

Las riendas del carruaje

La mano humana en el cambio climático

Kerry Emanuel**

Dos tendencias de la filosofía medioambiental se han sucedido durante el curso de la historia humana. La primera mantiene que el estado natural del universo es de infinita estabilidad, con una Tierra permanentemente anclada en las revoluciones predecibles del sol, la luna o las estrellas. Cada revolución científica que ha desafiado esta noción, desde la teoría heliocéntrica de Copérnico a la expansión del universo de Hubble, de la deriva continental de Wegener a la incertidumbre de Heisenberg y al caos macroscópico de Lorenz, se encontraron con la feroz resistencia de hegemonías religiosas, políticas e incluso científicas.

La segunda tendencia también ve el estado natural del universo como estable, pero mantiene que se ha vuelto inestable por las acciones humanas. Las grandes inundaciones son usualmente retratadas en las tradiciones religiosas como intentos divinos de purificar la tierra de la corrupción humana. Las desviaciones de la predictibilidad cósmica, tales como meteoritos o cometas, fueron muy a menudo vistas como una profecía más que como un fenómeno natural. En la mitología griega, el calor abrasador de África y la piel quemada de sus habitantes eran atribuidos a Faetón, descendiente del dios del sol Helios, que, habiendo perdido una apuesta de su hijo, fue obligado a permitirle conducir su cuadriga solar a través del cielo. En esta catástrofe ambiental primitiva, Faetón perdió el control y quemó la tierra, abrasándose él mismo.

Estas dos ideas fundamentales han permanecido en muchas culturas a través de toda la Historia. Ellas influyen poderosamente en la visión del cambio climático en el momento actual.

El mito de la estabilidad natural

En 1837, Louis Agassiez provocó un rechazo público y fue ridiculizado académicamente cuando propuso que muchas piezas del registro geológico, como las marcas de arañazos en las rocas y los guijarros originados en fuentes de rocas lejanas, podrían ser explicadas por el avance y el retroceso de grandes capas de hielo. Este evento marcó el principio de un esfuerzo notable, conocido hoy como paleoclimatología, que usa las evidencias químicas y físicas del registro geológico para deducir cambios en el clima de la Tierra durante el tiempo. Esta propuesta ha producido el más profundo, aunque aún poco celebrado, avance científico de nuestra era. Tenemos ahora un detallado y exquisito conocimiento de cómo el clima ha variado durante los últimos millones de años y, progresivamente con menos detalles y más incertidumbre, cómo ha cambiado volviendo hacia atrás en el tiempo a la edad de las piedras más viejas de nuestro planeta de 4.5 mil millones de años.

Para los que se sienten felices con la estabilidad, hay poco consuelo en este dato. Durante los pasados tres millones de años, nuestro planeta ha nadado entre estados templados similares al de hoy, durante periodos de entre 10 y 20 mil años, y periodos de 100.000 años en los que gigantes capas de hielo, en algunas partes de varios miles de metros de profundidad, cubrieron los continentes septentrionales. Incluso más agitado que la existencia de estos ciclos es el cambio abrupto con el que el clima puede aparentemente cambiar, especialmente cuando se recupera de las eras glaciares.

Durante largos periodos de tiempo, el clima ha cambiado incluso más radicalmente. Durante la primera parte del Eoceno, hace unos 50 millones de años, la Tierra estaba libre de hielo y árboles gigantes crecían en islas cercanas al Polo Norte, donde la temperatura media anual era de 60 ° F (15.5 °C), mucho más caliente que la media de hoy de cerca de 30 (1.1 °C). Hay también algunas evidencias de que la Tierra estuvo completamente cubierta de hielo varias veces hace unos 500 millones de años; entre medias, el planeta fue excepcionalmente cálido.

¿Qué explica estos cambios? Para los climatólogos, las capas de hielo en Groenlandia y la Antártica producen las pistas más intrigantes. Cuando el hielo se forma, atrapa burbujas de la atmósfera, cuya composición química –incluyendo, por ejemplo, su contenido en dióxido de carbono y metano– puede ahora ser analizada. En resumen, se descubre que el ratio de las masas de dos isótopos de oxígeno encerrados en las moléculas de hielo es un buen indicador de la temperatura del aire cuando se formó el hielo. Y para descifrar cuándo se formó el hielo, se pueden contar las capas que marcan el ciclo estacional de nevadas y deterrimiento.

Confiando en estos análisis de los núcleos de hielo y sedimentos del profundo océano, los climatólogos han aprendido algo destacado: Los ciclos de la edad de hielo de los pasados tres millones de años están probablemente causados por oscilaciones periódicas de la órbita de la Tierra que afecta directamente a la orientación del eje del planeta. Estas oscilaciones no alteran mucho la cantidad de luz del sol que alcanza la Tierra, pero cambian mucho la distribución de luz con la latitud. Esta distribución importa porque la tierra y el agua –continente y océanos– son bastante diferentes en los hemisferios norte y sur. Las edades de hielo ocurren cuando, como resultado de las variaciones orbitales, las regiones árticas interceptan relativamente poca luz en verano, de forma que el hielo y la nieve no se derriten tanto.

El momento de las edades de hielo, después, es el resultado combinado de la órbita de la Tierra y su geología básica. Pero esta combinación no explica tampoco el lento camino del descenso de la tierra en las fases frías del ciclo o la abrupta recuperación de la calidez interglaciar evidente en los registros de los núcleos de hielo. Más asombrosa es la evidencia de que estos grandes cambios climáticos –de glaciares a interglaciares y vuelta a empezar– son causados por pequeños cambios relativos en la distribución de la luz del sol con la latitud. En

consecuencia, en la escala de tiempo de las edades hielo, el clima parece extremadamente sensible a pequeñas perturbaciones en la distribución de la luz solar.

Pero a pesar de toda esta sensibilidad, la Tierra nunca sufrió catástrofes de fuego o hielo. En el escenario de fuego, el gas de efecto invernadero más efectivo –el vapor de agua– se acumula en la atmósfera cuando la Tierra se calienta. Cuanto más cálida es la atmósfera, más vapor de agua puede acumular: cuanto más vapor de agua acumula, más calor es atrapado, y el calentamiento crece sin cesar. Esta retroalimentación descontrolada es llamada el efecto invernadero descontrolado, en ese momento la tierra está insoportablemente caliente. Basta con mirar a Venus para ver el resultado final. Cualquier océano que pudiera haber existido en el planeta se evaporó hace mil millones de años, produciendo un superinvernadero infernal y con una temperatura promedio de la superficie de cerca de 900 °F (1500 °C).

La muerte por hielo puede resultar de otra retroalimentación sin control. Cuando la nieve y el hielo se acumulan progresivamente por encima del ecuador, reflejan una cantidad incrementada de luz de vuelta al espacio, enfriando más el planeta hasta que se congela en una "bola de nieve terrestre". Se suele suponer que una vez que el planeta alcanzó tal estado helo, con casi toda la luz del sol reflejada hacia el espacio, no podría nunca recuperarse; hace poco tiempo se ha teorizado que sin el océano líquido que absorba el dióxido de carbono continuamente emitido por los volcanes, este gas se acumularía en la atmósfera hasta que su efecto invernadero fuera finalmente suficiente fuerte para comenzar a derretir el hielo.

No se tendría que producir un gran cambio en la cantidad de luz solar que alcanza la Tierra para que se produjera una de estas catástrofes. Y la física solar nos informa de que el sol fue cerca de un 25% más débil al principio de la historia de la Tierra, lo que debería haber producido un planeta cubierto de hielo, una circunstancia no apoyada por la evidencia geológica.

Entonces, ¿qué salvó la tierra del fuego y del hielo?

La vida misma podría ser parte de la respuesta a la adivinanza del débil joven Sol. Nuestra atmósfera se piensa que fue originada por los gases emitidos por los volcanes, pero la composición de los gases volcánicos tiene poco que ver con el aire como lo conocemos hoy. Se piensa que la atmósfera primitiva consistía mayormente de vapor de agua, dióxido de carbono, dióxido sulfúrico, cloro y nitrógeno. Hay poca evidencia de que hubiera mucho oxígeno... hasta el advenimiento de la vida. La primera forma de vida ayudó a producir oxígeno a través de la fotosíntesis y transformó la atmósfera en algo parecido a la de hoy, consistente consistente prioritariamente en nitrógeno y oxígeno con cantidades traza de vapor de agua, dióxido de carbono, metano y otros gases. El contenido de dióxido de carbono probablemente descendió lentamente con el tiempo debido a meteorización química, posiblemente ayudada por procesos biológicos. Cuando

la composición cambió, el efecto invernadero neto se debilitó, compensando el lento pero inexorable fortalecimiento del Sol.

Por tanto, la vida primitiva cambió dramáticamente en el planeta. Nosotros, los humanos, solamente somos la especie más reciente que lo ha provocado también.

La compensación entre el incremento de la energía solar y el descenso en el efecto invernadero podría no haber sido un accidente. En 1960, James Lovelock propuso que la vida realmente ejerce una influencia estabilizadora en el clima, al producir retroalimentaciones favorables para ella misma. Llamó a su idea la hipótesis Gaia, deidad de la tierra griega. Pero incluso según este punto de vista, la vida es solo preservada en el sentido amplio; especies individuales, tal como aquellos que transformaron la atmósfera primitiva, alteraron el medio exponiéndose a su destrucción.

Física del invernadero

Como esta breve descripción de la historia del planeta primitivo muestra, el efecto invernadero juega un papel crítico en el clima de la Tierra y no podría haber ninguna discusión sensata del clima sin versar sobre su naturaleza. (Una nota de advertencia: la metáfora del efecto invernadero en sí misma es imperfecta. Mientras que el efecto invernadero real funciona previniendo que las corrientes de convección lleven calor absorbido de la luz del sol, la atmósfera previene que el calor de la radiación se emita desde la superficie).

El efecto invernadero tiene que ver con la radiación, que en su contexto se refiere a la energía llevada por las ondas electromagnéticas, que incluyen fenómenos como la luz visible, las ondas de radio y la radiación infrarroja. Toda materia con una temperatura por encima del cero absoluto emite radiación. Cuanto más caliente está una sustancia, más radiación es emitida y más corta es la longitud de onda de la radiación emitida. Una estrecha franja de longitudes de onda constituye la luz visible. La temperatura promedio de la superficie del sol es de cerca de 10.000 °F, y el Sol emite la mayor parte de su radiación como luz visible, con una longitud de onda promedio de cerca de media micra (una micra es la millonésima parte de un metro). La atmósfera de la tierra emite como si su temperatura promedio fuera de cerca de 0 °F, en un promedio de longitud de onda de 15 micras. Nuestros ojos no pueden detectar esta radiación infrarroja. Es importante reconocer que el mismo objeto puede emitir y absorber al mismo tiempo radiación: Cuando un objeto emite radiación pierde energía, y esto tiene el efecto de enfriarlo; la absorción, por otra parte, calienta un objeto.

La mayoría de los sólidos y líquidos absorben gran parte de la radiación que interceptan, y también emiten radiación fácilmente. El aire es otro asunto. Este compuesto casi por completo de oxígeno y nitrógeno, cada uno en la forma de dos átomos idénticos unidos juntos en una molécula sencilla. Tales moléculas raramente interactúan con la radiación: Permiten el paso libre a la radiación solar

que se mueve hacia la tierra y la radiación infrarroja que va hacia arriba desde la superficie de la tierra. Si todo esto fuera lo que hay en la atmósfera, sería un asunto simple calcular la temperatura promedio de la superficie de la Tierra: tendría que ser justo lo suficientemente caliente para emitir radiación infrarroja que equilibrara la radiación de onda corta absorbida desde el Sol. (Si fuera demasiado fría, emitiría menos radiación que la que absorbería y se calentaría; y viceversa, si fuera muy caliente se enfriaría). Teniendo en cuenta la cantidad de luz del sol reflejada hacia el espacio por el planeta, se deduce que sería de 0 °F, mucho más fría que la temperatura media observada de cerca de 60 °F.

Afortunadamente para nosotros, nuestra atmósfera contiene cantidades traza de otras sustancias que interactúan fuertemente con la radiación. Principalmente entre estos está el H₂O, cuya molécula consiste en dos átomos de hidrógeno unidos a un único átomo de oxígeno. A causa de su compleja geometría, absorbe y emite radiación mucho más eficientemente que el nitrógeno y el oxígeno. En la atmósfera, el agua existe en fase gaseosa (vapor de agua) y en fase condensada (agua líquida y hielo) como nubes y precipitación. El vapor de agua y las nubes absorben luz solar y radiación infrarroja, y las nubes también reflejan luz del sol al espacio. La cantidad de vapor de agua en una muestra de aire varía enormemente de lugar a lugar y en el tiempo, pero en ningún evento excede del dos por ciento de masa en la muestra. Además del agua, hay otros gases que interactúan extraordinariamente con la radiación, estos incluyen el CO₂ o dióxido de carbono (que está presente en unas 380 toneladas por cada millón de toneladas de aire) y CH₄ o metano (unos 107 toneladas por cada millón de toneladas de aire).

De forma colectiva, los gases invernadero son casi transparentes a la luz del sol, permitiendo a la radiación de onda corta que pase virtualmente sin impedimentos a la superficie, donde la mayor parte es absorbida. (Pero las nubes absorben y reflejan luz solar). Por otro lado, estos mismos gases absorben gran parte de la longitud de onda larga, radiación infrarroja que pasa a través de ellos. Para compensar el calentamiento que esta absorción causa, los gases invernadero también tienen que emitir radiación infrarroja hacia arriba y hacia abajo.

Como resultado, la superficie de la tierra recibe radiación de la atmósfera así como del sol. Es un hecho remarkable que, en promedio, la superficie del planeta recibe más radiación desde la atmósfera que directamente del sol! Para equilibrar esta entrada extra de radiación –la radiación emitida por los gases invernadero de la atmósfera y las nubes– la superficie de la tierra tiene que calentarse y por tanto ella misma emite más radiación. Esta es la esencia del efecto invernadero.

Si el aire no estuviera en movimiento, la concentración observada de gases invernadero y nubes tendría éxito en subir la temperatura promedio de la superficie de la tierra a cerca de 85 °F (29 °C), mucho más caliente que lo observado. En realidad, el aire cercano a la superficie se eleva y es continuamente reemplazado por aire frío que se mueve desde arriba; estas corrientes de convección bajan la temperatura de la superficie a un promedio de

60 °F (15 °C) mientras que el calentamiento llega a partes más altas de la atmósfera. Así, la emisión de radiación por los gases invernadero mantiene la superficie de la tierra más que caliente de lo que de otra manera sería; al mismo tiempo, el movimiento de aire ralentiza el efecto del calentamiento y mantiene la temperatura de la superficie soportable.

¿Porque es complicado el problema del clima?

Esta física básica del clima carece por completo de controversia entre los científicos. Y si uno pudiera cambiar la concentración de un solo gas de efecto invernadero al mismo tiempo que mantener reparado el resto del sistema (con la excepción de su temperatura), sería sencillo calcular el correspondiente cambio en la temperatura de la superficie. Por ejemplo, doblando la cantidad de CO₂ aumentaría la media de temperatura de la superficie un 1,4 °F, suficiente para ser detectada pero no para causar problemas serios. Casi toda la controversia proviene del hecho de que, en realidad, cambiar cualquier gas de efecto invernadero causaría indirectamente que otros componentes en el sistema también cambiaran, provocando alteraciones adicionales. Estos efectos se conocen como retroalimentaciones, y el más importante y misterioso de ellos está relacionado con el agua.

Existe una diferencia fundamental entre el agua y la mayoría de los demás gases de efecto invernadero. Mientras que una molécula de dióxido de carbono o de metano puede permanecer en la atmósfera cientos de años, el agua se recicla constantemente entre la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos en una media de unas dos semanas. En las escalas de tiempo del clima, que son mucho más duraderas que esas dos semanas, el agua atmosférica está prácticamente en equilibrio con la superficie, lo que significa que hay tanta agua que entra en la atmósfera por la evaporación desde la superficie como la que se pierde a la superficie por medio de la lluvia y la nieve. No se puede hacer una simple suma de ambas y decir cuál gana: para ello se necesita un argumento más complejo.

Para hacer las cosas más complicadas, el vapor de agua y las nubes son de lejos las sustancias de efecto invernadero más importantes de la atmósfera; las nubes también afectan al clima no solamente devolviendo radiación infrarroja hacia la Tierra y calentándola, sino también reflejando la luz solar hacia el espacio, enfriando el planeta.

El agua sube desde su fuente hacia la superficie por corrientes de convección, que a su vez son un subproducto del efecto invernadero, que tiende a calentar el aire cercano a la superficie. Físicas sencillas y cálculos detallados, usando modelos computarizados de nubes, muestran que la cantidad de vapor de agua en la atmósfera es sensible a los detalles de la física por los que pequeñísimas gotas de nubes y cristales de hielo se combinan en gotas de lluvia más grandes y en copos de nieve, y cómo esas caen y se re-evaporan parcialmente en su camino hacia la superficie.

Lo malo de esos detalles parece tener mucha relación con el clima.

Esta complejidad es limitada, ya que la cantidad de agua en la atmósfera está sujeta a una restricción importante y fundamental.

La concentración de vapor de agua en cualquier muestra de aire tiene un límite superior estricto que depende de su temperatura y presión: en particular, este límite aumenta rápidamente con la temperatura. La proporción de la cantidad de vapor de agua en una muestra a esta cantidad limitadora es lo que se conoce familiarmente como humedad relativa. Cálculos realizados con una gran variedad de modelos computarizados y observaciones de la atmósfera muestran que, al cambiar el clima, la humedad relativa se mantiene prácticamente constante. Esto significa que cuando la temperatura atmosférica aumenta, lo hace también la cantidad de vapor de agua. Pero el vapor de agua es un gas de efecto invernadero. Por lo que un aumento de temperatura conlleva un aumento del vapor de agua, lo que produce más aumento en la temperatura. Este efecto retroactivo positivo en el sistema climático es la principal razón de que la temperatura de la superficie se supone que aumentará algo más que los 1,4 °F que lo haría doblando el CO₂ en ausencia de efectos retroactivos. (Con temperaturas muy altas, el efecto retroactivo del vapor de agua puede dispararse, produciendo la catástrofe de un planeta muy caliente, como he mencionado antes).

La cantidad y la distribución del vapor de agua en la atmósfera es también importante para la determinación de la distribución de las nubes, que juegan un papel importante en el clima. Por un lado, las nubes reflejan un 22% de la radiación solar hacia el espacio, enfriando el planeta. Por otro lado, absorben radiación solar, absorbiendo y emitiendo radiación infrarroja, lo que contribuye al efecto invernadero. Diversos modelos climáticos globales producen estimaciones variadas sobre cómo las nubes pueden cambiar con el cambio climático, por lo que constituyen la principal fuente de incertidumbre en las proyecciones del cambio climático.

Una complicación más en este ya de por sí complicado diseño procede de los aerosoles antropogénicos: pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera. La actividad industrial y la quema de biomasa han contribuido a cuantiosos aumentos en el contenido de los aerosoles en la atmósfera, lo que se cree que también produce un gran efecto en el clima.

Los principales culpables son los aerosoles de sulfato que son creados por una reacción química atmosférica relacionada con el dióxido sulfúrico, otro gas producido por la quema de combustibles fósiles. Estas pequeñas partículas reflejan la luz solar y en un grado menor absorben la radiación infrarroja. Puede que lo más importante es que sirven como núcleo de

condensación de las nubes. Cuando se forma una nube, el vapor de agua no forma gotas de agua o cristales de hielo espontáneamente sino que se condensa en las partículas de aerosol existentes. El número y el tamaño de estas partículas determina si el agua se condensa en unas pocas gotas grandes o en muchas pequeñas, y esto afecta bastante la cantidad de luz solar que las nubes reflejan y la cantidad de radiación que absorben.

Se piensa que el aumento de la luz solar reflejada al espacio, directamente por los aerosoles y por cómo aumenta el efecto reflector de las nubes, anula cualquier aumento de su efecto invernadero, por lo que enfría el planeta. Al contrario de los gases de efecto invernadero, los aerosoles de sulfato solo permanecen en la atmósfera unas cuantas semanas antes de ser 'lavados' por la lluvia y la nieve. Su abundancia es proporcional a su nivel de producción: tan pronto como la producción disminuye, los aerosoles de sulfato también lo hacen. Desde principios de los años 80, la mejora tecnológica y unas medidas reguladoras más estrictas han hecho que disminuya la contaminación de los aerosoles de sulfato en los países desarrollados, ayudado por el desplome de la Unión Soviética y la subsiguiente reducción de su industria. Por otro lado, fuentes de aerosoles de sulfato han estado aumentando constantemente en Asia y en los países pobres, por lo que no está claro cómo ha cambiado el contenido neto global de aerosoles en los últimos 25 años.

Después, otras incertidumbres importantes entran en escena con el agua (especialmente con las nubes) y con partículas en suspensión. Pero las incertidumbres van mucho más lejos: de hecho, para comprender el cambio climático a largo plazo es fundamental tener en cuenta que las predicciones del tiempo detalladas no pueden, al menos en principio, hacerse para más de unas cuantas semanas. Eso es debido a que el sistema climático, al menos en escalas cortas de tiempo, es caótico.

La propiedad esencial de los sistemas caóticos es que las pequeñas diferencias tienden a magnificarse rápidamente. Pensemos en dos hojas que han caído en otoño, una al lado de la otra, en un arroyo turbulento, imaginemos que las seguimos en su camino hacia el mar: al principio, permanecen juntas, pero los remolinos del arroyo las separan gradualmente.

Luego, una de las hojas puede quedar atrapada temporalmente en un remolino tras una roca, mientras que la otra sigue su camino. No es difícil imaginar que una llegará a la boca del río días o semanas antes que la otra. También es fácil imaginar que un científico loco, que ha equipado nuestro arroyo con todo tipo de artilugios para medir la corriente del agua y ha inventado un programa de ordenador para predecir donde irán las hojas, encontraría que es prácticamente imposible predecir dónde estaría la hoja incluso una hora después de haber caído.

Volvamos al momento en que las dos hojas cayeron al arroyo; supongamos que en ese momento estaban separadas por 10 pulgadas. Supongamos que después de 30 minutos están separadas por 10 pies y que la distancia va aumentando con el tiempo. Ahora, supongamos que es posible rebobinar hasta el principio; pero esta vez las hojas solo están separadas por 5 pulgadas. No sería una sorpresa que pasase una hora hasta que estuviesen separadas por 10 pies. Seguimos rebobinando el experimento, cada vez disminuyendo la distancia inicial de separación entre ellas. Se puede suponer que el tiempo que tardan en estar separadas por 10 pies aumenta indefinidamente. Pero para muchos sistemas físicos (posiblemente incluyendo a los arroyos), esto no es así. Si se disminuye la separación inicial, el aumento en la cantidad de tiempo que se toman las hojas en separarse 10 pies cada vez es más reducida, tanto que existe un límite definitivo: no importa la proximidad de las hojas cuando caen al agua, no tardarían más de seis horas en estar separadas por 10 pies.

El mismo principio se puede aplicar si, en lugar de tener dos hojas, tenemos solo una y un modelo computarizado de la hoja y el arroyo que la lleva. Aunque el modelo sea perfecto y comenzamos con una representación perfecta del estado del arroyo, cualquier error, por minúsculo que sea, con respecto al tiempo o a la posición de la hoja cuando comienza su viaje, llevará a que la predicción sea errónea al menos en 10 pies después de transcurridas 6 horas y en más distancia conforme pasa más tiempo. La predicción más allá de un cierto tiempo es imposible.

No todos los sistemas caóticos tienen esta propiedad de predicción limitada, pero nuestra atmósfera y océanos seguramente la tienen. Como resultado, se piensa que el límite superior de la predicción del tiempo es unas dos semanas. (que no estamos muy cerca de esos límites demuestra la imperfección de nuestros modelos y mediciones).

Mientras que las variabilidades diarias del tiempo puede que sean los ejemplos más familiares del caos del medio ambiente, las variaciones a más largo plazo pueden también tener comportamientos caóticos. El Niño es un ejemplo de fenómeno caótico por naturaleza, dificultando la posibilidad de predecir más de unos meses. Otros fenómenos caóticos relacionados con los océanos tienen escalas de tiempo aun mayores, pero más allá de unos años para los científicos es muy difícil diferenciar entre la variaciones naturales caóticas y lo que los científicos climáticos llaman "variaciones forzadas". Sin embargo, esta diferencia es importante para entender la influencia humana en la causación de un cambio climático.

Además de la variabilidad natural caótica y "libre" del tiempo y del clima hay cambios producidos por fuerzas cambiantes, que se consideran usualmente relacionadas con factores que no son afectados por el clima. La más conocida es la marcha de las estaciones, inducida por la inclinación de los ejes de la Tierra, que es a su vez independiente del clima. Los efectos de

este forzamiento no son difíciles de separar del fondo del caos climático: podemos predecir fácilmente que enero será más frío que julio, por ejemplo en Nueva York. Otros ejemplos de este forzamiento climático natural incluyen las variaciones en la radiación solar y las erupciones volcánicas, que inyectan aerosoles en la estratosfera, por lo que enfrían el planeta.

Algo de este forzamiento climático natural es caótico por naturaleza, pero otra parte es predecible en largas escalas de tiempo. Por ejemplo, excluyendo una catastrófica colisión con un cometa o un asteroide, las variaciones de la órbita terrestre se pueden predecir por millones de años. En cambio, la actividad volcánica es impredecible. De cualquier manera, el clima actual refleja una combinación de variabilidad "libre" (natural) y de los cambios producidos por forzamiento externo; algunos de ellos, como las erupciones volcánicas, caóticos de por sí. Y parte de esta variabilidad climática forzada es producida por nosotros, los seres humanos.

Determinando la influencia humana

Un importante y difícil asunto en la detección del cambio climático antropogénico consiste en decir la diferencia entre las variaciones climáticas naturales -libres y forzadas- y las que son forzadas por nuestras actividades.

Una forma de diferenciarlas es usar el hecho de que el aumento de los gases de efecto invernadero y los aerosoles de sulfato se han venido produciendo desde la Revolución Industrial del siglo XIX: antes de esa época, la influencia humana fue probablemente pequeña. Si podemos hacer una estimación de cómo cambió el clima antes de esa fecha, tendremos una idea de la variación natural del clima. Desgraciadamente, las mediciones detalladas del clima no empezaron hasta el siglo XIX; aunque hay "aproximaciones" de cantidades como la de la temperatura, tomadas, por ejemplo, en los anillos de los árboles, el plancton de océanos y lagos, el polen y los corales.

Trazando la temperatura global derivada de las mediciones actuales y por aproximaciones de hace 1000 años o más, revelan que el reciente incremento en la temperatura global verdaderamente no tiene precedentes; el gráfico de temperatura con el tiempo muestra una forma característica de un palo de hockey, en el que el final del palo representa el aumento de los últimos 50 años, más o menos. Pero las aproximaciones no son perfectas y están asociadas con márgenes de error grandes, por lo que cualquier tendencia de palo de hockey del pasado puede estar oculta, aunque el reciente incremento sobrepase incluso a una estimación liberal de dichos errores.

Otra manera de explicar la diferencia consiste en simular el clima de los últimos 1000 años por medio de modelos climáticos. Los modelos

computerizados del clima mundial pueden ser la tarea más complicada a la que se ha enfrentado la humanidad. Un típico modelo climático consiste en millones de líneas de instrucciones de ordenador designadas para simular una variedad enorme de fenómenos físicos, incluyendo el movimiento de la atmósfera y de los océanos, la condensación y la precipitación de agua en el interior de las nubes, la transferencia de radiación solar y terrestre a través de la atmósfera, incluyendo su absorción y reflejo parcial por la superficie, por las nubes y por la propia atmósfera, el transporte del calor, el agua, el transporte convectivo del calor, el agua y los constituyentes atmosféricos por corrientes de convección turbulentas, así como un gran número de otros procesos.

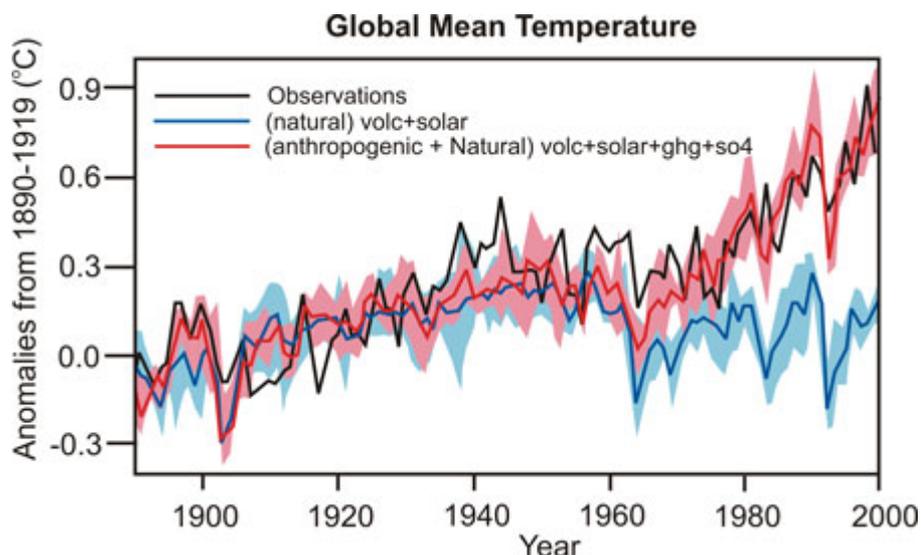
Actualmente existen unas cuantas docenas de dichos modelos en el mundo, pero no son completamente independientes unos de otros: a menudo comparten piezas comunes de códigos de ordenador y de sus predecesores.

Aunque las ecuaciones que representan los procesos físicos y químicos en el sistema climático son bien conocidas, no se pueden resolver con exactitud. Es imposible computerizar las pistas de todas las moléculas de aire y de los océanos; para hacer que esto sea visible, ambos fluidos deben ser divididos en bloques manejables. Cuanto más pequeños y más numerosos sean, más ajustado será el resultado, pero con los ordenadores de hoy en día lo más pequeño que los podemos hacer en la atmósfera es más o menos unas 100 millas en horizontal y unos cientos de yardas en vertical, y un poco menores en los océanos. El problema reside en que bastantes procesos importantes son mucho más pequeños que esas escalas. Por ejemplo, las nubes cúmulos de la atmósfera son críticas para transferir calor, hacia arriba y hacia abajo, pero se extienden normalmente solo unas cuantas millas, por lo que no pueden ser simuladas por los modelos climáticos. En su lugar, sus efectos deben ser representados en términos de cantidades, como viento y temperatura, que pertenecen a la porción completa computerizada estudiada en su conjunto. La representación de estos procesos importantes pero sin resolver es un tipo de arte conocido con el horrible nombre de parametrización, consistente en los números o parámetros que deben ser sintonizados para obtener las parametrizaciones para que funcionen de una manera óptima. Ya que se necesitan ese tipo de modelos artificiales, un modelo climático típico tiene muchos parámetros que pueden ser ajustados, y esta es una de las principales razones por las que dichos modelos son solo una aproximación a la realidad. Cambiando los valores de los parámetros o la manera en que los procesos son parametrizados, pueden cambiar no solamente la simulación climática del modelo sino también la sensibilidad del modelo climático, por ejemplo, de los aumentos de gases de efecto invernadero.

Entonces ¿cómo podemos sintonizar los parámetros del modelo climático para hacerlo razonablemente verídico? Podemos aprender lecciones importantes de nuestra experiencia con esos primos cercanos de los

modelos climáticos; los modelos de predicción del tiempo. Estos son casi tan complicados y también deben parametrizar procesos físicos fundamentales, pero ya que la atmósfera se mide en muchos lugares y bastante frecuentemente, podemos contrastar el modelo con la realidad varias veces por día y ajustar los parámetros continuamente (ajustarlos) hasta que funcionen lo mejor posible. Pero con el clima, hay pocas y preciosas pruebas. Un obstáculo obvio que debe pasar el modelo es el de ser capaz de replicar el clima actual, incluyendo aspectos fundamentales de su variabilidad, como los sistemas del tiempo y el Niño. También debe ser capaz de simular las estaciones de una manera razonable; por ejemplo: los veranos no deben ser demasiado calientes o los inviernos demasiado fríos.

Más allá de unas comprobaciones simples como esas, no hay muchas maneras de probar el modelo y las proyecciones de climas futuros deben contener un cierto grado de fe. La cantidad de las incertidumbres en dichas proyecciones se puede estimar hasta cierto punto, comparando predicciones hechas por modelos diferentes, con sus distintas parametrizaciones (y posiblemente tipos diferentes de códigos de errores). Trabajamos bajo la fe de que el clima real caerá entre las proyecciones hechas con los diferentes modelos; por decirlo de otra manera: que la verdad estará entre las estimaciones más altas y las más bajas que generen los modelos.



La figura de arriba muestra el resultado de dos grupos de ordenadores que simulan la temperatura media de la superficie en el siglo XX usando un determinado modelo climático. En el primer grupo (marcado en azul) solo se aplican las fuerzas que varían con el tiempo.

Esas consisten en el oscurecimiento y la radiación solar debidas a los aerosoles producidos por erupciones volcánicas conocidas. El segundo grupo, en rojo, añade las influencias humanas en los aerosoles de sulfato y los gases de efecto invernadero. En cada grupo, el modelo es puesto en marcha cuatro veces comenzando con estados iniciales con pequeñas

diferencias, y el intervalo entre los cuatro miembros del conjunto es denotado por el oscurecimiento de la figura, que refleja la variabilidad aleatoria libre del clima producida por este modelo, mientras que las curvas de color muestran la media de los cuatro miembros del conjunto.

La media de temperatura de la superficie globalmente es representada por la curva negra. Se observa que los dos grupos de simulaciones se separan durante los años 70 y todavía no se han juntado, y que la temperatura global observada también empieza a caer fuera del sobre de las simulaciones naturales en los 70. Este ejercicio se ha repetido usando varios modelos climáticos, todos con el mismo resultado: no se puede simular la evolución del clima de los últimos 30 años sin que se incluyan la influencia humana en aerosoles de sulfato y en los gases de efecto invernadero. Esto, en resumen, es la razón por la que hoy casi todos los científicos climáticos creen que la influencia humana en el clima ha emergido desde el ruido de fondo de la variabilidad natural.

Las Consecuencias

Las proyecciones basadas en modelos climáticos sugieren que el planeta seguirá calentándose entre 3 y 7 °F el próximo siglo. Este incremento es el cambio de temperatura que se experimenta si viajamos de Boston a Filadelfia. El calentamiento de las regiones más calidas, los trópicos, se espera que sea menor, mientras que el calentamiento en las regiones más frías, como el ártico, será mayor; esta incidencia ya se está notando en las mediciones de temperatura global. Las temperaturas en las horas nocturnas están aumentando más rápidamente que las diurnas.

¿Es tan malo como lo pintan? Con toda la publicidad negativa que se está haciendo sobre el calentamiento global es fácil no tener en cuenta los beneficios: Se necesitará menos energía para calentar los edificios, tierras que han sido infértiles en latitudes altas comenzaran a ser productivas, también habrá un menor sufrimiento debido al debilitamiento de las olas de frío. El aumento de CO₂ puede acelerar el crecimiento de las cosechas. En lo negativo, se producirán olas de calor más frecuentes e intensas, el precio del aire acondicionado aumentará y tierras fértiles en las regiones subtropicales pueden convertirse en improductivas. Es seguro que habrá ganadores y perdedores, ¿pero sufrirá el mundo en su conjunto? Aunque los cambios de los que hablamos son mayores que los que el planeta ha experimentado en los últimos miles de años, todavía no se acercan a los grandes cambios naturales entre las edades del hielo y los periodos interglaciares, y la tierra y los seres humanos pudieron sobrevivir.

Pero hay consecuencias que no se pueden tomar a la ligera. Durante el cenit de la última edad del hielo, el nivel del mar era unos 400 pies más bajo que el actual ya que enormes cantidades de agua se encontraban atrapadas en las placas de hielo continentales. Al calentarse las regiones polares, es

posible que partes de Groenlandia y del Antártico se derritan, aumentando el nivel del mar. Medidas de una gran precisión tomadas desde satélites muestran que el grosor del hielo de Groenlandia esta aumentando en el interior pero disminuyendo en los bordes, y mientras que existen ciclos de aumento y disminución en el Ártico, parece ser que las capas cada vez son mas finas en su conjunto. El agua derretida en la superficie de Groenlandia pasa al fondo del hielo, posiblemente haciendo que el hielo vaya más rápidamente hacia el mar. Nuestro conocimiento de la física del hielo bajo presión no es muy grande, por lo que es complicado saber como responderá el hielo al calentamiento. Si todo el hielo de Groenlandia se derritiera el aumento del mar seria de unos 22 pies, inundando muchas regiones costeras, como la mayor parte del Sur de Florida y la parte baja de Manhattan.

Un estudio que realicé muestra que los huracanes están respondiendo al aumento de la superficie marina mas rápido de lo que se predecía, especialmente en el Atlántico Norte, donde la fuerza de los ciclones tropicales ha aumentado en un 60% desde los años 70. La época de huracanes del 2005 fue la más activa en los 150 años desde que se registran esos datos, siendo también el récord de temperatura del Atlántico tropical. Los huracanes son de lejos los peores desastres naturales en cuanto al impacto económico en los EEUU. El Katrina nos puede costar unos 200 mil millones de dólares norteamericanos y se cobró al menos 1200 vidas.

Globalmente, los ciclones tropicales causan una terrible cantidad en pérdidas humanas y en miseria. El Huracán Mitch de 1998 mató a más de 10.000 personas en Centro América, mientras que en 1970 una sola tormenta mató a unas 300.000 personas en Bangladesh. No se pueden descartar cambios substanciales en la actividad de los huracanes como simples perturbaciones climáticas a las que podamos adaptarnos fácilmente.

La teoría básica y los modelos nos muestran otro resultado de las consecuencias de unos cuantos grados de calentamiento. La cantidad de vapor de agua en el aire crece proporcionalmente con la temperatura: un aumento en la temperatura de 7 °F aumenta el vapor de agua en un 25%. Uno supone que un aumento en la cantidad de agua que sube hacia las nubes debería incrementar en la misma proporción la cantidad de lluvia. Pero el vapor de agua condensado calienta la atmósfera y, dentro del plan general de las cosas, eso se debe compensar con la pérdida del calor de la radiación. Contrariamente, simples cálculos muestran que la cantidad de perdida de calor de radiación aumenta muy poco con la temperatura, por lo que el calentamiento total por la condensación debe aumentar también lentamente. Los modelos resuelven este enigma haciendo que llueva más copiosamente en sitios húmedos y al mismo tiempo aumentando la intensidad, la duración o la extensión geográfica de las sequías. Por

consiguiente, los peligros de las inundaciones y las sequías gemelas aumentan substancialmente con un Planeta mas caliente.

Es particularmente clarificante contemplar esas consecuencias observando la evidencia de menores cambios naturales desde la última edad del hielo que debilitaron, y en algunos casos destruyeron, civilizaciones enteras en lugares como Mesopotamia, América Central y del Sur y, en la zona del suroeste, lo que hoy son los Estados Unidos.

Al alterar el clima tanto y tan rápido, también somos conscientes de nuestra propia ignorancia sobre el funcionamiento del sistema climático. Puede que los mecanismos de las respuestas negativas que no hemos contemplado o a los que no hemos dado la importancia requerida se empiecen a manifestar, evitando consecuencias mas debilitadoras. Por el contrario, se puede decir lo mismo de las respuestas positivas, y los efectos pueden ser peores de los proyectados. La información extraída del núcleo del hielo nos muestra un clima que reacciona de manera compleja y sorprendente para suave y lentamente cambiar la fuerza de la radiación causada por las variaciones de la órbita terrestre. Lejos de ser un cambio suave, permanece en un estado por mucho tiempo y después cambia a otro repentinamente. Nosotros no comprendemos esto y estamos preocupados por que un cambio repentino se pueda dar en el futuro.

Ciencia, política y medios de comunicación

La ciencia se basa en probar, desechar o refinar hipótesis continuamente, un proceso al que ayuda en gran medida la posición escéptica de los científicos. A la mayoría nos mueve la pasión por entender la naturaleza, pero eso significa que nos desapasionamos por las ideas comunes. El partidismo, venga de donde venga, es muy probable que sea detectado por nuestros colegas, y nos haga perder credibilidad, que es lo que verdaderamente cuenta en este negocio. Compartimos una fe- justificada por la experiencia: que existe una verdad que al final que será descubierta, y esos que se aferran, por motivos emocionales, a ideas incorrectas serán juzgados por la historia como se merezcan; por el contrario, aquellos que lo vean antes serán considerados como visionarios.

La evolución del debate científico sobre el cambio climático antropogénico ilustra el valor del escepticismo y los fallos del partidismo. Aunque la noción de que la combustión de combustibles fósiles pueda aumentar los niveles de CO₂ y alterar el clima se originó en el siglo XIX, cuando se produjo un despertar general sobre el tema fue en 1979, por un informe de la National Academy of Sciences (Academia Nacional de las Ciencias) que nos advertía que si se doblaba el nivel de CO₂ podría conducir a un aumento de entre 3 y 8 °F en la temperatura global. Mas tarde, en 1998, James Hansen, el director del Instituto Goddard para estudios espaciales de la NASA, inició una tormentosa controversia al testificar en el Congreso que estaba

totalmente seguro de que se había producido una señal de un calentamiento global desde el fondo de una variabilidad climática. En esos años se sabía mucho menos sobre la variabilidad climática natural producida antes de que se empezasen a registrar tales datos, en el siglo XIX, (solamente se habían realizado unas cuantas simulaciones climáticas). Muchos científicos eran muy escépticos sobre las afirmaciones de Hansen; yo entre ellos. Es importante que interpretemos la palabra escéptico literalmente: "No es que estuviésemos seguros de lo contrario, simplemente pensábamos que todavía no se había dictaminado la resolución.

Más o menos al mismo tiempo, grupos radicales conservacionistas y un puñado de científicos influenciados por aquellos comenzaron una pelea con motivos que posteriormente resultaron obvios. Este salto produjo la politización del tema, grupos conservadores financiados por las compañías petrolíferas y constructores de automóviles pasaron al contraataque. Esto también marcó el nacimiento de un fenómeno interesante y preocupante que continúa en nuestros días. Un número muy pequeño de científicos del clima adoptaron unas posiciones dogmáticas y, con ello, perdieron credibilidad entre la gran mayoría, que se mantuvo en la búsqueda honesta de respuestas. En la izquierda emergió un argumento que urgía a los compañeros científicos a que exagerasen deliberadamente sus descubrimientos para remover la apatía de la gente, una idea que, afortunadamente, fracasó en el mundo científico pero que se afianzó en Hollywood, culminando con la realización en el 2004 de la película *El Día Después*. En la derecha se comenzó a indagar en las respuestas negativas que contrarrestarían el aumento en los gases de efecto invernadero: surgieron ideas imaginativas, pero que no han pasado de la fase de la comparación entre observaciones. Pero según crecía el número de dogmáticos, alienados de los científicos más importantes, aquellos fueron apoyados por grupos políticos y por periodistas que los lanzaron a la primera plana. Esto produce una grave distorsión en la percepción pública con respecto al debate científico. Los medios de comunicación, siempre hambrientos de drama sobre dogmas enfrentados, ignoran en gran medida a los científicos importantes, cuyas dudas no hacen buenos titulares.

Según van aumentando las señales del calentamiento global, esa telenovela de humor se mantiene viva por un número cada vez más reducido de los que lo niegan, a los que se les hacen entrevistas constantemente por unos periodistas que pretenden buscar el equilibrio entre posiciones.

Mientras que el público norteamericano ha sido mal informado por unos medios obsesionados con el sensacionalismo, los científicos climáticos han ido desarrollando una estrategia que les permite seguir adelante, comparando datos y analizando las ideas de los otros, creando un importante canal de comunicación entre ellos. Llamado el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), producen un resumen detallado del estado de la ciencia cada cuatro años; el próximo

aparecerá en Febrero del 2007. Aunque esté lejos de ser perfecto, en el IPCC trabajan reputados científicos climáticos de bastantes países y ha sido capaz de resistir los ataques políticos y los intereses creados.

Los informes del IPCC son bastante moderados sobre lo que sabemos colectivamente y sobre dónde residen las dudas. En la primera categoría: descubrimientos que son irrefutables:

- Las concentraciones de los gases de efecto invernadero, dióxido de carbono, metano, ozono y óxido nitroso están aumentando debido al consumo de combustibles fósiles y a la quema de biomasa. El dióxido de carbono ha aumentado desde las 280 ppm del periodo pre-industrial hasta las 380ppm actuales, un aumento del 35%. Por los datos obtenidos del núcleo del hielo, es evidente que los actuales niveles de CO2 exceden los de los últimos 650.000 años.
- La media de la temperatura terrestre ha aumentado 1,2 °F en el siglo pasado, con el mayor aumento registrado entre 1920 y 1950, y otra vez, comenzando 1975. El año 2005 fue el más cálido desde que se miden estos datos.
- El nivel del mar ha aumentado unas 2,7 pulgadas (7 cm) en los últimos 40 años; algo mas de una pulgada en la ultima década.
- La extensión geográfica anual del hielo en el Ártico ha disminuido entre un 15 y un 20% desde que se comenzó a medirlo con satélites en 1978.

En la segunda categoría hay descubrimientos con los que la mayoría de los científicos climáticos están de acuerdo pero que no están claros para algunos:

- La temperatura global es mas alta que en los últimos 500 a 1000 años.
- La mayor parte de la variabilidad de temperatura global esta causada por cuatro factores: variabilidad de la intensidad solar, grandes erupciones volcánicas, sulfatos antropogénicos de los aerosoles y gases de efecto invernadero.
- El aumento dramático en la temperatura en los últimos 30 años se debe principalmente al aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero y un estancamiento o pequeña disminución en el sulfato de los aerosoles.
- A menos que se tomen medidas para reducir los gases de efecto invernadero, la temperatura continuará aumentando, unos 2,5 a 9 °F

en el próximo siglo, dependiendo de las dudas y de la cantidad de gases que se produzcan.

- Como resultado de la expansión termal del agua del mar y del derretimiento de los polos, el nivel del mar aumentará entre 6 y 16 pulgadas a lo largo del próximo siglo, aunque puede ser mayor si las grandes placas de hielo continentales se vuelven inestables.
- Las lluvias serán más intensas pero menos frecuentes.
- La incidencia, intensidad y duración de las inundaciones y las sequías aumentará.
- La intensidad de los huracanes seguirá en aumento aunque puede que sean menos frecuentes.

Todas esas proyecciones dependen, por supuesto, de la cantidad de gases de efecto invernadero que se añadan a la atmósfera en el próximo siglo, y aunque pudiésemos estar seguros de los cambios, estimar sus efectos en la humanidad es una tarea tremendamente compleja, pues hay que sopesar las inseguras estimaciones de costos y beneficios contra el coste de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Pero de lo que no estamos seguros es de los cambios a los que nos enfrentamos, por lo que debemos estar alerta frente a sorpresas climáticas. Aunque creyésemos que los cambios proyectados fuesen beneficiosos, debemos inclinarnos a hacer sacrificios, como una póliza de seguros contra las sorpresas potencialmente dañinas.

La política y el cambio climático

Especialmente en los EEUU, el debate político sobre el cambio climático se polarizó con el eje conservador-liberal hace ya algunas décadas. Aunque ahora esto nos parezca normal, no es completamente obvio el motivo por el cual las cosas fueron de ese modo. Uno se puede imaginar fácilmente a los conservadores agarrándose a la noción del cambio climático apoyando acciones que les gustaría ver de cualquier manera. Los conservadores normalmente siempre han apoyado la energía nuclear y son pocos los que estarán contentos con nuestra dependencia del petróleo extranjero. Los EEUU tienen fama por su innovación tecnológica y deberían tener ventaja en hacer dinero con un cambio global tecnológico en la producción de energía: consideremos las perspectivas de la venta de nuevas tecnologías para mover los vehículos y la generación eléctrica en China. Nada de esto ha ocurrido.

Existen paradojas en la izquierda también. Una importante reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero requiere un cambio en la forma

de producir energía y también medidas conservacionistas. Pero esas alternativas, como la nuclear y la eólica, se ven con ambivalencia desde la izquierda. El senador Kennedy, nuestro senador más liberal (por bastantes medidas), se opone con bastante fuerza a un proyecto para producir energía eólica cerca de su casa en Hyannis, y los ecologistas han comenzado a replantearse su oposición visceral a la energía nuclear. Si no hubiese sido por la oposición, los EEUU obtendrían la mayor parte de su energía de las centrales nucleares, como hace Francia; por lo que los ecologistas deben aceptar su responsabilidad por el problema más crítico del medio ambiente actual.

Existen otros obstáculos para abordar con sensatez el problema climático. Tenemos pocos senadores en el Congreso con un pasado o interés en la ciencia; algunos de ellos muestran su desdén por el tema. Mientras sigamos eligiendo científicos iletrados como James Inhofe, quien dice que el calentamiento global es un timo, no tendremos la capacidad de entrar en un debate inteligente. Los científicos son más efectivos cuando dan consejos claros e imparciales, pero su reputación de imparcialidad está gravemente comprometida a causa de la increíble falta de diversidad política entre los académicos norteamericanos, quienes sufren por el tipo de pensamiento de grupo que se desarrolla en las culturas cerradas. Hasta que esta profunda y bien documentada homogeneidad intelectual cambie, los científicos serán sospechosos de constituir un *think tank* de izquierdas.

En el aspecto positivo, los gobiernos de bastantes países, incluyendo el de los EEUU, continúan financiando programas de investigación climática y muchas de las incertidumbres sobre el cambio climático se están borrando poco a poco. Los extremistas están siendo expuestos y relegados a un segundo plano, y cuando los medios dejen de publicar sus posiciones, sus aliados políticos carecerán de argumentos. Cuando esto ocurra, podremos trabajar en serio para ver cómo nos enfrentamos al más complejo y puede que problema más importante al que se ha enfrentado la humanidad.

Nos guste o no, nos han entregado las riendas de Faetón y tendremos que aprender a controlar el clima si queremos evitar ese destino

**** Kerry Emanuel** es profesor de meteorología en el MIT y el autor de *Divine Wind: The History and Science of Hurricanes*. En 2006, la revista *Time* le reconoció como una de las 100 personas más influyentes del mundo.

Publicado originalmente en el número de Enero/ Febrero de 2007 de la *Boston Review*.

Traducción: Mario Cuellar, Félix Nieto y Globalizate
Revisión: Globalizate