Sur, casi todos los modelos son demasiado cálidos. En el Atlántico, los modelos fallan universalmente al captar el contraste entre el este y el oeste en la temperatura de la superficie del mar. Este error del modelo en el Atlántico crea un desafío importante al tratar de utilizar las observaciones del océano para inicializar las predicciones. Se han diseñado esfuerzos coordinados de investigación internacional para mejorar

estos problemas. En el Océano Índico ecuatorial, el contraste entre el este y el oeste parece que se simula bastante bien, aunque se pueden detectar sesgos cálidos y fríos importantes.

Además de la temperatura media de la superficie del mar considerada anteriormente, un tema importante es la bondad con la que los MACG simulan la variabilidad de la temperatura de la superficie del mar a escalas temporales de estacionales a interanuales.

En el mismo formato que la Figura 1, la variabilidad de la temperatura de la superficie del mar simulada por varios MACG se representa en la Figura 2. Aquí se muestran las desviaciones estándar mensuales de las temperaturas de la superficie del mar. Esta es la variabilidad sobre el ciclo anual. De nuevo, la línea negra gruesa corresponde a los cálculos de las observaciones. La mayor variabilidad observada se da en el



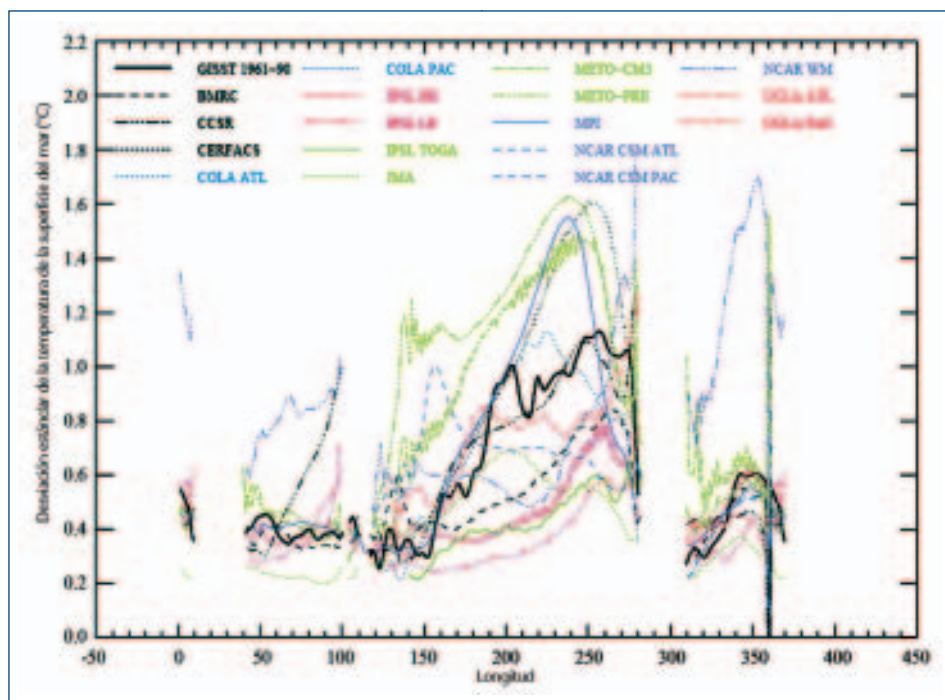


Figura 2 — Desviación estándar media de la temperatura de la superficie del mar, 2°N-2°S, sin corrección de flujo

Pacífico, al este de 150°, correspondiendo con el ENOA, y en general los modelos captan esta preferencia de la mayor variabilidad por producirse en el Pacífico. Sin embargo, la mayor parte de los MACG subestiman la variabilidad de la temperatura de la superficie del mar del ENOA en el Pacífico tropical (Achuta Rao y Sperber, 2002), no captan el alcance meridional de las anomalías en el este del Pacífico (no mostradas) y tienden a dar anomalías que llegan demasiado lejos, hasta el oeste del Pacífico tropical. Esta extensión errónea hacia el oeste se puede ver con claridad en los valores relativamente grandes de la desviación estándar simulada al oeste de 150°. La mayor parte de los MACG, aunque no todos, dan una variabilidad del ENOA que se produce a escalas temporales considerablemente más rápidas que las observadas (Achuta Rao y Sperber, 2002). Esto significa que el período observado del ENOA está entre tres y siete años, mientras que los modelos

tienden a dar períodos del ENOA del orden de dos a cuatro años.

Este problema del ENOA “rápido” tiene implicaciones en lo que se refiere al conocimiento de los límites de la predictibilidad y tiene un efecto perjudicial en el acierto de la predicción. Los modelos también tienen una variabilidad con una frecuencia demasiado pequeña (es decir, en escalas tempora-

El gran desafío al que se enfrenta la comunidad científica es determinar hasta qué punto es predecible el clima y, después, hacer predicciones climáticas que sean beneficiosas para la sociedad.

les mayores que el ENOA), que puede suponer graves implicaciones con respecto al conocimiento de las variaciones de la predictibilidad, sobre todo en presencia de escenarios de cambio climático. En los Océanos Atlántico e Índico, la variabilidad observada es considerablemente más pequeña y, generalmente, los modelos funcionan mejor. A pesar de la amplitud relativamente pequeña, los estudios recientes sugieren que existe potencial para la predictibilidad que en la actualidad no se explota, tanto en el Océano Índico como en el Atlántico.

La investigación actual también parece prometedora al tratar algunos de los problemas anteriores. Por ejemplo, aumentar la resolución atmosférica tanto en la horizontal (Guilyardi y otros, 2004) como en la vertical (Saha y otros, 2005) puede reducir el problema del ENOA rápido; también se ha puesto de manifiesto que la física parametrizada del océano influye de manera importante en la variabilidad acoplada (Meehl y otros, 2001); y que la experimentación numérica metódica y continuada de las fuentes de error del modelo (p. ej., Schneider, 2001) acabará por sugerir estrategias de mejora del modelo.

Hasta la fecha, las actividades de predicción más estacionales se han centrado en el ENOA y, como pasa con la simulación de los MACG, ha habido un progreso continuado. (Como se observó anteriormente, los últimos estudios han identificado la importancia de captar la variabilidad de los Océanos Índico y Atlántico).

El episodio de ENOA cálido-frío de 1997-1999 fue un ejemplo llamativo de cómo ha mejorado la predicción de los MACG, pero también puso de relieve los retos persistentes que existen en la modelización. Por ejemplo, casi todos los modelos predijeron que el invierno boreal de 1997-1998 sería un episodio de ENOA

cálido con un adelanto de una o dos estaciones: un éxito claro. Sin embargo, ningún modelo captó la llegada temprana del episodio ni su amplitud y muchos de los sistemas de predicción captaron con dificultad la desaparición del episodio cálido y el desarrollo de anomalías frías que predominaron a lo largo de 2001: podría decirse que esto constituyó un fracaso. Más recientemente, muchos modelos fallaron al predecir los tres años consecutivos (1999-2001) de condiciones relativamente frías y el desarrollo de anomalías cálidas en el Pacífico central durante el verano boreal de 2002.

En parte, los éxitos y los fracasos de la predicción del episodio del ENOA de 1997-1999 han llevado a dos importantes cambios en el pensamiento de la comunidad de predicción de los MACG.

- Las predicciones deben incluir información cuantitativa referente a la incertidumbre (es decir, predicción probabilística) y la verificación debe incluir medidas probabilísticas del conocimiento técnico (Kirtman, 2003).
- Una estrategia de conjunto de varios modelos puede constituir el mejor enfoque actual para resolver adecuadamente la incertidumbre de la predicción (Palmer y otros, 2004).

El reconocimiento de que las predicciones deben incluir medidas cuantitativas de incertidumbre es donde es más probable que la comunidad de la predicción de estacional a interanual con MACG ofrezca productos de predicción que tengan una gran demanda social.

La Figura 3, por ejemplo, destaca tanto la verificación probabilística como el poder potencial del enfoque de modelos múltiples. Los resultados presentados resumen los experimentos de predicción retrospectiva del proyecto de Desarrollo de un sistema europeo de conjuntos de modelos múltiples para la predicción del clima a escalas comprendidas entre la estacional y

***El episodio de ENOA
cálido-frío de 1997-1999
constituyó un ejemplo
llamativo de cómo ha
mejorado la predicción de
los MACG, pero también
puso de relieve los
desafíos persistentes de
la modelización.***

la interanual (DEMETER). La variable dibujada en el eje de ordenadas es el índice ordenado de acierto de la probabilidad (RPSS). Los valores mayores de RPSS implican un acierto probabilístico mayor y los valores inferiores a cero implican que no ha habido aciertos útiles. El eje de abscisas corresponde al número de miembros del conjunto.

La predicción por conjuntos es la forma en que se hacen las predicciones probabilísticas. Por ejemplo, en el caso de un modelo simple, las predicciones múltiples se han llevado a cabo utilizando estimaciones ligeramente distintas del estado inicial observado.

A medida que evolucionan las predicciones, divergen y se expanden, y es esta propagación la que se utiliza para evaluar la incertidumbre en la predicción debida a la incertidumbre de la condición inicial. Entonces se puede evaluar el acierto de la predicción utilizando medidas de verificación probabilística (es decir, RPSS). La aproximación de conjuntos de modelos múltiples, por el contrario, puede utilizarse para demostrar tanto la incertidumbre de la condición inicial como la incertidumbre debida a la formulación del modelo.

La Figura 3 muestra claramente que, incluso para tamaños de conjunto relativamente grandes, un enfoque de conjunto de modelos múltiples supera al de cualquier modelo simple. Otra forma de interpretar los resultados de la Figura 3 es que las diferencias entre los modelos se utilizan para obtener mejores estimaciones probabilísticas de un resultado de predicción particular.

La importancia de este enfoque de modelos múltiples no puede exagerarse. Sin embargo, el enfoque de modelos múltiples también presenta problemas prácticos y teóricos para las

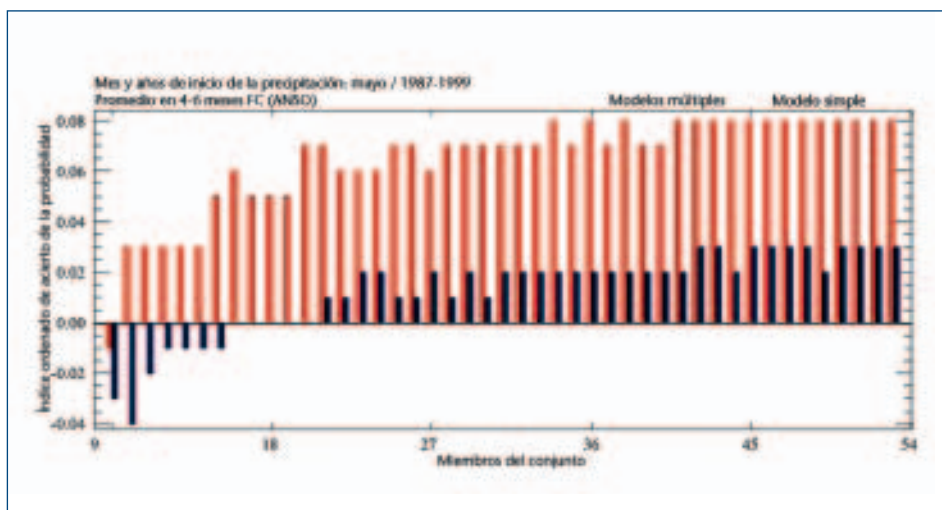


Figura 3 — Temperatura a 2 m por encima de la superficie de la Tierra: índice ordenado de acierto de la probabilidad en los trópicos

comunidades internacionales operativa y científica:

- ¿Cuál es la estrategia óptima de modelos múltiples?
- ¿Qué modelos deberían utilizarse?
- ¿Cómo tienen que valorarse los modelos?
- ¿Cómo se coordina internacionalmente la actividad de predicción de MACG de modelos múltiples?

Ciertamente, la estrategia COPES está diseñada para ayudarnos a resolver estas preguntas.

También ha habido mejoras constantes en el uso de datos, sobre todo en el océano. La investigación sobre la inicialización de predicciones sigue ofreciendo mejoras en el acierto de la predicción (Alves y otros, 2004). Más aún, los últimos trabajos indican que las estrategias de inicialización de la predicción que se han aplicado en el marco del sistema acoplado en oposición a los modelos de componentes individuales también pueden dar lugar a importantes mejoras en el acierto (Chen y otros, 1995).

Sin embargo, hay cuestiones básicas referentes a la predictibilidad de la temperatura de la superficie del mar en los trópicos que continúan suponiendo unos desafíos abiertos para el colectivo de la predicción. Por ejemplo, no está claro cómo las irrupciones de vientos del oeste, la variabilidad intraestacional o el ruido meteorológico atmosférico en general, limitan la predictibilidad (p. ej., Thompson y Battisti, 2001; Kleeman y otros, 2003; Flugel y otros, 2004; Kirtman y otros, 2004). También hay variaciones decenales aparentes en el acierto de la predicción (Balmaseda y otros, 1995; Ji y otros, 1996; Kirtman y Schopf, 1998) y las fuentes de estas variaciones constituyen materia para algún debate. Por último, sigue sin estar claro cómo afectarán finalmente los cambios del clima medio en la predictibilidad estacional a interanual (Collins y otros, 2002).

Referencias

- ACHUTA RAO, K. y K. R. SPERBER, 2002: Simulation of the El Niño Southern Oscillation: Results from the coupled model intercomparison project. *Clim. Dyn.*, 19, 191-209.
- ALVES O., M. A. BALMASEDA, D. ANDERSON y T. STOCKDALE, 2004: Sensitivity of dynamical seasonal forecast to ocean initial conditions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130, 647-667.
- BALMASEDA, M. A., M. K. DAVEY y D. L. T. ANDERSON, 1995: Decadal and seasonal dependence of ENSO prediction skill. *J. Climate*, 8, 2705-2715.
- CHEN, D., S. E. ZEBIAK, A. J. BUSALACCHI y M. A. CANE, 1995: An improved procedure for El Niño forecasting. *Science*, 269, 1699-1702.
- COLLINS, M., S. F. B. TETT y C. COOPER, 2001: The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 17, 61-81.
- COLLINS, M., D. FRAME, B. SINHA y C. WILSON, 2002: How far ahead could we predict El Niño? *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 1492, doi:10.1029/2001GL013919.
- DAVEY, M. K. y coautores, 2001: STOIC: A study of coupled GCM climatology and variability in tropical ocean regions. *Clim. Dyn.*, 18, 403-420.
- FLUGEL, M., P. CHANG y C. PENLAND, 2004: The role of stochastic forcing in modulating ENSO predictability. *J. Climate* (en imprenta).
- GREGORY, D., J. MORCRETTE, C. JAKOB, A. BELJAARS y T. STOCKDALE, 2000: Revision of convection, radiation and cloud schemes in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 1685-1710.
- GUILYARDI, E. y coautores, 2004: Representing El Niño in coupled ocean-atmosphere GCMs: the dominant role of the atmosphere component. *J. Climate* (2005, en imprenta).
- JI, M., A. LEETMAA y V. E. KOUSKY, 1996: Coupled model predictions of ENSO during the 1980s and the 1990s at the National Centers for Environmental Prediction. *J. Climate*, 9, 3105-3120.
- KIEHL, J. T. y P. R. GENT, 2004: The Community Climate System Model, Version 2. *J. of Climate*, 17, 3666-3682.
- KIRTMAN, B. P., K. PEGION y S. KINTER, 2004: Internal atmospheric dynamics and climate variability. *J. Atmos. Sci.*, 62, 2220-2233.
- KIRTMAN, B. P., 2003: The COLA anomaly coupled model: Ensemble ENSO prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2324-2341.
- KIRTMAN, B. P. y P. S. SCHOPF, 1998: Decadal variability in ENSO predictability and prediction. *J. Climate*, 11, 2804-2822.
- KLEEMAN, R., Y. TANG y A. M. MOORE, 2003: The calculation of climatically relevant singular vectors in the presence of weather noise as applied to the ENSO problem. *J. Atmos. Sci.*, 60, 2856-2868.
- LATIF, M. y coautores, 2001: ENSIP: The El Niño simulation intercomparison project. *Clim. Dyn.*, 18, 255-276.
- MECHOSO, C. R., y coautores, 1995: The seasonal cycle over the tropical Pacific in general circulation model. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2825-2838.
- MEEHL, G. A., P. R. GENT, J. M. ARBLASTER, B. L. OTTO-BLIESNER, E. C. BRADY y A. CRAIG, 2001: Factors that affect the amplitude of El Niño in global coupled climate models. *Clim. Dyn.*, 17, 515-526.
- PALMER, T. N. y coautores, 2004: Development of a European multimodel ensemble system for seasonal to interannual prediction (DEMETER). *Bul. Amer. Met. Soc.*, 85, 853-872.
- SCHNEIDER, E. K., 2001: Causes of differences between the equatorial Pacific as simulated by two coupled GCMs. *J. Climate*, 15, 2301-2320.
- THOMPSON, C. J. y D. S. BATTISTI, 2001: A Linear Stochastic Dynamical Model of ENSO. Part II: Analysis. *J. Climate*, 14, 445-466.