

## Variabilidad climática y procesos estocásticos

Roberto Deza\*, Vicente Pérez-Muñuzuri y Nieves Lorenzo

Grupo de Física No Lineal†, Facultad de Físicas, Universidad de Santiago de Compostela  
15782 Santiago de Compostela

Uno de los temas que han despertado gran preocupación en el último cuarto de siglo es la predicción de la magnitud del cambio climático global provocado por el hombre, para poder prever sus consecuencias. Cualquier estudio serio al respecto requiere acotar la magnitud de la variabilidad climática *natural* a diferentes escalas temporales (estacional a interanual, decadal a secular, paleoclimática, etc), y esto a su vez requiere conocer sus causas (es decir, los mecanismos que la originan en cada rango mencionado).

El sistema climático se divide conceptualmente en dos subsistemas acoplados (atmósfera y océano) con escalas temporales muy diferentes (para procesos que ocurren en la misma escala espacial). Por ejemplo, mientras los tiempos de circulación atmosféricos ocurren en semanas, los oceánicos llevan milenios. El océano actúa entonces como ‘integrador’ de forzamientos de pequeña escala temporal (viento, insolación, evaporación, etc.).

En la actualidad existen varios y muy sofisticados modelos numéricos del sistema climático global [GFDL-R15-a (Princeton), CSIRO-Mk2 (Melbourne), ECHAM4/OPYC3 (Hamburg), HADCM3 (Bracknell, U.K.), CGCM1 (Victoria, Canada), CCSR/NIES (Tokyo), NCAR PCM (Boulder, U.S.A.)]. En general son de tipo *espectral*: la discretización en sentido vertical se efectúa en superficies de presión constante (relativa a la de la superficie) y la horizontal se desarrolla en armónicos esféricos; los gradientes horizontales se calculan en este espacio recíproco, y los acoplamientos no lineales en espacio real.

Como en cualquier discretización, los efectos de los procesos (usualmente turbulentos) que ocurren a escalas menores que los de la malla deben ser incorporados al modelo a través de *parámetros*, que conllevan una incertidumbre inherente. Esta *incertidumbre de parametrización* tiene una componente que es el error experimental con que se determinaron las magnitudes en las pruebas validatorias, y otra que es el margen de ignorancia sobre los procesos al modelar. Pero sin duda, la elección de una u otra manera de parametrizar (además de los propios valores de los parámetros) determinará los resultados del modelo.

La parametrización de efectos ‘subgrilla’ es un arte cuyo desarrollo se ha acelerado en el último cuarto de siglo, desde que se incorporó la *parametrización estocástica*<sup>1</sup>. Por ejemplo, describir el forzamiento de la atmósfera sobre el océano mediante perturbaciones estocásticas resulta una buena aproximación, por la gran separación de las escalas temporales. Pero la cuestión no es tan clara

cuando dicha separación no es grande.

Un conocido subproducto de esta nueva tendencia en climatología es el descubrimiento de la *resonancia estocástica* (RE)<sup>2</sup>, surgido en un intento de explicar la *glaciación*<sup>3</sup>. De hecho, este fenómeno ha sido repetidamente invocado en Geofísica, por ejemplo, en relación con la *circulación termohalina* en un modelo ‘de caja’ del océano<sup>4</sup>, y nuevamente con la glaciación en un modelo *completo* de circulación general<sup>5</sup>. Un fenómeno íntimamente relacionado con la RE—la resonancia de coherencia (RC)—permite explicar procesos que contribuyen a la variabilidad climática<sup>6</sup>, en un modelo *atmosférico* de circulación general<sup>7,8</sup>.

Además de la parametrización de efectos ‘subgrilla’, la teoría (y la práctica) de los procesos estocásticos tienen otros desafíos en este campo (similares a las que tienen en la dinámica de sistemas caóticos, en la turbulencia y en sistemas con fenómenos tipo avalancha o ‘criticalidad autoorganizada’): contribuir con su formalismo al planteamiento de modelos que permitan explicar cualitativamente las funciones de correlación de las series temporales observadas o generadas con los modelos citados<sup>9</sup>, aunque esto implique trascender el bien asentado formalismo desarrollado para sistemas markovianos. El desarrollo de estos modelos permitirá además mejorar la predictibilidad del sistema climático, lo que redundará en un entendimiento de la variabilidad climática y del cambio climático.

---

\* Email: roberto@fmares.usc.es

† <http://chaos.usc.es/>

<sup>1</sup> K. Hasselmann, *Tellus* **28**, 473 (1976).

<sup>2</sup> C. Nicolis y G. Nicolis, *Tellus* **33**, 225 (1981); R. Benzi, A. Sutera, y A. Vulpiani, *J. Phys. A* **14**, L453 (1981).

<sup>3</sup> C. Nicolis, *Tellus* **34**, 1 (1982); R. Benzi *et al.*, *Tellus* **34**, 10 (1982).

<sup>4</sup> P. Vélez-Belchí *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 2053 (2001).

<sup>5</sup> A. Ganopolski y S. Rahmstorf, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 038501 (2002).

<sup>6</sup> V. Pérez-Muñuzuri *et al.*, FisEs’03 (poster).

<sup>7</sup> K. Fraedrich *et al.*, Deutsches Klimarechenzentrum Report No. 16 (1998). <http://puma.dkrz.de/puma>.

<sup>8</sup> V. Pérez-Muñuzuri *et al.*, *Nonlin. Proc. Geophys.* (enviado 2003). N. Lorenzo *et al.*, *Chaos* (2003).

<sup>9</sup> R.B. Govindan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 028501 (2002); K. Fraedrich y R. Blender, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 108501 (2003).