

Lourdes Tello es profesora de matemática aplicada en la Universidad Politécnica de Madrid. Su investigación se centra en el tratamiento matemático de modelos del clima y el medioambiente.



CLIMATOLOGÍA

Modelos de balance energético y clima global

¿Qué mecanismos rigen la evolución del sistema climático a gran escala?

Lourdes Tello

LOS MODELOS MATEMÁTICOS DEL clima global constituyen un ejemplo de las numerosas aplicaciones de la matemática a problemas reales. En el estudio del clima, la matemática proporciona herramientas avanzadas para su análisis y predicción mediante un lenguaje universal bien construido. A su vez, la climatología plantea nuevos problemas de los que se alimenta la matemática, contribuyendo así a su desarrollo.

Modelizar el clima del planeta en su conjunto requiere considerar escalas espaciales y temporales relativamente grandes. Así, mientras que una tormenta de verano representa un fenómeno demasiado local para ser incluido en este tipo de modelos, la extensión total de la masa de hielo terrestre y su evolución sí deben tenerse en cuenta. En líneas generales, entendemos que la escala espacial global es del orden de unos 10.000 kilómetros cuadrados o mayor. Dependiendo del tipo de fenómeno que nos proponemos estudiar, las escalas temporales pueden variar desde años y décadas hasta siglos o incluso milenios.

Atendiendo a los procesos físicos que incorporan, se han construido distintos tipos de modelos climatológicos. Los modelos de circulación general, por ejemplo, incorporan el efecto de las corrientes atmosféricas, por lo que requieren emplear las ecuaciones de la dinámica de fluidos. Por otro lado, los modelos de balance de energía intentan analizar los cambios en la temperatura del planeta a partir de su «presupuesto energético»; es decir, tomando en consideración la cantidad de calor que la Tierra absorbe del Sol y la fracción de energía que vuelve a emitirse hacia el espacio. El desequilibrio entre ambas cantidades se traduce en variaciones de la temperatura del planeta.

Los modelos de balance energético son modelos de diagnóstico, no de pronóstico. Aunque su formulación es determinista (dada la temperatura inicial, permiten calcular la temperatura en un tiempo posterior), el hecho de que solo consideren unos pocos mecanismos climáticos simples impide usarlos para realizar predicciones detalladas. Sin embargo, resultan idóneos para extraer aspectos cualitativos sobre la evolución del sistema climático.

Su escala global los convierte en una herramienta muy útil para analizar climas pasados y otros fenómenos de larga duración, como la teoría de ciclos de Milankovitch (los cambios prolongados en el clima terrestre que, en escalas de decenas de milenios, obedecen a las variaciones en la órbita terrestre alrededor del Sol).

ESTADOS DE EQUILIBRIO

En función de su dominio espacial, los modelos de balance de energía pueden clasificarse en tres grupos: modelos cero dimensionales, en los que solo se considera la evolución temporal de la temperatura media del planeta; modelos unidimensionales, en los que la temperatura depende de la latitud y del tiempo; y modelos bidimensionales, donde se considera que la temperatura es una función de la latitud, la longitud y el tiempo.

Además de la radiación solar absorbida por la superficie terrestre y la fracción que es reemitida hacia el espacio, los modelos bidimensionales incorporan la redistribución del calor sobre la superficie. El balance energético de todas estas componentes permite obtener una ecuación diferencial

EN SÍNTESIS

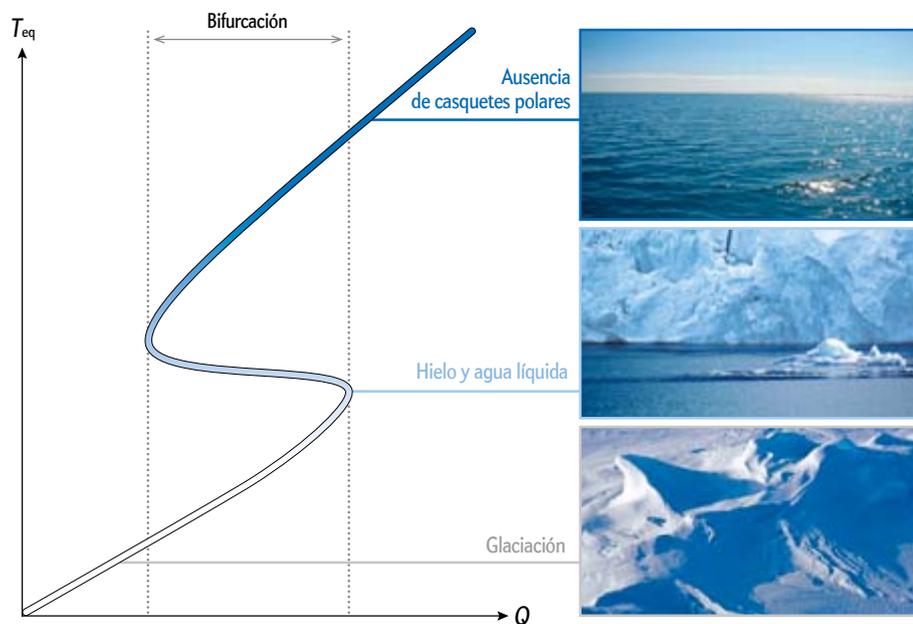
Los modelos climatológicos de balance energético analizan los cambios en la temperatura superficial a partir de los mecanismos por los que la Tierra absorbe y reemite la radiación solar.

Su escala global los hace especialmente adecuados para estudiar los patrones cualitativos en la evolución del clima actual, los climas pasados o los ciclos climáticos de muy larga duración.

Las técnicas avanzadas de simulación numérica han permitido ampliar dichos modelos para incorporar los efectos termostáticos del océano profundo y la vegetación.



HIELO Y AGUA: La constante solar (la cantidad de energía por unidad de tiempo y unidad de superficie que la Tierra recibe del Sol, Q) determina los valores estacionarios de la temperatura superficial del planeta (T_{eq}). Para valores pequeños de Q solo existe un estado de equilibrio, correspondiente a una glaciación. A medida que Q aumenta, crece el número de estados de equilibrio, uno de los cuales describe una situación inestable en la que coexisten hielo y agua líquida. Para valores mayores de la constante solar, el único estado de equilibrio viene dado por un escenario sin casquetes polares.



en derivadas parciales cuya incógnita es la temperatura en la superficie terrestre. Si acompañamos dicha ecuación de una condición inicial conocida, obtendremos un modelo matemático que describe la evolución de la temperatura en cada punto de la superficie.

Los primeros modelos de balance de energía fueron propuestos de forma independiente por Mijaíl I. Budyko y William D. Sellers en 1969. Estos modelos pioneros ya incluían el efecto del coalbedo planetario; es decir, la fracción de la radiación solar incidente que es absorbida por la superficie de la Tierra.

El coalbedo se modeliza como una función que depende de la temperatura en la superficie, lo que introduce en el balance energético mecanismos de retroalimentación: el descenso de las temperaturas favorece la formación de hielo; a su vez, el hielo blanco y brillante refleja casi toda la radiación solar que incide sobre él, lo que reduce la fracción de energía absorbida y provoca una disminución de las temperaturas, conduciendo a la formación de más hielo. Por el contrario, si la temperatura aumenta, disminuye la masa de hielo y, con ella, la cantidad de radiación reflejada, por lo que la temperatura aumenta aún más.

La excentricidad de la órbita terrestre, la oblicuidad del eje o la precesión constituyen algunos de los parámetros que fluctúan en las escalas de tiempo típicas de estos modelos, lo cual también produce patrones climáticos de larga duración.

En colaboración con Jesús Ildefonso Díaz, de la Universidad Complutense de Madrid, Jesús Hernández, de la Universi-

dad Autónoma de Madrid, y David Arcoya, de la Universidad de Granada, hemos estudiado de manera cualitativa la relación entre la constante solar (la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol por unidad de tiempo y unidad de superficie) y los estados de equilibrio del sistema climático. Cuando el valor de la constante solar resulta muy bajo o muy elevado, solo existe un estado de equilibrio, el cual se corresponde o bien con una glaciación, o bien con un escenario sin casquetes polares. Para valores intermedios, sin embargo, aparecen otros estados intermedios (inestables) en los que coexisten el hielo y el agua líquida.

OCÉANO Y VEGETACIÓN

Los estudios sobre el paleoclima indican que, hacia el fin de la última glaciación (hace unos 10.000 años) se produjeron cambios en el océano profundo. Ello sugiere acoplar los modelos de la temperatura superficial con otros que incluyan el efecto del océano. Los modelos acoplados requieren aplicar una metodología distinta a la anterior. El acoplamiento se incorpora como una condición de contorno; es decir, como una restricción que la solución a la ecuación diferencial debe satisfacer en una región determinada. Dicha condición de contorno es dinámica y difusiva, lo que modifica la naturaleza del modelo.

En 2011, en colaboración con Arturo Hidalgo, de la Universidad Politécnica de Madrid, obtuvimos resultados cuantitativos relativos a la temperatura mediante técnicas avanzadas de simulación numérica. Nuestro análisis mostró que, al incluir

el efecto del océano profundo, la temperatura superficial se suaviza: su valor mínimo sobre la superficie aumenta, mientras que el máximo disminuye. Tales resultados reflejan el efecto termostático del océano.

También la vegetación regula el intercambio de energía entre el suelo y la atmósfera. Sobre una cubierta vegetal, la atmósfera se torna más húmeda y el contraste térmico entre la noche y el día resulta menor que en las zonas sin vegetación. El efecto que la biosfera ejerce sobre el clima se plasma también en la arquitectura contemporánea, donde la búsqueda de una mayor eficiencia energética ha llevado a considerar la construcción de cubiertas vegetales sobre el tejado de los edificios.

Los modelos de balance energético nos han permitido profundizar en algunos aspectos cualitativos del clima de nuestro planeta; en particular, en el estudio de los mecanismos básicos que rigen su evolución global. De cara al futuro, el reto consistirá en desarrollar modelos en tres dimensiones que incluyan el efecto combinado del hielo, la atmósfera y el océano profundo.

PARA SABER MÁS

El planeta Tierra: El papel de las matemáticas y de los superordenadores. Jaques L. Lions. Espasa Calpe, 1990.

Mathematics, climate and environment. Jesús Ildefonso Díaz y Jaques L. Lions. Masson, 1993.

On a reaction-diffusion system arising in climatology. Georg Hetzer y Lourdes Tello en *Dynamic Systems and Applications*, vol. 11, págs. 381-402, 2002.

A finite volume scheme for simulating the coupling between deep ocean and an atmospheric energy balance model. Arturo Hidalgo y Lourdes Tello en *Modern Mathematical Tools and Techniques in Capturing Complexity*. Springer Series in Complexity, 2011.