

# CAMBIO DE LAS GLOBAL

## Los métodos econométricos ofrecen nuevas pruebas del cambio en las temperaturas y alertan sobre los riesgos de la intervención humana en el sistema climático

Carlos Gay García y Francisco Estrada

### CONCEPTOS BASICOS

- Si la huella de las perturbaciones aleatorias que afectan al sistema climático no decrece con el tiempo, no podría decirse qué rumbo seguirán las temperaturas del planeta aunque aparentaran tener una tendencia de fondo a crecer.
- Hay técnicas econométricas que, incluso en esos casos no estacionarios, permitirían atribuir a la acción humana un calentamiento progresivo del planeta. Pero para aplicar esas técnicas es necesario que las temperaturas puedan representarse como procesos integrados.
- Los autores proponen otro enfoque econométrico que permite considerar las temperaturas como procesos en los que las perturbaciones se disipan con el tiempo y existe reversión a la media. Puede predecirse un aumento progresivo de las temperaturas planetarias por la acción humana, con unos pocos cambios en el ritmo de crecimiento espaciados en el tiempo.

A una sucesión de datos ordenados conforme al momento en que hayan sido tomados se le llama en estadística y econometría “serie de tiempo” o “serie temporal”. Dichas series pueden ser determinísticas, estocásticas o una combinación de ambas. Si el proceso que genera esos datos es determinista, habrá una ecuación que prediga con exactitud los valores futuros de la serie a partir de los valores ya conocidos. Una ecuación así resulta particularmente sencilla si el proceso consiste en una tendencia lineal: para obtener el dato del tiempo  $t$  a partir del dato del tiempo  $t - 1$  basta con sumarle a éste una cantidad fija. Los datos de una serie de ese tipo se representarán gráficamente en función del tiempo como una recta; su pendiente será igual a esa cantidad fija que se añade.

En la realidad suele ocurrir que un proceso, aunque se atenga en líneas generales a una tendencia determinística, sufre perturbaciones que lo separan de la tendencia en cuestión. Esas perturbaciones forman, a su vez, su propia serie de tiempo. Que sean, o parezcan, aleatorias no quiere decir que no podamos expresar nada sobre ellas: tendrán una media, que a menudo será cero (lo mismo podrán darle que quitarle a la tendencia), sus valores se agruparán alrededor de esa media con cierto grado de dispersión, es decir, tendrán una cierta varianza, y la observación en el tiempo  $t$  mantendrá una relación de dependencia o independencia con los valores pasados de la serie. Esta relación se conoce como persistencia o memoria; suele representarse por medio de la función de autocorrelación, que mide el grado de asociación del valor en el tiempo  $t$  con las observaciones de los períodos  $t - k$ , donde  $k$  es mayor que cero.

Si el proceso no tiene memoria, el valor de la serie para el período  $t$  se obtendrá del valor  $t - 1$  restando de éste la perturbación del período  $t - 1$  y sumando una cantidad fija (la tendencia) y la perturbación del período  $t$ . Es decir, el valor en  $t$  de la serie será igual a  $t$  veces la cantidad fija más la perturbación añadida en  $t$  (más el valor que la serie tuviese en el instante cero).

Aunque cada período aportará una perturbación que contribuirá a separar de la tendencia el dato correspondiente al período de que se trate, la desviación con respecto a la tendencia en el período de marras

# TEMPERATURAS Y HEMISFERICAS



no tendrá necesariamente por qué ser igual a la perturbación generada en el período. El proceso puede tener memoria: la desviación estará influida entonces por la persistencia de algunas o *todas* las perturbaciones anteriores.

Si el proceso tiene memoria pero ésta no es infinita, las perturbaciones anteriores afectarán el valor actual de la serie, pero su efecto se disipará con el transcurso del tiempo. Es decir, la diferencia entre el valor observado y el valor de la tendencia en el tiempo  $t$  estará determinado únicamente por la perturbación en el tiempo  $t$  y una suma ponderada de las perturbaciones de un número limitado de períodos anteriores.

Si, por ejemplo, el proceso es autorregresivo de primer orden, el valor de la serie para el período  $t$  se obtendrá sumando la perturbación del período  $t$ , más  $\phi$  veces la perturbación del período  $t-1$  y el valor de la tendencia en el tiempo  $t$ . Cuando  $\phi$  es menor que la unidad

en valor absoluto, se dice que el proceso es tendencia-estacionario (TE) y tiene ciertas propiedades como reversión a la media y una memoria finita.

En el caso particular en que  $\phi$  es igual a uno, el valor en  $t$  de la serie será igual a la suma de *todas* las perturbaciones añadidas a lo largo de los  $t$  períodos (más el valor que la serie tuviese en el instante cero). Esta suma de perturbaciones aleatorias genera una tendencia estocástica, que también mostrará un movimiento de largo plazo pero que, a diferencia de un proceso de TE, no es predecible. A un proceso así se le denomina camino aleatorio.

Si las perturbaciones tienen una media nula, podría parecer que carecerá de importancia que el valor en  $t$  de la serie incluya en sí el valor de todas las perturbaciones anteriores o sólo el de la perturbación del propio período  $t$ , ya que la media incondicional de la serie no cambiará por ello. Pero el efecto de esta

**1. ¿ES EL CALENTAMIENTO del sistema climático atribuible a la actividad humana? Mediante métodos econométricos, se muestran indicios de que el calentamiento observado durante el siglo xx no es fruto de la variabilidad natural del sistema.**

## PROCESOS DE RAIZ UNO: UN EJEMPLO SENCILLO

Supongamos una apuesta en la que se lanza una moneda justa, es decir, que tiene 50 por ciento de probabilidades de salir cara y 50 por ciento de que salga cruz. Cada uno de los lanzamientos puede verse como una realización de una variable aleatoria que sigue una distribución de Bernoulli. Cada realización es independiente, de tal suerte que el resultado de lanzar la moneda la vez  $n$  no está influida por el resultado de ninguna de las  $n - 1$  veces anteriores. Imaginemos que por cada cara que se obtenga se recibe un euro, mientras que por cada cruz debe pagarse un euro. El valor esperado de dicha apuesta es cero; su varianza, un cuarto.

Consideremos ahora la variable aleatoria  $S_n$ , que consiste en la suma de todas las ganancias y pérdidas que se acumulan desde el primer hasta el  $n$ -ésimo lanzamiento de moneda. Nótese que ahora el valor que tome esta variable no es independiente del pasado: su valor después del  $n$ -ésimo lanzamiento depende sólo del acumulado de ganancias y pérdidas hasta  $n - 1$  y del resultado del  $n$ -ésimo lanzamiento.

Si bien en este caso la esperanza de la variable  $S_n$  sigue siendo cero, su varianza crece con el número de apuestas. De hecho, si la apuesta se realizara un número infinito de veces, la varianza de  $S_n$  se haría infinita. El sumatorio de las realizaciones de la distribución de Bernoulli produce una tendencia estocástica que tiende a alejar cada vez más el valor de la variable de su valor esperado, mostran-

do crecimientos y disminuciones de forma impredecible. De esta manera, durante una racha afortunada, las ganancias crecerían de forma sistemática, mientras que las ganancias disminuirían de igual forma durante las rachas desafortunadas. Sin embargo, sería imposible pronosticar el momento en que terminaría o iniciaría cualquiera de ellas.

Consideremos ahora una nueva situación en la que sólo el 95 por ciento de las ganancias y pérdidas acumuladas hasta la apuesta del período anterior se conservan en el período actual. Supongamos que en el primer lanzamiento de moneda se obtiene una cara, por lo que se recibe un euro. Después del segundo lanzamiento, habremos acumulado 0,95 centavos de euro del período anterior, más el resultado del segundo lanzamiento. De esta forma, las ganancias/pérdidas en el lanzamiento  $n$  están dadas por 0,95 veces las ganancias/pérdidas obtenidas en el lanzamiento  $n - 1$  y por el resultado de la  $n$ -ésima apuesta.

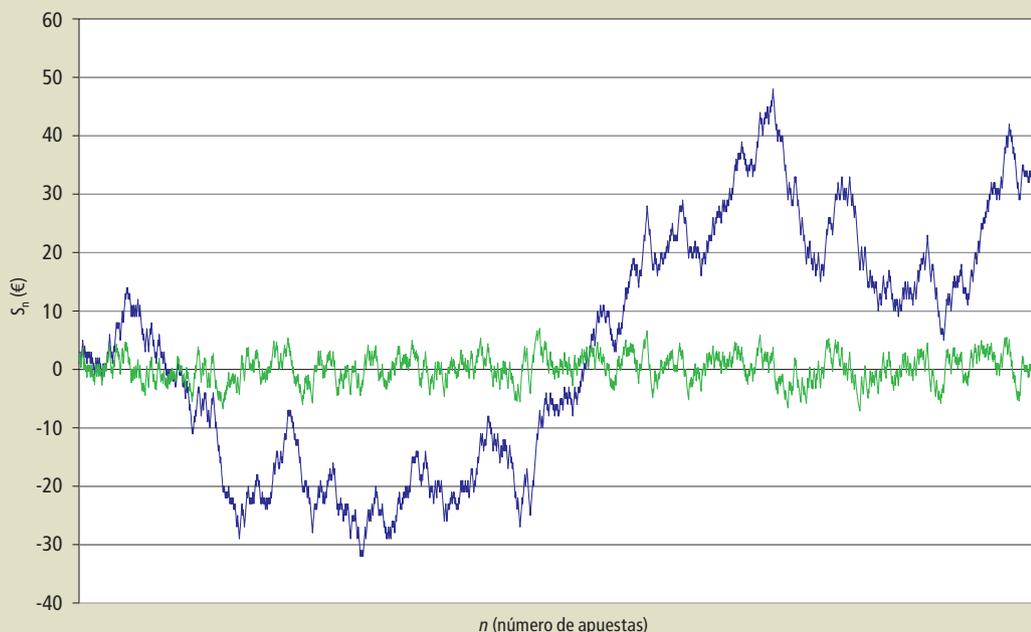
Esta pequeña reducción en el coeficiente  $\varphi$  que determina la memoria del proceso (proporción de ganancias/pérdidas que persiste de un período a otro) hace que las propiedades de series de tiempo de  $S_n$  cambien de forma notable. Lo mismo que en el caso anterior, el valor esperado del proceso es cero, pero ahora la varianza del proceso es finita sin importar el número de apuestas que se lleven a cabo, con lo que las ganancias/pérdidas acumuladas tendrán un límite.

Aunque el proceso tiene una memoria larga, ya no es lo suficiente como para que el resultado de cada apuesta tenga un efecto permanente sobre  $S_n$ , y que, de esta forma, se genere una tendencia estocástica. Así, el proceso más bien fluctúa alrededor de su valor medio con excursiones cortas.

Procesos como los anteriores pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales estocásticas. El comportamiento de la variable será estacionario si el coeficiente  $\varphi$  es menor que la unidad en valor absoluto, condición similar a la de estabilidad cuando se trata de ecuaciones diferenciales deterministas. Cuando el coeficiente es igual a uno, la serie tendrá una tendencia estocástica y mostrará un comportamiento similar al descrito en la primera apuesta. Cuando el valor del coeficiente es mayor a la unidad en valor absoluto, la serie mostrará un comportamiento explosivo.

En general, el valor en el período  $n$  de la variable de que se trate podría depender no sólo de su valor en el período inmediatamente anterior, sino de varios períodos anteriores. En ese caso, la condición equivalente a que  $\varphi$  valga 1 entraña mayor complejidad: los factores que multiplican al valor de la variable en los  $p$  períodos que influyen en el valor presente deben ser tales que una ecuación de orden  $p$  construida con ellos como coeficientes ("ecuación característica") tenga al menos una raíz que valga 1. De ahí el nombre de "proceso de raíz uno".

PROCESOS DE RAIZ UNITARIA Y PROCESOS ESTACIONARIOS



La figura muestra la variable  $S_n$  bajo los dos tipos de juego de apuesta antes descritos. A pesar de que la secuencia de resultados de lanzamientos de moneda es la misma en ambos casos, el comportamiento de  $S_n$  es distinto, pues depende del valor de  $\varphi$ , que determina la memoria del proceso. Ello explica las diferencias entre un proceso de raíz unitaria (azul) y un proceso estacionario con  $\varphi = 0,95$  (verde).

suma de perturbaciones sobre la varianza del proceso es muy distinto. Si se suman todas las perturbaciones precedentes se sumarán también todas sus varianzas. La varianza, pues, se irá acumulando indefinidamente con el paso del tiempo: se tenderá a ir observando desviaciones cada vez mayores, en un sentido u otro, con respecto a un valor medio. Es decir, el proceso no muestra reversión a la media, las perturbaciones no se disipan y la incertidumbre del pronóstico aumentará sin límite según aumente el horizonte de pronóstico.

Sin embargo, si se toman las diferencias entre elementos consecutivos a un proceso de camino aleatorio, como el que se acaba de describir aquí, se obtendrá una nueva serie estacionaria (que no contiene una tendencia). Tendremos entonces un proceso diferencia-estacionario (DE).

De un proceso que no es estacionario, pero sí lo es en las primeras diferencias, se dice también que es un proceso integrado de primer orden. Los procesos integrados de primer orden cumplen una propiedad matemática: su ecuación característica tiene raíz uno. Este es un valor frontera que marca el final de la estacionariedad; en el caso de un proceso autorregresivo de primer orden, esta condición es equivalente a que el coeficiente  $\phi$  sea igual a uno: si el valor para  $t - 1$  se multiplicase por un coeficiente menor que uno en valor absoluto, en el valor en  $t$  no entraría ya la suma de todas las perturbaciones anteriores, sino la suma de esas perturbaciones pero con cada una de ellas multiplicada por una potencia del coeficiente tanto mayor cuanto más antigua fuese la perturbación; al ser potencias de un número menor que uno en valor absoluto, el efecto de las perturbaciones se iría borrando con el tiempo. De ahí que cuando se habla de un proceso de raíz, suele pensarse en un proceso de memoria infinita (véase el recuadro "Procesos de raíz uno: un ejemplo sencillo").

En la práctica resulta muy difícil poder distinguir entre procesos DE y TE. En economía, por ejemplo, se ha discutido durante decenios si series como el producto interno bruto están mejor representadas por procesos de un tipo o del otro. Esta distinción se hace todavía más difícil cuando los parámetros de la función de tendencia no permanecen constantes, como puede suceder en escalas de tiempo mayores: el intercepto y la inclinación de la recta pueden cambiar con el tiempo.

### Temperaturas global y hemisféricas, ¿procesos de raíz unitaria?

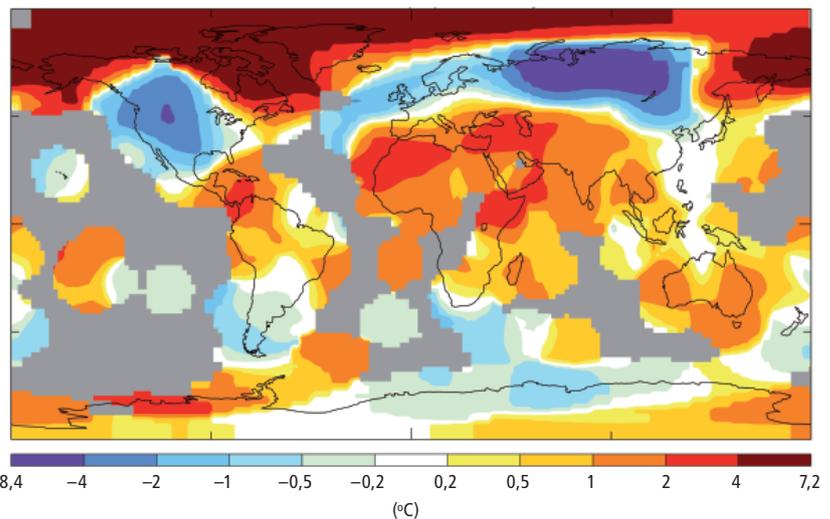
Las temperaturas global y hemisféricas (TGyH) muestran desde principios del siglo xx una

evolución a medio y largo plazo ascendente, con numerosos picos y simas. Ahora bien, ¿las series de las TGyH corresponden a procesos de TE o de DE?

Que las series de las TGyH se consideren procesos de TE o DE encierra su interés, ya que estos procesos ofrecen visiones contrastadas de cómo funciona el sistema climático y sobre la detección y caracterización del cambio climático observado.

Bajo la hipótesis de un proceso de TE, el comportamiento de largo plazo está definido por una tendencia determinística: el proceso muestra reversión a la media, por lo que las perturbaciones tendrían una persistencia limitada y no afectarían su evolución en el largo plazo. Así, el movimiento secular y las variaciones de largo plazo (en nuestro caso, los cambios climáticos) estarían determinados por cambios en agentes externos (geometría orbital, irradiancia solar, concentraciones de gases de efecto invernadero y cambios en otras variables de forzamiento radiativo). El incremento en la temperatura global de los últimos decenios podría considerarse una tendencia de largo plazo generada por el aumento en las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero. Por otra parte, el componente estocástico estacionario de ese proceso representaría la variabilidad natural de más corto plazo y mostraría una persistencia limitada.

De esa manera, las proyecciones de largo plazo están dominadas por los agentes externos —tal y como ocurre en los modelos físicos



2. ANOMALIAS DE LA TEMPERATURA en diciembre de 2009 respecto del período 1951-1980. Estas anomalías, que representan variaciones de hasta más de cuatro grados centígrados para algunas regiones del planeta, corresponden a una temperatura media global de tan sólo 0,66 °C superior al promedio de dicho período. De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, para finales del presente siglo se esperan incrementos en la temperatura media global en un rango de 1,8 °C a 4 °C, aunque no se descartan aumentos de hasta 6,4 °C.

## Los autores

**Carlos Gay García** y **Francisco Estrada** son académicos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ambos participaron en la elaboración del capítulo sobre Latinoamérica del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Gay dirige el grupo de Cambio Climático del Centro de Ciencias de la Atmósfera y coordina el Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM. Estrada es economista. Centra su investigación en la modelación y simulación de los impactos del cambio climático, la modelación estadística de series de tiempo climáticas y la incertidumbre.

del clima—, mientras que la estructura de autocorrelación del proceso (las relaciones que entre sí guarden las perturbaciones aleatorias) proveería información importante para el pronóstico de corto plazo.

Por el contrario, los procesos DE no muestran reversión a la media y tienen una memoria infinita, por lo que las perturbaciones no se disipan. Semejante acumulación de perturbaciones da lugar a una tendencia estocástica, en la que existe un movimiento sistemático, aunque impredecible. La varianza del proceso crece con el tiempo y diverge a infinito; el error de pronóstico no está acotado.

Asumir la presencia de un proceso de raíz uno, en el sentido de que posea una memoria infinita, implicaría que las series de TGyH son procesos altamente inestables: eventos aislados como La Niña de 1974 o la erupción del Krakatoa en 1883 habrían cambiado la evolución a largo plazo de las temperaturas; su efecto persistiría en nuestros días. En este caso, la temperatura global sería difícilmente predecible aun cuando los agentes externos se mantuvieran constantes.

## Interpretaciones

Existen dos interpretaciones, en cuanto al cambio climático se refiere, bajo el supuesto de que las TGyH son DE. Según una de ellas, dado que el comportamiento de la tendencia sería entonces aleatorio, no podría afirmarse que el planeta está en un proceso de calentamiento sistemático; por lo tanto, no habría datos que

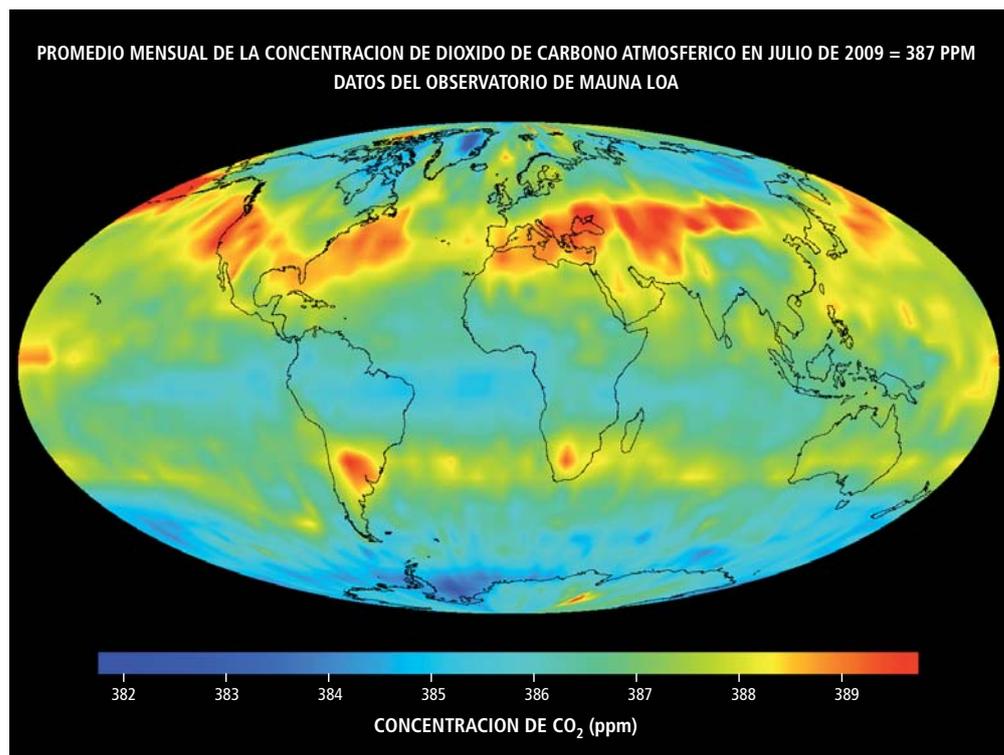
avalasen que se está produciendo un cambio climático antropogénico.

La otra surgió a finales de la década de los noventa, mediante técnicas econométricas llamadas de cointegración. Dichas técnicas permiten demostrar la existencia de relaciones de largo plazo entre series que contienen procesos de raíz unitaria. Según diversos análisis, la serie de temperatura global, así como la del forzamiento radiativo, compartirían una misma tendencia estocástica; por tanto, el aumento en la temperatura global podría atribuirse al incremento en las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero.

La cointegración se presentaba, pues, como una manera directa y estadísticamente rigurosa de atribuir el aumento en la temperatura global a las actividades antropogénicas. Sin embargo, para que las inferencias realizadas con técnicas de cointegración sean válidas, es requisito indispensable que las TGyH correspondan a procesos de raíz uno.

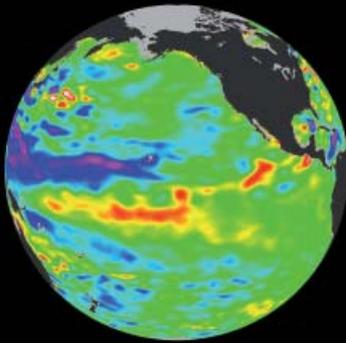
Nuestro análisis conduce a otra conclusión, que ofrece una interpretación más consistente con la física que los resultados obtenidos a través de los análisis de cointegración. Mediante técnicas econométricas modernas, hemos demostrado que pueden representarse las TGyH de manera estadísticamente adecuada como procesos de tendencia-estacionario, pero donde los parámetros de la tendencia son a su vez procesos estocásticos integrados, cuyas realizaciones son poco frecuentes: ocurren sólo a lo largo de los decenios o de los siglos.

**3. PATRONES DE TRANSPORTE** de gran escala de las concentraciones de dióxido de carbono troposférico. Cuanto mayores son las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, mayor es la temperatura global de equilibrio. Sin embargo, las propiedades de las series temporales de temperatura global y de forzamiento radiativo hacen que resulte difícil establecer una relación de largo plazo entre ellas con métodos estadísticos. Mediante el uso de técnicas econométricas, los autores muestran que las temperaturas global y hemisféricas pueden describirse como procesos tendencia-estacionarios con cambios estructurales en su pendiente, debidos, presumiblemente, al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero.

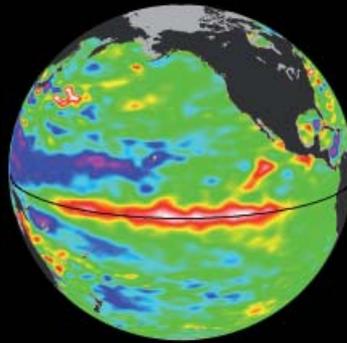


# EL NIÑO Y LAS ONDAS KELVIN

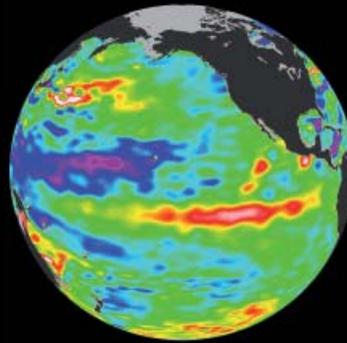
Esta serie de imágenes muestra anomalías positivas de la altura media del mar en el Pacífico ecuatorial propagándose hacia el este en forma de ondas de Kelvin. Los datos, procedentes del satélite oceanográfico Jason-2, indican la altura del nivel del mar: se distinguen zonas entre 10 y 18 centímetros por encima del nivel normal (rojo y blanco), y zonas entre 8 y 15 centímetros por debajo del nivel normal (azul y púrpura). Series de ondas como ésta desencadenan y mantienen el fenómeno de El Niño (oscilación del sur).



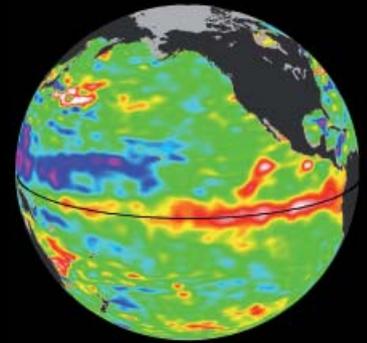
14 de octubre de 2009



1 de noviembre de 2009



16 de noviembre de 2009



1 de diciembre de 2009

El Niño constituye el fenómeno acoplado océano-atmósfera más importante para la variabilidad interanual del clima. El episodio de El Niño de 1998 contribuyó de forma notable a que en ese año se alcanzaran las temperaturas globales más altas registradas en el siglo XX. Si la temperatura global fuera un proceso de raíz unitaria, los efectos de episodios como El Niño de 1998 no se disiparían y tendrían una influencia permanente sobre ésta.

Las realizaciones de esos procesos integrados corresponderían a cambios importantes en agentes externos clave: cambios en la órbita terrestre, en la irradiación solar y en las concentraciones de gases de efecto invernadero. De ese modo, las series anuales observadas de TGyH durante el período 1870 a 2004 muestran un cambio estructural en la pendiente de la función de tendencia en los años 1977, 1985 y 1911 en las series global, del hemisferio norte y del hemisferio sur, respectivamente.

En el caso de las temperaturas global y del hemisferio norte, los resultados muestran una tendencia de calentamiento en dos etapas. Durante casi todo el siglo XX se presenta una tendencia moderada, seguida por un aumento rápido y de una magnitud mucho mayor durante los últimos dos o tres decenios del siglo: la pendiente de la temperatura global después del cambio estructural es 5 veces mayor, mientras que la del hemisferio norte es 8 veces mayor. Por otra parte, el hemisferio sur muestra una ligera tendencia al enfriamiento hasta finales de la primera década del siglo XX y un calentamiento moderado después de esta fecha.

Dado que la mayor parte del hemisferio sur está compuesto por océano, el retraso en el inicio de la tendencia de aumento en la temperatura, en comparación con las temperaturas globales y del hemisferio norte, podría deberse a la reacción lenta de los océanos ante cambios en los agentes debido a su poderosa

capacidad calorífica. En ese caso, el calentamiento moderado mostrado por la temperatura del hemisferio sur podría corresponder a la primera etapa de calentamiento manifestada por las otras dos series y, por lo tanto, podría esperarse un futuro cambio de una magnitud mayor en la pendiente de la temperatura del hemisferio sur.

Las propiedades de las series de tiempo de las TGyH revelan que el cambio climático se ha manifestado como un fenómeno de cambio en la media, sin afectar a otros momentos de su distribución. En particular, importa para las evaluaciones de riesgo que la variabilidad de las series no haya aumentado (o disminuido) con el cambio climático que se ha observado.

Los análisis econométricos realizados demuestran la naturaleza exógena del cambio estructural mostrado por las series y refuerzan los estudios paleoclimáticos recientes, en el sentido de que el calentamiento observado durante el siglo XX no puede ser interpretado como una realización de la variabilidad natural de la temperatura. De acuerdo con esos estudios, la fuente más probable del calentamiento reside en el forzamiento antropogénico.

Dada la velocidad del cambio y su magnitud, muy cercana al límite considerado “cambio climático peligroso” de 0,2 °C por decenio, puede argumentarse que, en términos del Artículo 2 de la Convención Marco sobre Cambio Climático de la ONU, ya ha ocurrido una intervención antropogénica peligrosa en el sistema climático.

## Bibliografía complementaria

EVIDENCE FOR HUMAN INFLUENCE ON CLIMATE FROM HEMISPHERIC TEMPERATURE RELATIONS. Robert Kaufmann y David Stern en *Nature*, vol. 388 págs. 39-44; 1997.

UNIT ROOTS, COINTEGRATION AND STRUCTURAL CHANGE. Gangadharrao Soundaryarao Maddala e In-Moo Kim en *Themes in Modern Econometrics*; Cambridge University Press, 1998.

DEALING WITH STRUCTURAL BREAKS. Pierre Perron en *Palgrave Handbook of Econometrics, vol. 1: Econometric Theory*, dirigido por K. Patterson y T. C. Mills, Palgrave Macmillan, págs. 278-352; 2006.

GLOBAL AND HEMISPHERIC TEMPERATURES REVISITED. Carlos Gay García, Francisco Estrada y Armando Sánchez en *Climatic Change*, vol. 94, n.º 3, págs. 333-349; 2009.