

CALENTAMIENTO GLOBAL Y EL OCEANO

José Barberán

Instituto de Ciencias del Mar, Limnología-UNAM

Hace siete años, en una reunión similar a ésta, sobre el mismo tema, el Presidente de Investigación y Desarrollo de la empresa petrolera Exxon, (David, 1984), al analizar los retos implicados por el futuro calentamiento terrestre, expresaba sus deseos de que la humanidad aplicara, en este problema, su probada capacidad de conflicto: "Y ciertamente hay amplias oportunidades para conflicto. Por ejemplo, es desconcertante que los pocos mapas que muestran los efectos probables del calentamiento global muestran a las dos superpotencias perdiendo mucha de su precipitación pluvial mientras que el resto del mundo aparentemente se beneficia".

Asiete años de distancia, con muchos nuevos resultados, la afirmación anterior parece confirmarse sólo parcialmente: por un lado, las ciencias sociales demostraron mucha menos capacidad predictiva de grandes eventos que las ciencias naturales. Una de las superpotencias ha desaparecido como tal, cambiando radicalmente dos factores del problema: i) La probable evolución futura de las emisiones de gases de invernadero en buen parte del planeta y ii) El entorno geopolítico en el que se negociará un posible protocolo sobre sus emisiones; por otro lado, aunque con un grado de incertidumbre no mucho menor que entonces, los modelos parecen insistir en modificaciones de los patrones pluviales similares a los arriba enunciados.

Ciertamente, en términos de la civilización humana, uno de los cambios climáticos de mayor trascendencia será la transformación de los regímenes pluviales inducida por el calentamiento. Seguramente, como predicen los modelos, algunas regiones del planeta saldrán beneficiadas, en términos de habitabilidad humana y, en otras, habrá un deterioro. En este momento es importante reconocer este hecho que, potencialmente, puede introducir grandes e interesadas diferencias en la interpretación de resultados científicos que, por lo pronto, no son concluyentes y dejan espacio para una amplia gama de escenarios e interpretaciones.

Para pronosticar los efectos climáticos del incremento previsible de gases de invernadero es necesario modelar el sistema climático terrestre, primero para reproducir, en los modelos, su estado actual y, posteriormente, calcular las modificaciones inducidas. Ese proyecto ha probado ser una tarea formidable. Se trata de un sistema complejo en el que de manera no lineal interactúan la atmósfera, el océano, la superficie continental, la biota

e inclusive el vulcanismo. Faltan muchos elementos para construirlo que sería un verdadero modelo climático predictivo. Con los algoritmos hasta ahora propuestos, simplemente no existen computadoras suficientemente grandes para realizar la tarea en un tiempo útil.

Desde el punto de vista del equilibrio termodinámico de la atmósfera, si la concentración de gases de invernadero se duplicara y ningún otro factor cambiara, la temperatura promedio de equilibrio se incrementaría en 1.3K. Sin embargo, un cambio como el descrito modificaría otros parámetros climáticos que, a su vez, tendrían incidencia en la temperatura. Estos fenómenos de retroalimentación, que son dominantes, están acoplados entre sí, dependen de procesos físicos complejos y presentan las mayores dificultades para la modelación.

El vapor de agua atmosférico es quizá el factor de retroalimentación positiva más significativo. Se trata del gas de invernadero cuantitativamente más importante.

Al aumentar la temperatura del aire, aumenta su capacidad de retener vapor de agua y con ello el efecto de invernadero producido por este gas se incrementa. Los pronósticos coinciden en identificar este factor de amplificación como el más grande y hay evidencias observacionales de su incremento en las zonas marítimas tropicales durante las últimas décadas (Flohn y col, 1990). Es en el terreno de los sistemas de retroalimentación donde surgen las grandes incertidumbres en los pronósticos de calentamiento global.

Además de las dificultades que se podrían llamar logísticas (computadoras y algoritmos más eficientes, observaciones de campos globales, etc) existe un conjunto de áreas desconocidas, el territorio ignoto del problema del calentamiento, en las cuales es necesario un formidable esfuerzo de investigación. Analicemos de manera sumaria seis de las parcelas ignotas más importantes.

NUBES

Las nubes tienen un efecto enfriador en tanto reflejan energía solar incidente y un efecto de calentamiento en tanto reflejan y capturan radiación de onda larga emitida hacia el espacio. Su efecto neto depende de la zona del planeta y de sus propiedades ópticas. Estas últimas, a

su vez, dependen críticamente de varios parámetros de la nube: fase en la que se encuentra el agua, distribución del tamaño de las partículas, etc.

La complejidad del problema ha convertido a la retroalimentación por nubes en la mayor causa de divergencia entre los distintos pronósticos numéricos (CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation, 1989). En algunos de ellos las nubes aparecen como retroalimentación positivas y en otros como negativas, ampliando el intervalo de posibles escenarios de calentamiento.

Directamente relacionado con la incertidumbre causada por las nubes está el problema del SO₂. Subproducto de la quema de combustibles fósiles, tras convertirse en la atmósfera en ácido sulfúrico, este gas forma abundantes y eficaces núcleos de condensación para la formación de gotas de nubes. Su sobreabundancia en el hemisferio norte hace que ahí las nubes sean más brillantes y por lo tanto más eficientes como elementos enfriadores.

Paradójicamente, el mismo proceso que genera el principal gas invernadero de origen antropogénico también genera el más eficaz factor de enfriamiento. La incertidumbre sobre los efectos relativos de ambos gases es grande: el efecto enfriador de quemar combustibles fósiles se estima como entre 4 y 8 veces su efecto de calentamiento. Dado que el SO₂ es removido rápidamente de la atmósfera mientras que el CO₂ tiene un tiempo de residencia muy largo, podría ocurrir, paradójicamente, que una reducción drástica en la quema de combustibles fósiles produjera, contra lo esperado, una aceleración del calentamiento atmosférico (Wigley, 1991).

OCEANO

El océano puede ser visto como un elemento retroalimentador del clima o como la componente energéticamente determinante, en plazos climáticos, del sistema. Su papel central desde el punto de vista de las variaciones climáticas está determinado por el hecho de que es el mayor reservorio energético del sistema: los primeros 2.5 metros de la columna de agua tienen una capacidad calorífica equivalente a la de toda la columna de aire. Y la columna de agua tiene cinco kilómetros de profundidad que participan, en distintas escalas de tiempo, en los flujos energéticos climáticos.

De los 240 Wm⁻² de energía solar que en promedio absorbe el planeta (un total de 120 Petawatts), la mitad es absorbida directamente por el océano (63 Pw). El flujo energético total de equilibrio a través de la superficie oceánica es de 175 Wm⁻²; de estos, 65 Wm⁻² son emitidos en radiación de onda larga, susceptibles de ser retenidos por los gases invernadero. El resto fluye en la forma

de calor sensible y calor de evaporación, mediante la cual el océano controla la concentración atmosférica del gas invernadero más importante, el vapor de agua. De los 4 Pw que son transportados, en promedio, de latitudes bajas a latitudes altas a cada hemisferio, el océano transporta alrededor de 2.2 Pw (Vonder Haar, y col, 1973). Por otra parte, del total de CO₂ antropogénico emitido durante la era industrial, el océano ha retenido la mitad.

Con su papel de amortiguador climático, el océano, mucho menos estudiado, observado y entendido que la atmósfera, se convierte así en uno de los territorios ignotos en el pronóstico del cambio climático.

La circulación oceánica global, responsable del transporte de energía de unas latitudes a otras y del amortiguamiento de las variaciones climáticas, se conoce sólo superficialmente. A pesar de la reciente intensificación del esfuerzo observacional, se cuenta con muy pocas mediciones, esporádicas en el tiempo y el espacio. Sin el conocimiento cuantitativo de la circulación oceánica global, y de su sensibilidad a los elementos que la controlan, no hay esperanza de contar con un pronóstico confiable de los escenarios de cambio climático.

Como una respuesta parcial a esta problemática, se ha diseñado el Experimento sobre la Circulación Oceánica Mundial (WOCE, por su nombre en inglés) (WOCE, 1988), que pretenden construir una foto "instantánea" de la circulación global a partir de mediciones en todos los océanos de costa a costa y de superficie a fondo, en un lapso de 5 a 7 años. Las mediciones desde barcos oceanográficos se combinarán con información satelital sobre el nivel del mar, con una precisión de centímetros, para construir la primera base de datos que sirva para alimentar a modelos de circulación oceánica de la próxima generación. Comparando con el problema atmosférico, se puede pensar que lo que se obtendrá con este esfuerzo equivale a lo que se obtiene para la atmósfera en un día: una foto del estado dinámico en un momento dado, sin más información sobre su evolución de un día para otro. En tanto no se consolide el "Sistema Global de Observaciones Oceánicas" (GOOS en inglés), que tardará décadas, serán de gran importancia las observaciones regionales, con continuidad temporal, que proporcionen información sobre los procesos de cambio.

Un ejemplo de la relevancia del conocimiento de la circulación oceánica para el cambio climático es la llamada "Banda sin fin", un verdadero río dentro del océano que transporta alrededor de 1 Pw (Semtner y col, 1991) del Pacífico central al Atlántico norte y cuya existencia parece depender críticamente de las condiciones de superficie en esta última cuenca. Una

combinación de bajas temperaturas, gran evaporación y por lo tanto alta salinidad, durante el invierno y la primavera en el Atlántico norte producen un masivo hundimiento de agua densa y cargada de carbón que viaja por las profundidades durante alrededor de mil años hasta el Pacífico central, de donde regresa como agua caliente y menos salina, por la superficie, hasta su lugar de origen para repetir el ciclo.

Se trata de un ciclo continuo y cuantitativamente central para el régimen hidrológico térmico y del carbono del planeta. De su estabilidad y posibles respuestas a cambios atmosféricos se sabe muy poco, aunque es claro su potencial para definir las características del calentamiento esperado para próximas décadas. Existen evidencias geológicas (Boyle y col, 1987) de su interrupción durante un período hace 5000 años y evidencias observacionales directas de su parcial modificación durante la década de los sesenta (Manabe y col, 1988), cuando una masa de agua superficial poco salina se estacionó al sur de Groenlandia inhibiendo el hundimiento anual que alimenta este río. El hundimiento anual de agua en el Atlántico norte y la explosión fotosintética asociada a él, que ocurre cada primavera, parecen estar desempeñando un papel primordial en la captura, por parte del océano, de la mitad del CO_2 antropogénico. Cabe preguntarse si este proceso se mantendrá, se acelerará o se interrumpirá en el nuevo entorno climático. Otra de las parecelas ignotas.

La modelación oceánica es uno más de los terrenos poco explorados. El hecho de que el océano contenga gran parte de su energía dinámica en movimiento con escalas de decenas de kilómetros implica que la resolución espacial necesaria para modelar su movimiento es mucho mayor que la necesaria en los modelos atmosféricos. Simplemente todavía no existen las computadoras de la velocidad necesaria para hacer modelos oceánicos con eficiencia comparable a los que hoy se usan para la atmósfera. Y lo que realmente se necesita son modelos acoplados que simulen simultáneamente, y en interacción, al océano y a la atmósfera. Posiblemente los resultados de WOCE y los datos del GOOS estén disponibles al mismo tiempo que la fuerza computacional necesaria. O posiblemente no sea un problema de fuerza bruta sino de mejores algoritmos y mejores parametrizaciones que reflejen un más refinado conocimiento de los procesos físicos que controlan el océano.

GASES INVERNADERO.

La respuesta térmica del sistema climático a las emisiones de gases invernadero dependerá no sólo de la magnitud de éstas, sino del ritmo de su crecimiento, como lo han demostrado algunos modelos. Pronosticar el ritmo

futuro de las emisiones es un problema del dominio de las ciencias sociales que seguramente es menos soluble que el problema físico. Dada la gran disparidad de las emisiones per cápita entre los países no desarrollados, que contienen el grueso de la población mundial, y los países desarrollados, el mayor potencial de cambio de las emisiones se encuentra en los primeros. Intentar pronosticar los más probables escenarios de crecimiento económico, y por tanto, de emisiones de gases de invernadero, del mundo no desarrollado, parece en este momento, una tarea que está más allá de lo posible.

¿Se continuará la tendencia de estancamiento o reducción de emisiones per cápita de la "década perdida" en el mundo no desarrollado? ¿Habrá una incorporación parcial de países del tercer al primer mundo? ¿Hasta cuando continuará China con su crecimiento acelerado con carbón como principal energético? ¿Por cuánto tiempo seguirá congelado el consumo de combustibles fósiles per cápita en el África no árabe y el ex-segundo mundo? ¿Hasta donde tendrán influencia los posibles acuerdos internacionales sobre emisiones por encima de las grandes, y en buena medida desconocidas, tendencias demográficas y sociales que se darán durante el siglo XXI en el mundo no desarrollado o en los países recién salidos del socialismo?

Pudiera pensarse que estas incertidumbres sólo afectarán la fecha, pero no el hecho, en que la concentración de CO_2 atmosférico se duplique con relación a su valor preindustrial. No es así, porque tanto para la civilización humana, como para el sistema climático, importa la velocidad del cambio y no sólo su magnitud. La especie humana ha demostrado históricamente una capacidad de enfrentar cambios climáticos con migraciones y otros mecanismos de ajuste para los que la velocidad del cambio es crucial.

Para el sistema físico, la respuesta de los distintos elementos de retroalimentación, en particular la del océano, puede ser radicalmente distinta dependiendo de la velocidad de acumulación de gases invernadero, por ejemplo, en términos de la capacidad oceánica de absorber anualmente la mitad de las 7 gigatoneladas de carbono antropogénico.

VOLCANES

Es bien conocido el efecto enfriador de las explosiones volcánicas que alcanzan a inyectar ceniza, polvo ó SO_2 en la estratósfera. En la historia planetaria reciente abundan los ejemplos de grandes explosiones volcánicas que han producido períodos de enfriamiento troposférico (y de calentamiento estratosférico) de varios años (Stothers, 1984).

De hecho, es posible explicar, aproximadamente, las oscilaciones climáticas de la temperatura planetaria durante los últimos cien años (que son de menos de un grado centígrado) a partir de la distribución temporal de las explosiones volcánicas y de una estimación de la magnitud de sus inyecciones de partículas a la estratósfera (Oliver, 1976). Estos hechos tienen relevancia definitiva para la interpretación de los pronósticos climáticos pues la hasta ahora impredecible secuencia de explosiones volcánicas importantes del próximo siglo pueden reducir, por un factor de dos, la magnitud del calentamiento pronosticado, como lo ha demostrado alguno de los modelos al incluir niveles de vulcanismo similares a los observados durante la historia reciente (Pollack y col, 1983).

DETECCION DEL CAMBIO

Uno de los mejores indicadores para calificar los pronósticos de calentamiento debería ser la propia historia climática reciente. Ella debe contener la respuesta térmica al incremento de gases invernadero que ha ocurrido durante la era industrial. De 1790 a la fecha, la concentración de CO_2 en la atmósfera ha pasado de 275 a 345 ppm, un incremento del 25% con un efecto radiativo neto de 0.23 W m^{-2} , comparable al efecto acumulado de los otros gases invernadero antropogénicos (0.18 W m^{-2} por metano, freones y NO_2). Actualmente el incremento de CO_2 es de 1.4 ppm por año que equivale 3.3 gigatoneladas de carbono retenido por la atmósfera al año.

A pesar de la abundancia de mediciones de temperatura del aire durante los últimos cien años, la base de datos con que se cuenta tiene tantas deficiencias que no permite una respuesta clara al problema de la evolución térmica atmosférica durante el período. Los datos existentes cubren muy pobremente tanto al hemisferio sur como a la atmósfera marina. Urbanización y cambios abundantes en la posición de las estaciones meteorológicas producen un alto grado de incertidumbre en los resultados. Las series de temperaturas del agua de mar de superficie, que podrían ser una fuente de información térmica con menos ruido, adolecen de cambios históricos de metodología de medición que introducen serias dudas sobre los resultados obtenidos a partir de ellas.

De hecho, los pocos resultados sobre los que hay un consenso razonable, no total, si bien indican un calentamiento del orden de 0.6 K desde 1880, de los cuales 0.2 K corresponden al período 1940 a 1990 (Hansen y col, 1987), también indican aspectos contradictorios sobre la evolución térmica del sistema climático: un enfriamiento del agua superficial del Pacífico norte, un calentamiento del agua subsuperficial del Atlántico (Folland y col, 1990) y ninguna tendencia a

partir de la enorme base de datos de temperatura correspondiente a Norteamérica (Hanson y col, 1989) o a partir de 10 años de datos satelitales globales para la tropósfera media (Spencer y col, 1990).

En todo caso se trata de un calentamiento que está por debajo de lo esperable según la mayoría de los modelos y en el cual no es observable ninguna aceleración estadísticamente significativa (Maul, 1991). La detección del cambio climático es otro de los territorios ignotos en los que se tiene que hacer un esfuerzo importante. La detección, no conclusiva, de cambios en el contenido de agua precipitable en la atmósfera marina tropical durante las últimas tres décadas es importante en este sentido (Flohn y col, 1990).

CALIDAD DEL CAMBIO

La contundencia del crecimiento demográfico en la mayoría de las regiones del planeta está haciendo que la disponibilidad de agua, para usos urbanos y para la agricultura, se convierta en uno de los principales obstáculos para el desarrollo de la civilización humana. El pronóstico de un incremento promedio de la precipitación del 6 al 15%, podría generar interés en el cambio climático en muchos grupos humanos, dependiendo de la distribución geográfica de ese incremento pluvial.

Esta posibilidad demuestra que la facilidad con que se ha adoptado el calificativo de "desastre" para el pronosticado calentamiento no se justifica desde ningún punto de vista: ni se conoce su magnitud, ni la distribución geográfica de sus efectos, ni el balance de la calidad de éstos.

Las grandes extensiones continentales que hoy son inhabitables para el hombre por falta de agua o por bajas temperaturas son una demostración palpable de la necesidad de profundizar en los posibles escenarios del cambio climático.

Un planeta 2 o 3 grados más caliente que el actual, ¿será, en conjunto, más o menos hostil para la vida en general y para la humanidad en particular? Posiblemente parte de la respuesta está en los registros geológicos e históricos de calentamientos anteriores. Otra parcela ignota del problema del calentamiento

REFERENCIAS

Boyle, E y L. Keigwin, Nature (1987) 330, 35-40
CAS/JSC, Working Group on Numerical Experimentation (Reporte de la quinta sesión, Hamburgo, ICSU, WMO, 1989).

David Jr. E. Climate Processes and Climate Sensitivity.. JE Hansen y Takahasi (Eds) (American Geophysical Union, Washington, D.C., 1984).

Flohn, H.A. Kapala, HR Knoche y M Mache, Changes of hydrological cycle and Northern hemisphere circulation and their initiation at the tropical irsea surface (TOGA Conference Proceedings, Honolulu, Hawaii, 1990) 47-57

Folland, CK, TR Karl, KY Vinnikov, Limate Change, The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on climate Change JT Houghton, GJ Jenking y JJ Ephraums (Eds) (Cambridge University Press, Cambridge, 1990) 195-238.

Hansen, J, y S Lebedeff, J. Geophys Res (1987) 92 (dII), 13345-13372.

Hanson, K, GA Maul y TR Karl, Geophys Res Lett (1989) 16 (1), 49-52.

Manabe, S, y R J Stouffer, J. of Climate (1988) 1, 841-866.

Maul, GA, "Temperature and sea level chante", presentado en Global Warning Physics and Facts (School of Foreing Service of Georgetown University, Washington, DC, 1991).

Oliver, RC, J. Appl. Meteorol (1976) 15, 933-950.

Artículo aparecido en

Ciencia, Rev. Acad. Invest.Cient. Septiembre 1992

**PAN-AMERICAN CURRENT RESEARCH
ON FLUID INCLUSIONS**

MAYO 19 - 21 1994

CUERNAVACA - MORELOS

Informes

Dra. G. Izquierdo
IIE - Geotermia
A. Postal 475
Cvaca. 62000 Mor.
Fax 73 182526

**CIENCIAS DE LA TIERRA
INGENIERO GEOFÍSICO**

Instituto Politecnico Nacional
E.S.I.A. Unidad Ticomán

Becas

Las otorgan PEMEX, IMP, CIAS.
Mineras, etc. a los estudiantes de la
carrera.

Informes:

Av. Ticomán No. 600
Col. San José Ticomán
México 07330, D.F.

Tels:

586-54-36

586-23-71

586-24-91

Fax. 586-22-16