



La incertidumbre de las catástrofes climáticas

Luis Antonio Vázquez López

DESCRIPTORES
SISTEMA CLIMÁTICO
CAOS
NO LINEAL
VULNERABILIDAD

Las características no lineales del clima de la Tierra aparecen por todas partes. Ejemplos típicos de ello son aquellos que cuando atendemos a su relativa rareza o intensidad llamamos fenómenos climáticos extremos y cuando lo hacemos atendiendo a los desastres sociales que acarrearán los solemos denominar catástrofes. El sistema climático de la Tierra está formado por las esferas naturales (atmósfera, biosfera, hidrosfera y geosfera), las esferas antrópicas (economía, sociedad, cultura), así como las interacciones complejas entre todas ellas y dentro de cada una de ellas. Estas interacciones o intercambios son la principal fuente de no linealidad en el sistema o, lo que es equivalente, resultan ser una de las principales fuentes de incertidumbre en los supuestos de predicción y prevención de eventuales catástrofes y de los efectos y consecuencias que ellas pueden acarrear.

Una descripción fundamental y simplificada de la Tierra considera no únicamente sus partes constitutivas, sino también a todas estas componentes interconectadas y abiertas traspasándose unas a otras flujos de masa, energía y momento. Puesto que la Tierra, como un todo, se comporta como un sistema natural cerrado (que no aislado, pues le llega la energía esencial desde el Sol y emite infrarrojos hacia el espacio exterior), todos esos flujos se conectan en el interior del sistema por medio de "ciclos" a través de los subsistemas o esferas antes aludidas (ciclo del carbono, ciclo hidrológico), de modo que lo que sale de una de sus partes vuelve a reincorporarse al sistema como entrada en otra de ellas, formando una extensa y compleja cadena de realimentaciones. Es precisamente esta cadena de realimentaciones entre las partes del clima o, como también ha sido llamada, "conversación cruzada", lo que invalida el principio de superposición propio de los sistemas lineales (el todo es exactamente igual a la suma de sus partes). En un sistema no lineal, como el climático, donde falla el principio de superposición, "el todo es más (otra cosa) que la suma de sus partes".

El aspecto que ofrecen las secuencias de observaciones y registros climáticos en todas las escalas (Fig. 1) es el de un comportamiento muy variable, con muchas irregularidades, frecuentes cambios bruscos, inesperados, y en ocasiones enfrentados a lo intuitivo. Con extraña apariencia respecto a lo que muchas veces cabría suponer.

¿Cuándo hay no linealidad? Ingredientes de un sistema climático no lineal

Caos, complejidad, realimentaciones y umbrales críticos

En la dinámica lineal predomina lo relativamente suave, tanto en espacio como en tiempo; es representable por funciones matemáticas continuas. En la dinámica no lineal se dan transiciones y saltos rápidos, variaciones irregulares. Es como si en su evolución el sistema llegara a cruzar algún punto o umbral de equilibrio inestable. En los sistemas lineales hay proporción entre los estímulos y las respuestas. Muy al contrario, en los no lineales, a pequeños estímulos o forzamientos que operen sobre ellos pueden seguir fuertes cambios de comportamiento, dada la naturaleza caótica de los mismos. Aunque el sistema climático terrestre está principalmente forzado por los ciclos astronómicos de radiación solar, en él podemos observar ciclos y frecuencias que no aparecen en ese ritmo muy regular de acción solar, como veremos, por ejemplo, al comentar los cambios climáticos del Pleistoceno.

Si la no linealidad en el sistema climático da lugar a fluctuaciones, transiciones rápidas, irregularidad y comportamiento inesperado y apariencia aleatoria, las interacciones entre sus muchas componentes, su complejidad, que no están bien comprendidas todavía, producen también fenómenos de autoorganización espontánea y coherente que denominamos comportamiento emergente. Estos dos aspectos, caos y complejidad, aunque son propios de la evolución no lineal de los sistemas de la naturaleza como lo es el climático, son también cosas diferentes.

El caos se refiere al comportamiento complicado que pueden mostrar sistemas sencillos, y se da cuando pequeñas diferencias entre dos estados dinámicos en un instante dado pueden alcanzar grandes diferencias en no muy distantes tiempos posteriores: sus trayectorias divergen rápidamente. El acoplamiento entre la atmósfera y el océano en el Pacífico ecuatorial alterna con apariencia aleatoria, caóticamente, entre sus tres estados cuasi-estables característicos y, como es sabido, muy diferentes en sus efectos regionales (normal, la Niña y el Niño).

Por el contrario, la complejidad se refiere al comportamiento singular de sistemas complejos que tienen muchas componentes y procesos. Por ejemplo, un terremoto puede verse como un fenómeno que emerge del comportamiento del complejo sistema geotectónico; así también una extinción de especie del comportamiento de la biosfera; o los episodios de calentamiento global al final de las glaciaciones (como el calentamiento del Holoceno al final de la última glaciación); o los cambios drásticos hidroclimáticos regionales, como la desecación del Sahara o los cambios bruscos en los caudales de los lagos ecuatoriales africanos en escala de tiempo decadal, o la acumulación multianual de períodos de sequía tras otros períodos mucho más húmedos en la Península Ibérica o la inundación rápida asociada a un desarrollo tormentoso intenso, etc. Un inacabable muestrario de ritmo climático plagado de cambios súbitos, rápidos o, frecuentemente, inesperados en todas las escalas temporales y espaciales, que hacen del clima un sistema de limitada y difícil predicción.

Hay diferentes tipos de realimentaciones en el clima, las de amplificación (positivas) y las de control (negativas); unas implican procesos físicos (realimentación albedo-criosfera), otras físicos y biológicos (realimentación albedo-vegetación) y otras biogeoquímicos, como la interacción atmósfera-gases antropogénicos. Visto el ambiente relativamente benigno de la Tierra, sobre todo si se la compara con otros planetas, como es el caso de Venus, podemos suponer que a diferencia de lo que debió suceder en ese planeta, la naturaleza aquí, en la Tierra, se las ha arreglado para que por término medio el equilibrio neto entre las innumerables realimentaciones de todo tipo que operan en ella resulte negativo (control) y ligeramente mayor que las positivas, al menos para relativamente no muy grandes

o drásticas variaciones de los forzamientos externos (como las variaciones de la energía solar que nos llega) o internos (como la modificación de uso de suelos por razones culturales). Un umbral crítico puede ser el punto en el que dos realimentaciones en competencia están equilibradas, y como todo está pleno de realimentaciones y umbrales críticos en juego, la probabilidad de que se den amplificaciones en alguna variable es muy alta, y por ende también la de que se den los extremos meteorológicos y climáticos a los que, bien por padecimiento propio bien por información, ya estamos más o menos acostumbrados.

El clima no es en absoluto lento y gradual, digamos de buen carácter, previsible, y puede reaccionar rápida y violentamente en la práctica totalidad de escalas temporales y espaciales. Al considerar su historia esto parece ser la norma más que la excepción. Es desde este punto de vista, el de la irregularidad e incertidumbre inherentes al sistema climático, desde el que quisiéramos ilustrar a continuación algunos ejemplos de catástrofes climáticas en tiempos lejanos o más recientes para, finalmente, proponer algún aspecto general de método y estrategia frente al reto de las consecuencias de la acción humana sobre el clima terrestre y las del clima terrestre en las sociedades humanas.

Dientes de sierra en distintas escalas climáticas

¿Qué es lo que ha regulado no linealmente las glaciaciones del Pleistoceno que crearon las condiciones para la humanización de la Tierra, o las oscilaciones rápidas calor-frío durante los estadales fríos de las edades de hielo, o la desecación subsahariana del Holoceno Medio cuando se formaron las primeras civilizaciones neolíticas y de los grandes ríos?

Es intrigante, cuando no sorprendente, esta forma de dientes de sierra que muestra la variación temporal del clima en escalas de cientos de miles de años, las glaciaciones (Fig. 1), y que con esta semejanza lo hagan también las dramáticas oscilaciones calor-frío, llamadas D/O, de un orden temporal inferior (miles de años y mucho menos) que debieron producirse en el transcurso del largo tramo frío-helado de la edad de hielo. Es como si dentro de unos dientes de sierra descubriéramos otros más pequeños en una cascada de autosemejanza en distintas escalas que sugiere si no serán procesos del mismo tipo los que dan lugar a esos fenómenos, por otra parte diferentes en su extensión, duración y efectos.

¿Qué regula las edades del hielo?

Las edades del hielo ocupan en conjunto no más que una décima parte de la historia documentada de la Tierra. Su interés reside en que su variabilidad natural es más alta que en otros tiempos geológicos más benignos. Las glaciaciones del Pleistoceno se produjeron casi periódicamente y en su tramo más frío la temperatura global terrestre era unos 4 °C más baja que la actual. Enormes capas de hielo de varios kilómetros de espesor cubrían el norte de América y Eurasia.

Un análisis espectral de estas oscilaciones muestra picos anchos de concentración de energía alrededor de las frecuencias 20.000, 40.000 y 400.000 años, coincidiendo con las variaciones de la energía del Sol que llega a la Tierra a causa

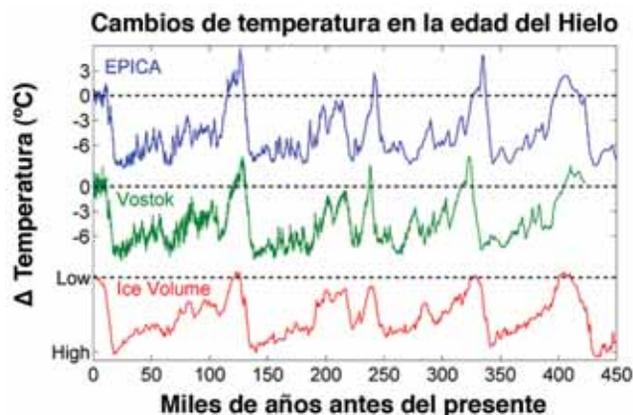


Fig. 1. Dientes de sierra en la evolución térmica y otros parámetros extraídos de los núcleos de hielo de Vostok (Antártida) para las cuatro últimas glaciaciones. Semejanza entre estas secuencias largas y las de calentamiento rápido-enfriamiento lento dentro de ellas (diferentes escalas de tiempo).

de las variaciones seculares de precesión, rotación axial y excentricidad orbital. No obstante, la respuesta del sistema climático a estos forzamientos, que se supone dirigen sus cambios, es fuertemente no lineal y aún se está lejos de su comprensión. Por ejemplo, si bien es sabido que la frecuencia principal entre las edades del hielo es de unos 100.000 años (Fig. 1), este período ha venido aumentando gradualmente desde unos 80.000 a unos 120.000 durante el último medio millón de años. Por otra parte, la respuesta climática al forzamiento de la variación de excentricidad de 413.000 años es casi inexistente y en cambio en el clima aparecen algunas frecuencias significativas que no están en el forzamiento solar orbital. Hace aproximadamente un millón de años, el clima pasó de un ritmo de glaciaciones cada 41.000 años a un nuevo período de unos 100.000 sin cambio correspondiente en las frecuencias del forzamiento solar; se ha denominado la Transición del Pleistoceno Medio y continúa siendo uno de los más extraños ejemplos del carácter no lineal del sistema climático. El clima no sigue proporcionalmente a los ritmos de forzamiento solar, aunque depende de ellos. Reacciona no linealmente.

Calor inesperado en medio del frío. El inquietante océano Atlántico

Muchos investigadores del clima quedaron sorprendentemente impactados por la historia revelada en el libro de hielo obtenido sobre las cimas de los mantos helados de Groenlandia y la Antártida durante los primeros años noventa, en lo que se ha considerado uno de los principales logros científicos del siglo XX. La resolución temporal proporcionada por las perforaciones y muestras de las capas de hielo de la última glaciación nunca antes se había alcanzado y alteró a fondo la comprensión de la dinámica del clima.

Por primera vez se vio que en otra secuencia de episodios en dientes de sierra la temperatura de Groenlandia había subido rápida y dramáticamente hasta unos 8-10°C en unos pocos años, y tras cada uno de estos calentamientos súbitos se retornaba lentamente, tras varios siglos, a los niveles de fríos de la glaciación, época en que esto sucedía. Se han identificado más de 20 episodios D/O durante la última glaciación. Se repiten en intervalos casi iguales y no muestran una clara relación con el forzamiento astronómico.

Si este patrón se ha dado en el pasado, probablemente podrá ocurrir en el futuro. ¿Por qué la fase cálida es más rápida que la de enfriamiento? ¿Cómo un cambio lento como el orbital puede disparar este cambio climático tan brusco? ¿El ritmo de calentamiento antropogénico actual podría provocar uno de estos episodios típicos de la edad del hielo? Se piensa que estos cambios son resultado de inestabilidades, traspaso de puntos críticos y otras no linealidades cuyos mecanismos físicos y naturaleza todavía no se conocen bien. Se ha propuesto que estuvieron asociados a los patrones de circulación de las corrientes del Atlántico en esas épocas frías. Esta circulación pudo darse en un estado estable y otros dos inestables. De estos dos inestables, uno es parecido a como circula hoy en día (Fig. 2) (si bien ahora estaríamos en un período interglacial cálido) y en el otro modo cesarían o se debilitarían las corrientes oceánicas.

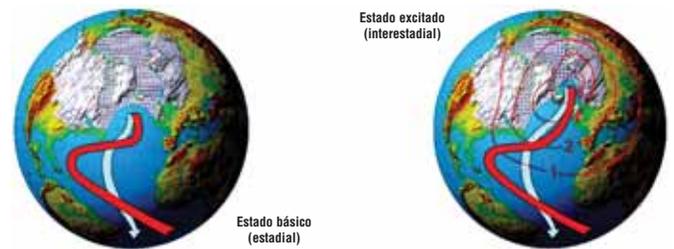


Fig. 2. Dos modos posibles de circulación oceánica en el Atlántico durante la última edad glacial. El de la izquierda, modo frío, es estable y prevalece en la glaciación, extensión del hielo. El agua atlántica cálida solo llega hasta latitudes medias. A la derecha, fase cálida del episodio D/O. La circulación penetra hasta los mares nórdicos y suben las temperaturas; se asemeja a la circulación actual. (Fuente: Instituto Potsdam para la investigación de los impactos del clima).

¿Qué perturbación dispararía uno u otro de estos estados oceánicos? Se sabe que las variaciones de densidad de las aguas de los mares del norte atlántico. Pero, ¿qué dispararía las variaciones de los flujos de agua dulce y la modificación de la densidad salina? Se ha llegado a simular eficientemente con modelos numéricos que estos ritmos calor-frío pudieron estar asociados a la circulación termosalina atlántica en tanto que sistema no lineal capaz de amplificar un forzamiento de origen desconocido por ahora (quizás astronómico) debido a que en su circulación pueden coexistir dos modos, uno estable y otro inestable. Esta coexistencia de distintos modos de equilibrio no es posible en un sistema lineal. Según qué factores ambientales operan sobre un sistema no lineal, éste se sitúa en uno u otro de sus estados posibles. La transición entre ellos puede ser veloz e intensa, mucho más veloz e intensa que la causa que los ha forzado y, desde esta perspectiva, catastrófica.

El avance del desierto del Sahara

Durante el óptimo climático del Holoceno, hace de 6.000 a 9.000 años, África era más húmeda y el Sahara mucho menos extenso que como lo conocemos hoy día. Coincidió con unos parámetros orbitales (mayor excentricidad de la órbita y mayor inclinación del eje de rotación de la Tierra) y, sobre todo, una fecha del perihelio hacia julio (hoy día es hacia primeros de enero) que favorecían una mayor insolación en el hemisferio norte durante el verano y una más intensa entrada de los monzones desde el golfo de Guinea, con grandes aportes de humedad sobre el interior profundo de África. Las hierbas y arbustos

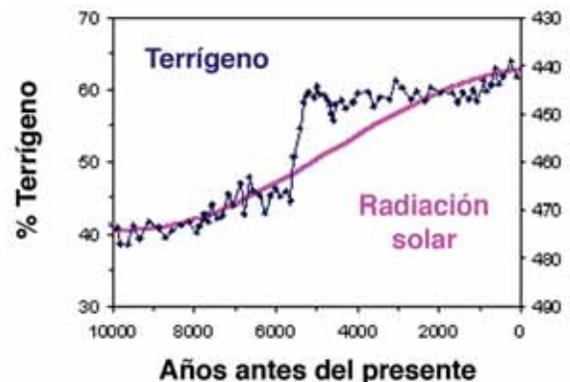


Fig. 3. Insolación en julio y reconstrucción paleobotánica con material terrígeno de las costas norteafricanas de los últimos 10.000 años. La insolación disminuye suavemente y en cambio la aridez (material terrígeno) se dispara dramáticamente hacia 5.500 años antes del presente.

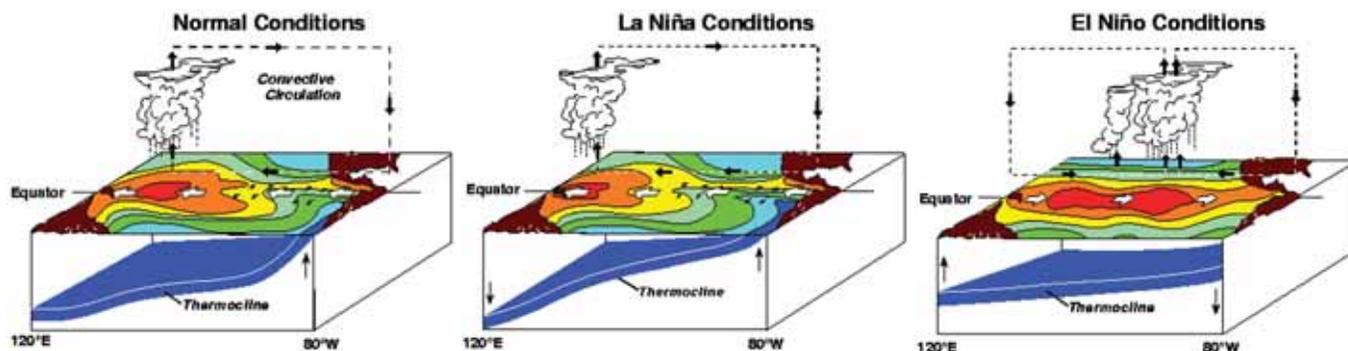


Fig. 4. Tres modos de oscilación del Niño que son resultado de interacciones no lineales océano-atmósfera en el Pacífico tropical. Transita de uno a otro de manera irregular, como muestra la marcha del índice de la figura 5.

extendían el Sahel hasta los 23° N más o menos. Posteriormente, la insolación debió de ir disminuyendo paulatinamente (Fig. 3), y así mismo la succión de humedad desde el Atlántico.

No obstante, cuando los modelos climáticos tratan de simular esta relación no logran reproducir el rápido, intenso y extenso aumento de la aridez y el desplazamiento hacia el Sur del desierto del Sahara que se dio hacia el 5500 antes del presente. Aunque la suave variación de la insolación haya sido el mecanismo general forzante, se hace necesario un mecanismo de realimentación biogeofísica, positiva, no lineal, entre el albedo y la vegetación del área: con el descenso de lluvias monzónicas debió de disminuir el manto vegetal y aumentar el albedo (energía solar reflejada por el suelo), aumento que favorece a su vez la disminución de la humedad y en consecuencia más descenso de vegetación, en un proceso amplificado hasta un punto umbral en que se quebró el reciclado de humedad atlántica que penetraba en el continente y su adentramiento en el Sahara. Cuando se considera esta *realimentación*, los modelos sí simulan este cambio de estado del ambiente en el que un umbral crítico de reducción de lluvias pudo haberse rebasado con una aceleración que contrasta netamente con la disminución lenta de la energía que llegaba del Sol, y que se ajusta a las reconstrucciones paleobotánicas (Fig. 3).

Caos y orden en tiempos más recientes

El carácter cambiante de los mares del Sur: el Niño
La Oscilación del Sur-El Niño (ENSO) representa una interacción no lineal entre el océano y la atmósfera en el Pacífico tropical. El Niño alude a la parte oceánica de este proceso de acoplamiento en su fase cálida, y alcanza su máxima intensidad frente a las costas del Perú. Un debilitamiento de los vientos alisios que prevalecen allí facilita la propagación hacia el Este de aguas superficiales cálidas que normalmente se acumulan en el oeste del Pacífico (Fig. 4). El área de estas aguas anómalamente cálidas es de unos 30 millones de kilómetros cuadrados (unas tres veces Canadá) y es por ello por lo que el intercambio de calor latente y sensible entre el océano y la atmósfera allí tenga entidad suficiente como para influir en los patrones climáticos a escala de todo el globo terráqueo. Durante la fase fría del ENSO, llamada la Niña, aguas frías invaden esta zona del Pacífico tropical. La Oscilación del Sur es la parte atmosférica asociada al Niño y tiene mucha más extensión que la oceánica, con implicaciones en todo el planeta.

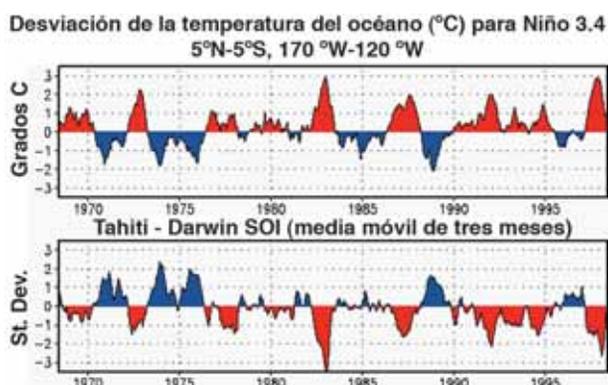


Fig. 5. Índices de evolución temporal del Niño (arriba) y de la Oscilación del Sur (abajo).

El análisis de variabilidad de este acoplamiento ENSO muestra elevada irregularidad (Fig. 5), con tres modos diferenciados: una componente estacional que se recoge en la propia denominación "el Niño", que alude a la época navideña en que acostumbra a manifestarse; tiene también una componente casi bianual con tiempo de recurrencia entre dos años y dos años y medio. Finalmente, hay otra variación propia de recurrencia entre cuatro y cinco años. La interacción de estos tres modos casi periódicos de variación hace que los cambios térmicos en el Pacífico ecuatorial sean finalmente bastante irregulares. A esta irregularidad contribuye también la realimentación sobre el océano que suponen la gran cantidad de perturbaciones meteorológicas convectivas, tormentas, que se forman en el área (Fig. 4).

Mediáticamente muy divulgado por sus características y los efectos desastrosos que en ocasiones produce, lo que se quiere destacar aquí es que desde el punto de vista dinámico las oscilaciones irregulares del ENSO se ajustan aceptablemente a la física de un oscilador caótico y no lineal de bajo orden (atmósfera-océano), influido por el ciclo estacional. La interferencia positiva del modo casi bianual (2-2,5 años) con el de baja frecuencia (4-5 años) da lugar a los episodios cálidos y fríos más intensos, más catastróficos, como el de 1997-98, pero que por otra parte son todavía más irregulares en su aparición.

Los sistemas caóticos no son totalmente impredecibles en escalas temporales relativamente cortas, y así como la parte de regularidad del ENSO facilita algo su predicción a corto plazo, de meses, su naturaleza caótica imposibilita por el momento esa misma certidumbre más allá de los seis meses.



Aire atlántico vacilante

Otro fenómeno que también se manifiesta con oscilaciones irregulares no lineales entre los diferentes estados en los que puede producirse y como caos en las interacciones océano-atmósfera es la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Es una estructura muy importante de variabilidad climática atmosférica atlántica y su interés radica en que explica casi un 50% de la variación de la presión atmosférica al nivel del mar en el Atlántico y ejerce una clara influencia en el clima regional del este de Norte América y el oeste de Europa durante todo el año, pero principalmente en invierno.

Consiste en una alternancia a gran escala de los campos de presión atmosférica con centros de acción cerca de la baja de Islandia y del anticiclón de las Azores. El índice que da su valor y signo se calcula como diferencia de presión al nivel del mar entre las Azores e Islandia o zonas próximas respectivas (Fig. 7). Esta oscilación atmosférica tiene dos fases que representan típicamente dos regímenes de tiempo para el Atlántico norte (Fig. 6).

Proyecta su señal en rangos temporales muy diversos, incluso a escala diaria. Una interesante y aún no comprendida característica de la NAO es el agrupamiento de días con índice del mismo signo, como paquetes de flujo aéreo más o menos persistente, llamados *regímenes* de tiempo. Un mes, un año o una década marcados por una señal positiva o negativa de la NAO indica la prevalencia de una u otra fase de este régimen de flujo atmosférico. El interés de esto se basa en que, por ejemplo, un flujo de régimen positivo de la NAO puede signi-

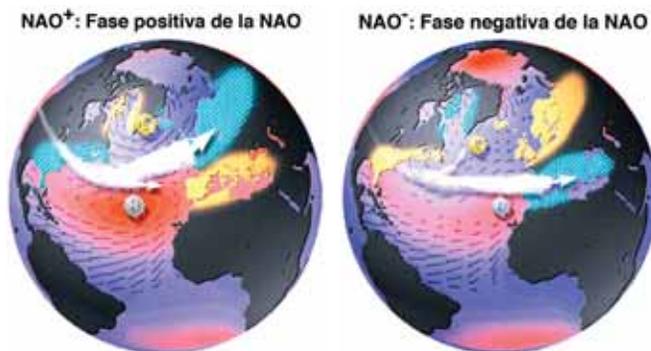


Fig. 6. Las dos fases extremas de la NAO y algunos impactos climáticos (cortesía de Damont Doherty Earth Lab./NOAA). Según la fase de la NAO, las trayectorias de las borrascas atlánticas llegan (fase -) o no (fase +) hasta la Península Ibérica. En el primer caso, abundancia de lluvias, en el segundo sequía.

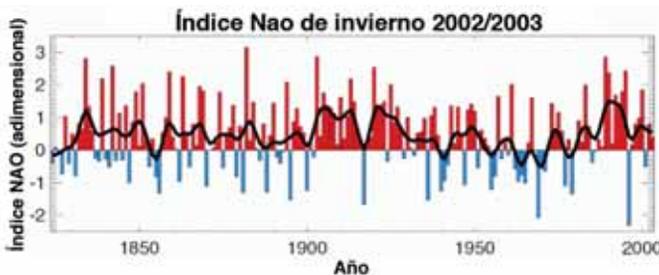


Fig. 7. Alta irregularidad en la evolución del índice NAO. Los promedios de cinco años consecutivos, en negro, destacan las variaciones pluri-anales. Apréciase el agrupamiento de valores positivos durante las últimas décadas de calentamiento global y las fluctuaciones casi decadales durante el último medio siglo (Fuente: Earth Lab./NOAA).

ficar que las borrascas alejen su trayectoria de la Península Ibérica (Fig. 6) y sobre ella se instalen frecuentes anticiclones, la reducción de las lluvias y consiguientemente la sequía, la caída de caudales hídricos, etc., como ocurrió en los primeros años noventa del siglo XX. Con argumentos parecidos podríamos explicar la ocurrencia de fases de distinto signo, con abundancia pluviométrica y otros extremos climáticos regionales. Durante las últimas décadas de calentamiento climático global ha prevalecido la fase cálida-positiva de la NAO (Fig. 7). Tan destacable es esta asociación NAO-clima regional, que la explicación y la simulación de estos regímenes nos ayudarían a explicar y predecir el clima regional ibérico, la evolución de los ecosistemas y sus fuertes cambios naturales o antropogénicos.

De nuevo, nos encontramos ante otro fenómeno destacable del clima del cual podemos describir muchas de sus características morfológicas y estadísticas, pero del que todavía no conocemos el mecanismo dinámico caótico subyacente y los procesos que lo controlan como para poder definirlo sin ambigüedades y estimar su predictibilidad.

Entonces, ¿no se pueden predecir las catástrofes climáticas?

Enormes esfuerzos de investigación están tratando de conseguirlo por medio de modelos numéricos y grandes ordenadores. Estos modelos matemáticos del clima están basados en un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales (Navier-Stokes) que tratan de ajustarse a la evolución de unos fluidos moviéndose sobre una esfera en rotación y con grandes arrugas (montañas, profundidades abisales). Expresan las leyes del movimiento (Newton), los principios de conservación de la masa y la energía y otras transformaciones termodinámicas (evaporación, condensación). Si repitiéramos varias veces una simulación con un mismo modelo de atmósfera-océano-criosfera acoplados, que supuestamente representa al clima real, con un mismo ordenador, un mismo código y unas mismas condiciones iniciales y de contorno, los resultados finales serían idénticos. Si modificáramos un poco alguno de los ingredientes de este laboratorio climático el resultado variaría sensiblemente. El interés de esto radica en si este clima del modelo coincide o no con el clima real. Los datos "proxy" paleoclimáticos (núcleos de hielo, polen, sedimentos marinos) que nos informan sobre los cambios catastróficos del pasado, tal como hemos visto, indican que éstos fueron más intensos que lo que con frecuencia los modelos nos dicen. Muchos de estos modelos subestiman la cantidad de humedad perdida en el Sahara durante los últimos miles de años, o no simulan bien el gran calentamiento de los polos cuando vivían los dinosaurios, o los intensos fríos en lo más extremo de la última glaciación. Y esto, ¿por qué?

Lo más probable es que estos y otros desacuerdos se deban a una menor o diferente sensibilidad del clima de los modelos respecto a la sensibilidad del propio clima real y, posiblemente, también porque desconocemos realimentaciones y umbrales que de otro modo podrían ayudarnos a predecirlos. Tenemos un bello edificio matemático "determinista" que debe interpretar un clima enormemente irregular, con apariencia aleatoria. Al tratar de conseguir que el clima del modelo se parezca al

real se vienen desarrollando incontables “trucos” para introducirles ruido explícito, perturbaciones, que fuercen el sistema simulado hasta crear variaciones estadísticas realistas, que se parezcan al clima observado o que lo reproduzcan.

En una mirada caótica, encontraremos el “efecto mariposa”, el pequeño aleteo de una mariposa capaz de inducir un huracán a gran distancia. El problema es que no hay solo una mariposa, sino millones de ellas batiendo sus alas en todo tiempo y por todas partes. Este ruido omnipresente, interno, que es también fuente de variabilidad del sistema climático, requiere del pensamiento y las ideas probabilísticas, requiere de una mirada estocástica en la que el ruido climático unas veces oculta, otras veces cancela y otras es fuente creativa de variabilidad y fenómenos del clima.

Las no linealidades y los equilibrios inestables hacen al sistema climático “impredecible” *más allá de ciertas escalas de tiempo característico* dentro de las cuales sí se puede predecir. Este plazo de predicción característico es diferente y no siempre conocido, según el subsistema de que se trate, el océano, la troposfera tropical, los glaciares, la sequía, el bloqueo anticiclónico de latitudes medias...

¿Proteger la sociedad de la naturaleza o la naturaleza de la sociedad?

Nos hemos asomado a una pequeña ventana entre la multitud de interacciones no lineales reconocibles en la variabilidad de los procesos climáticos de la Tierra. Y vislumbramos un paisaje de dificultades y limitaciones de la predicción a pesar de los indiscutibles avances realizados en ello. No obstante, la interpretación de las relaciones entre las sociedades y el clima se articula, hoy día, bajo el predominio de un discurso con varios tramos destacables:

1. Las sociedades son vulnerables a los extremos climáticos.
2. Las catástrofes meteorológicas y climáticas actuales son debidas al calentamiento antropogénico, principalmente inundaciones y grandes tormentas (aunque esto acostumbra a estar erróneamente atribuido).
3. Este calentamiento es real, se acelerará en el futuro y también los extremos climáticos.

El grueso del conocimiento climático que se concentra en los informes periódicos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) sustenta una dramática expectativa: si no se produce regulación de emisiones, hay que esperar el cuádruple de concentración atmosférica de gases de invernadero a finales de este siglo. Y si se consigue una reducción, la cosa quedaría en el doble. En todo caso, no evitaremos su incremento.

Dos líneas estratégicas se han formulado para responder a estos cambios: la adaptación, que trata de reducir la vulnerabilidad a las catástrofes actuales y futuras, y la mitigación del cambio climático antropogénico, que trata de reducir las emisiones de los gases y aerosoles que supuestamente lo provocan. Quizás, el complemento de ambas vías fuera lo más sensato. Pero cabe preguntarse qué razones culturales y políticas vienen abonando tantos favores para la mitigación (protocolo de Kyoto, etc.) en perjuicio de la estrategia de adaptación, cuando este sesgo puede propiciar incluso el au-

mento de la vulnerabilidad, que no depende solo de la intensidad del extremo climático, que si ha ocurrido probablemente volverá a hacerlo, sino también de la capacidad del sistema afectado para hacerle frente y resistirlo, como se ha visto con Katrina, por ejemplo. La reducción de la vulnerabilidad de las sociedades actuales a los extremos climáticos que ya conocemos puede resultar una estrategia doblemente beneficiosa. Primero, porque trata de reducir el riesgo de hoy día, y, también, porque si algún tipo de catástrofes pudieran en el futuro empeorar, siempre se estaría en mejores condiciones de hacerles frente si hubiéramos aprendido a enfrentarnos mejor con las que ya conocemos.

Las dificultades y limitaciones de la predicción aconsejan estrategias preventivas basadas en diagnósticos integrados de la vulnerabilidad de los sistemas sociales, en los que se trata de diferenciar la importancia relativa del clima junto a otros muchos factores de influencia ambiental. Por ejemplo, que el crecimiento y concentración de las poblaciones pueda suponer una amenaza mucho mayor para las provisiones de agua que el cambio climático previsto por el IPCC.

Los datos, los modelos, los registros históricos y paleoclimáticos y el estudio de casos singulares pueden ayudar a evaluar qué vulnerabilidades tienen probabilidad de ocurrir y cómo prepararse mejor para ello. Esto incluye la elaboración de escenarios del tipo “qué, si” en caso de que algo como esto, por ejemplo, fuera a ocurrir:

- Un calentamiento rápido, tipo D/O.
- Una sequía ibérica como la de los años noventa.
- Un huracán del tipo Katrina.
- Un episodio El Niño como el de 1997.
- Una ola de calor como la del verano de 2003.
- Una Pequeña Edad de Hielo en Europa, como las de los siglos XVI al XIX.
- Etc., etc.

¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias de este tipo de catástrofes en nuestras condiciones económicas y culturales actuales? □

Luis Antonio Vázquez López
Meteorólogo
Instituto Nacional de Meteorología

Referencias bibliográficas

- Uriarte Cantolla, Antón, 2003, *Historia del clima de la Tierra*, Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- Rial, José A., 2004, *Abrupt climate change: chaos and order at orbital and millennial scales*, Elsevier.
- Rahmstorf, Stefan, 2002, “Ocean circulation and climate during the past 120.000 years”, *Nature*, 419.
- Storch, Hans von, 2003, “On adaptation. An essay about our perceptions and responses to the concern of anthropogenic climate change”, *Actas del Simposio Klimaschutz als Unternehmerische Verantwortung*, 1 de noviembre de 2003, Zürich.
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001, Synthesis Report*, Cambridge University Press.

