

XV

CERTEZAS E INCERTIDUMBRES
SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

JOAN O. GRIMALT Y BELÉN MARTRAT

*Departamento de Química Ambiental
Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona
Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

EL PROGRESO DE LA HUMANIDAD Y LA ENERGÍA

La humanidad, a lo largo de su evolución, ha conseguido desarrollar usos energéticos que no están disponibles para ningún otro organismo en la naturaleza. Hace unos 700000 años, en los inicios del Pleistoceno medio, algunos de nuestros antepasados aprendieron a hacer fuego. Ello supuso un cambio radical en la manera de utilizar la energía porque el fuego permitió gastar mucha energía en muy poco tiempo y en un espacio pequeño.

Posteriormente, hace unos 10000 años, en los comienzos del Holoceno, los humanos aprendieron a dominar el cultivo de la tierra y la explotación ganadera. Un campo sembrado tenía las funciones de una enorme antena de recogida de energía solar que podía ser aprovechada con una funcionalidad concreta (por ejemplo obtener un alimento específico). Este hecho permitió el desarrollo de sociedades de cazadores y recolectores de tipo sedentario y fomentó la aparición de los primeros asentamientos estructurados, poniendo los fundamentos de nuestra civilización. Las condiciones de vida mejoraron de tal modo que la esperanza de vida pasó de los 25 a los 40 años. Sin embargo, al mismo tiempo se inició una transformación profunda del medio ambiente de muchos lugares. En Europa se talaron la mayoría de bosques con la finalidad de sembrar y de disponer de pastos.

A principios del siglo XIX, los humanos aprendieron a obtener una ventaja todavía mejor, la producción de trabajo a partir del calor con la ayuda de máquinas (Figura 1). Este es el caso, por ejemplo, de un vapor de una fábrica textil antigua o de cualquier equipo eléctrico que ahora se puede utilizar en casa. La electricidad que se dispone en el enchufe se ha fabricado previamente mediante diversos métodos que en la gran mayoría de los casos hacen uso del calor. Los medios de transporte, coches, aviones, trenes, barcos, etc., también obtienen trabajo (desplazamiento) a partir del calor (quema de combustibles diversos).

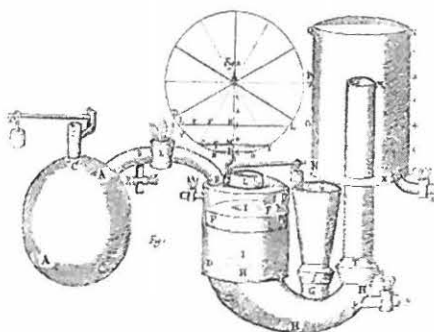


Figura 1. Uno de los primeros diseños de una máquina de vapor con pistón.
La revolución industrial del siglo XIX permitió un uso energético hasta entonces desconocido: obtener trabajo a partir del calor.

Este uso energético, que para muchos de nosotros puede parecer obvio, no es accesible a ninguna otra especie viva. Para conseguirlo es preciso sortear el segundo principio de la termodinámica que dice que la entropía tiende a aumentar en todo proceso debidamente aislado. Las máquinas inventadas por los humanos permitieron “engañar” a este principio mediante el gasto de un exceso de energía. En las centrales térmicas únicamente un tercio de la energía generada en forma de calor (la proveniente de quemar cosas) se transforma en electricidad. El resto se gasta al refrigerar la caldera y todo el sistema o se pierde por la chimenea. Se puede aprovechar una parte del calor de refrigeración para calentar uno o varios edificios circundantes, pero no como trabajo. En todos los procesos en que se obtiene trabajo a partir del calor se debe pagar el peaje de disipar al medio ambiente una gran parte de la energía producida, que no se aprovecha.

La utilización de esta nueva modalidad energética dio paso a la revolución industrial del siglo XIX. Las máquinas permitieron un gran progreso. Liberaron a muchos humanos del trabajo manual, que pudieron hacer labores mucho más intelectuales. Como consecuencia, en los últimos 150 años, se ha asentado las bases del desarrollo científico (química, física, biología), se ha producido un gran desarrollo tecnológico (motor vapor, motor explosión, energía nuclear, conquista del espacio, etc.) y se ha mejorado enormemente las condiciones sanitarias de la población (vacunas, antibióticos, etc.). Todo ello ha dado lugar a un aumento muy importante de la esperanza de vida hasta 75-80 años y a un crecimiento demográfico espectacular. Antes de la revolución industrial en la Tierra había cerca de unos 500 millones de

personas, mientras que ahora la habitan más de 6300 millones, cifra que aumenta a un ritmo de 70 millones por año (Figura 2).

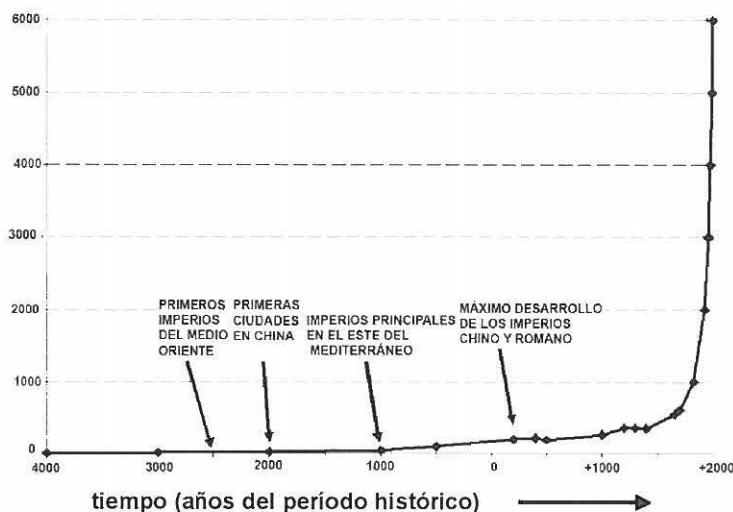


Figura 2. Evolución de la población humana del mundo a lo largo de los últimos 6000 años.

De estos 6300 millones de personas no todas gastan energía por igual porque no todas poseen el mismo grado de desarrollo económico. El hombre tecnológico, nosotros, gasta, per cápita, más de doscientas veces más energía que el hombre primitivo.

EL INCREMENTO DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

Este consumo tan elevado puso pronto de manifiesto que con la madera de los bosques no había suficiente y se empezó a extraer, en el siglo XIX el carbón del subsuelo, después, en el siglo XX, el petróleo, y recientemente, a finales del siglo XX e inicios del XXI, el gas natural. Aproximadamente el 85% de la energía que gasta nuestra civilización se obtiene a partir de estos recursos energéticos fósiles. Dichos recursos se consideran no renovables debido a que deben su origen a la actividad de miles y miles de años de las plantas terrestres y marinas. De este modo, el uso y desaparición de estas grandes acumulaciones sedimentarias de materia orgánica es, a escala humana, simplemente irreparable. Durante las últimas décadas, el elevado consumo de recursos fósiles ha dado lugar

a un aumento importante de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera. Toda combustión acaba produciendo CO_2 en el mejor de los casos y en el peor, contaminación de diverso tipo.

El planeta se encuentra en la actualidad en unas condiciones totalmente imprevistas según la evolución natural. La concentración actual de CO_2 (377 partes por millón; Keeling & Whorf, 2005) es indiscutiblemente más alta que la observada en los últimos períodos interglaciales (~260-290 partes por millón) y glaciales (~180-190 partes por millón). No existe equivalente de concentraciones tan altas de CO_2 en la atmósfera en épocas pasadas (Siegenthaler et al., 2005) (Figura 3). En los últimos 150 años la concentración de este gas se ha elevado unas 90 partes por millón debido a la acción humana. Este incremento es equivalente al ocurrido de forma natural cada vez que nuestro planeta ha pasado de época glacial a época interglacial (Figura 4).

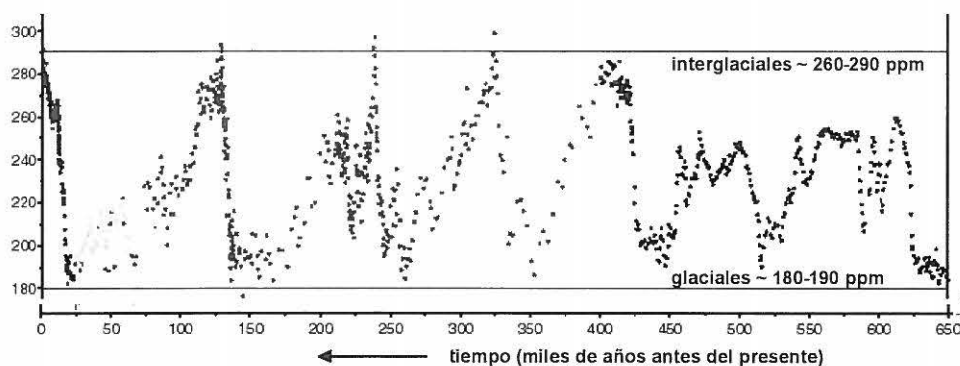


Figura 3. Evolución natural de las concentraciones de CO_2 en los últimos 650.000 años (sin considerar los años posteriores a la revolución industrial). Modificado a partir de la recopilación de datos publicada en Siegenthaler et al. (2005).

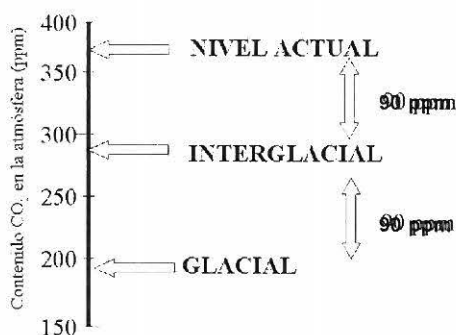


Figura 4. Concentraciones de CO_2 en las épocas glaciales e interglaciales (sin influencia humana) y nivel actual al que se ha llegado tras la revolución industrial.

El CO_2 es un gas de efecto invernadero y por ello genera un efecto de “manta térmica” en la atmósfera. A mayor concentración de este gas, mayor temperatura. Hay otros gases de efecto invernadero, como por ejemplo el metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (N_2O) y los freones. Se ha observado un incremento de la concentración atmosférica de todos ellos a partir de la revolución industrial.

LOS EFECTOS DEL AUMENTO DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los datos de los científicos (Panel Internacional sobre el Cambio Climático, un grupo de estudio que reúne los trabajos de unos 2000 investigadores de todo el mundo; IPCC, 2001) muestran con una probabilidad del 95% que la temperatura media de las últimas décadas es superior a la observada en los últimos 1000 años (Figura 5). Como consecuencia de este aumento (en el siglo XX de $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$), se ha detectado un deshielo generalizado que se puede identificar fundamentalmente en las montañas pero que también se observa en los polos norte y sur. Debido al deshielo de las zonas continentales y al aumento de temperatura del agua, el nivel del mar ha subido del orden de 10-20 cm en el siglo XX.

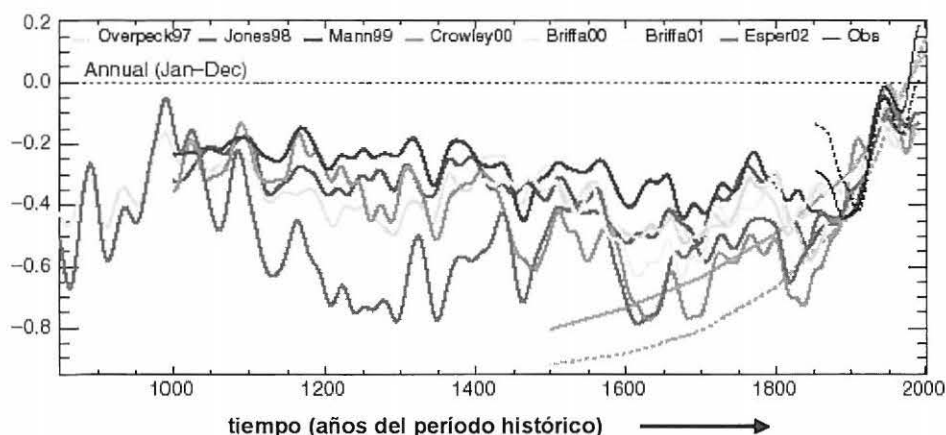


Figura 5. Registros instrumentales y reconstrucciones paleoclimáticas (a partir del estudio de los anillos de los árboles, testigos de hielo, corales y registros históricos) de la variación de la temperatura superficial global del hemisferio norte a lo largo de los últimos 1000 años, tomando como referencia el período de 1961-1990. Modificado a partir de la recopilación de datos publicada en Briffa & Osborn (2002).

A pesar de ello, nos encontramos únicamente en el inicio del proceso. Se estima que para finales de siglo los niveles de CO_2 se situarán entre 500 y 950 partes por millón. Estos incrementos darán lugar a un incremento de las temperaturas medias entre 1.4 y 5.8°C respecto a 1990 y subidas del nivel del mar de entre 9 y 88 cm (IPCC, 2001).

Estas predicciones, a pesar de su tono apocalíptico, en realidad no reflejan ningún problema importante para la naturaleza considerada en su conjunto. Cualquier experto sabe que los ecosistemas terrestres y marinos siempre han estado bajo la acción de un clima cambiante y que se pueden adaptar perfectamente. Sin embargo, los humanos basamos nuestro desarrollo en el mantenimiento del "status quo" climático. Por ejemplo, si se considera con la perspectiva temporal adecuada, el avance o retroceso de la línea de playa en unos 500-1000 metros no tiene ninguna importancia a nivel natural. Sin embargo, a nivel económico sus efectos son enormes. Lo mismo se puede decir de muchos otros fenómenos como la nieve de las montañas o la sequía.

Por otro lado, los humanos estamos ocupando espacios que antes quedaban libres precisamente porque no era seguros (por ejemplo, zonas propensas a recibir avalanchas de lodo en caso de huracanes, etc.). La existencia actual de colectivos cuyo bienestar depende de la estabilidad de las condiciones climáticas hace que cualquier cambio o catástrofe local pueda provocar efectos devastadores.

¿QUÉ ES LO QUE DETERMINA LA EVOLUCIÓN NATURAL DEL CLIMA?

La evolución natural del clima del Pleistoceno (últimos 1800000 años) se debe a variaciones en la distribución temporal y espacial de la insolación que recibe la Tierra. Está ampliamente demostrado que la geometría orbital de nuestro planeta es la principal causa externa de las edades de hielo: el movimiento de traslación más o menos elíptico alrededor del Sol (variación de excentricidad), las diferencias en la inclinación del eje de rotación respecto al plano de traslación (variación de oblicuidad) y la precesión de los equinoccios (variación de precesión). Dichas variables muestran períodos de recurrencia de 100000, 41000 y 21000 años respectivamente y su combinación determina los largos ritmos climáticos de calentamiento y enfriamiento global.

La comprobación experimental de la influencia de estos ciclos orbitales en el clima terrestre se obtuvo al estudiar la composición isotópica de

los carbonatos presentes en la fauna microscópica fósil de los sedimentos marinos. Se observó que los ciclos orbitales antes mencionados modulaban la variación temporal los isótopos estables del oxígeno, indicadores de cambios en las propiedades hidrológicas del agua terrestre (Figura 6).

De todos modos la relación existente entre los cambios climáticos observados y los ciclos orbitales no es directa. Existen muchos efectos de retroalimentación que amplifican diversos fenómenos y que se deben estudiar para comprender con precisión el funcionamiento del clima en la Tierra.

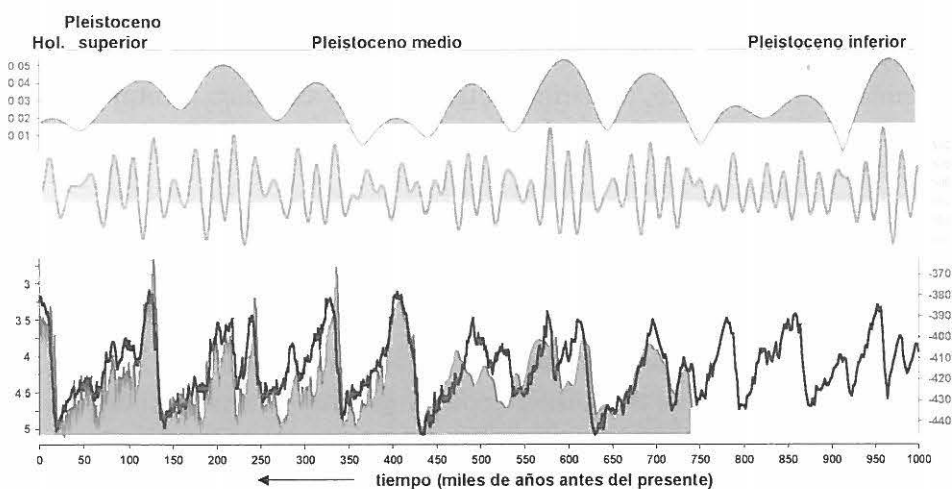


Figura 6. Diagrama inferior: registro de la sucesión de períodos cálidos similares al actual (interglaciales) separados por períodos de extensión de los casquetes polares (glaciales) (eje izquierdo, línea azul; recopilación de Lisiecki & Raymo, 2005); se compara con un indicador de la variación de temperaturas atmosféricas de la Antártida (eje derecho, perfil gris claro; EPI-CA community members, 2004). Diagramas intermedio y superior (Berger, 1977): variación temporal de la insolación de verano recibida a 65°N y de la excentricidad de la órbita terrestre. Se observa como, desde hace al menos 1000000 años, los parámetros orbitales actúan de detonadores de los cambios climáticos globales.

Un mecanismo principal en el sistema climático es la circulación termohalina. Ésta se debe fundamentalmente a la acción de la corriente del Golfo, que recoge agua de latitudes ecuatoriales, baña parte de la costa este de América del norte y transporta calor hacia el margen oeste europeo. Estas aguas cálidas y salinas provenientes del Caribe, al llegar a las zonas de plataforma de los mares nórdicos se enfrían rápidamente,

se hielan, el viento aumenta la evaporación de forma que se tornan muy densas, se hunden y se forman aguas profundas (a una velocidad de hasta 15 millones de metros cúbicos por segundo) y se libera a la atmósfera el calor transportado. Estas aguas pueden llegar a aumentar la temperatura del aire hasta 10°C en las regiones europeas donde llega su influencia.

La circulación termohalina total se mantiene en funcionamiento cuando dichas aguas densas viajan en profundidad desde el Atlántico norte, recorren los fondos de los océanos, emergen en zonas ecuatoriales y regresan al lugar donde se originaron unos centenares de años antes. Este mecanismo oceánico que supone un intercambio de calor y sal entre las zonas cálidas ecuatoriales y frías de alta latitud, es típico de los períodos interglaciales. Durante los períodos glaciales, no era operativo en forma significativa. Por tanto, un primer efecto de los cambios orbitales antes mencionados es el de desencadenar variaciones en la formación de agua profunda.

Actualmente se conoce que la puesta en marcha y parada de ese mecanismo puede ocurrir en intervalos de tiempo muy cortos (de decenas de años), mediante cambios bruscos. Es decir que, además de las variaciones climáticas “grandes” impuestas por las variaciones orbitales de la Tierra, existen otras de ciclo temporal más corto que pueden ser tan intensas como las primeras. La diferencia entre unas y otras es su duración: las primeras se mantienen en períodos de decenas de miles de años y las segundas en períodos de miles de años.

¿CUÁL HA SIDO LA EVOLUCIÓN NATURAL DEL CLIMA?

Los primeros registros continuos y detallados de las variaciones climáticas de ciclo corto aparecieron con la extracción sucesiva de testigos de centenares de metros de hielo en los casquetes polares de ambos hemisferios. La composición isotópica del agua helada acumulada en los polos refleja la temperatura del aire en el momento de depositarse esa nieve (Figuras 6 y 7). Así por ejemplo, el estudio de testigos de hielo en Groenlandia demostró que la temperatura del aire había oscilado en eventos de calentamiento y enfriamiento extremadamente abruptos durante los últimos 125000 años (North Greenland Ice Core Project members, 2004). Estos cambios constituyeron, en el momento de su identificación, una gran sorpresa en la comunidad científica porque representaban una evolución climática que era más rápida que las variaciones orbitales. Por tanto, su origen no podía estar ligado a dichas variaciones.

En el pasado, dichos cambios abruptos conllevaron una reorganización del clima en todo el hemisferio norte, de modo que se observaron no sólo en los hielos polares sino también en los registros sedimentarios marinos. Por ejemplo, en las aguas del mar de Alborán tuvieron lugar cambios de hasta 6°C en intervalos de menos de 1000 años (Cacho et al., 1999), a la vez que ocurrían variaciones equivalentes en las condiciones atmosféricas de Groenlandia. Se trata de cambios climáticos a gran escala extraordinariamente rápidos y abruptos. Su cuantificación se hizo a partir del análisis de las alquenonas, compuestos químicos que son sintetizados por la flora cocolitoforal autóctona. Su importancia radica en que son compuestos que responden a la temperatura de las aguas en que vive dicha flora mediante cambios en la concentración relativa de las especies diinsaturadas respecto a las triinsaturadas.

Recientemente, otro estudio realizado en el mar de Alborán ha puesto de manifiesto que este tipo de variabilidad climática brusca se produjo también en los períodos interglaciares. Las oscilaciones de temperatura de las aguas superficiales fueron de hasta 10°C en pocos centenares de años (Martrat et al., 2004). De acuerdo con estos resultados la frecuencia de las transiciones bruscas fue menor durante el último interglacial, pero su intensidad fue significativamente mayor en relación a aquellas acontecidas durante la época glacial (Figura 7).

Hasta el momento se consideraba que este tipo de oscilaciones era exclusivo de periodos glaciares. Cuando la circulación termohalina del Atlántico funcionaba a bajo rendimiento, el sistema era mucho más inestable y oscilaba entre diferentes escenarios de actividad que generaban cambios climáticos abruptos (Rahmstorf, 2002). En este sentido, algunas de las fases de enfriamiento del glacial estaban asociadas a desprendimientos masivos de icebergs que ocuparon el Atlántico norte en gran densidad hasta latitudes de 40°N y, en menor medida, hasta latitudes quizá inferiores a los 35°N (ver recopilación en Hemming, 2004). Los resultados aportados por Martrat et al. (2004) han mostrado que también se produjeron episodios de enfriamiento brusco en épocas interglaciales similares a la actual cuando, según las estimaciones, la corriente del Golfo debería funcionar de modo vigoroso.

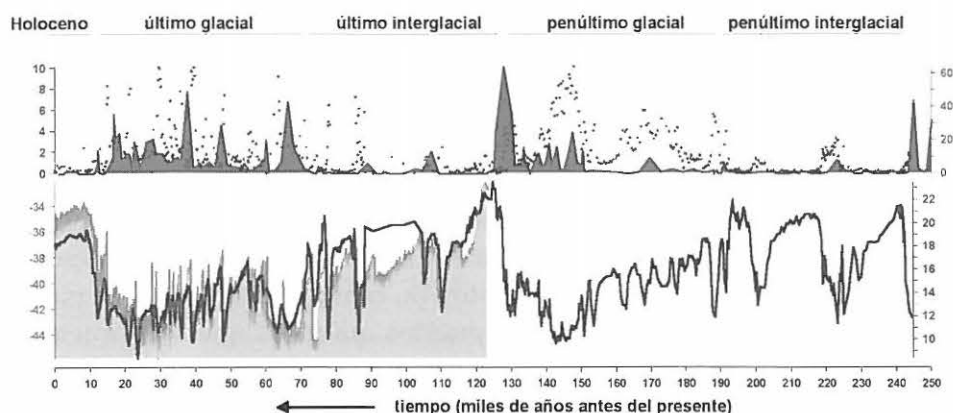


Figura 7. Diagrama inferior: comparación de un indicador de temperaturas atmosféricas de Groenlandia (eje izquierdo, perfil gris claro; North Greenland Ice Core Project members (2004)) y la temperatura superficial de las aguas del mar de Alborán de los últimos 250000 años (eje derecho, línea azul; Martrat et al., 2004). Se observa la presencia de cambios bruscos tanto en las épocas glaciales como en las interglaciales. Diagrama superior: proporción de cetona tetrainsaturada que marca los episodios de enfriamiento brusco del agua de mar (eje izquierdo, punteado azul; Martrat et al., 2004) y proporción de material sedimentario detrítico en el Atlántico norte que marca episodios muy fríos de formación y fusión masiva de hielo (eje derecho, perfil marrón; McManus et al., 1999). La comparación entre el diagrama inferior e superior muestra como en el mar de Alborán también se registran descensos de temperatura muy importantes cuando no se producen estos episodios de fusión de hielo en el Atlántico norte.

Por otra parte, el análisis combinado de registros y modelos paleoclimáticos ha puesto de manifiesto que el sistema de circulación termohalina del Atlántico norte tiene un papel clave en el mantenimiento y/o propagación de este tipo de variabilidad climática rápida (Ganopolski & Rahmstorf, 2001).

¿CUAL SERÁ LA EVOLUCIÓN FUTURA?

Usualmente se admite que “El conocimiento del pasado es la clave para conocer el futuro”. Aplicando esta máxima se ha investigado en qué épocas pretéritas la configuración orbital de la nuestro planeta era similar a la del momento presente (Berger & Loutre, 2002). Los estudios muestran que hace unos 400000 años se mantuvo un período cálido muy similar al que comenzó hace unos 10000 años, en los inicios de nuestra civilización. Se ha demostrado que fue un interglacial que no registró variaciones abruptas, sino que fue estable durante miles y miles de años. Por tanto,

en un principio se podría considerar que las variaciones bruscas todavía tardarían varios milenios en llegar (Figura 8).

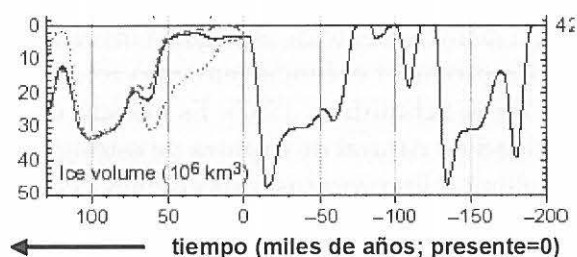


Figura 8. Simulación futura del volumen de hielo acumulado en la Tierra (eje invertido) desde hace 200000 años hasta 130000 después del presente (el tiempo es negativo en el pasado y positivo en el futuro). Para el futuro, se muestran tres posibles escenarios si se fijan valores de concentración de CO_2 atmosférico: equivalentes al último ciclo glacial-interglacial (línea negra), de hasta 750 ppm (línea roja discontinua) o constantes a 210 ppm (línea roja punteada). Modificado a partir de la recopilación de datos publicada en Berger & Loutre (2002).

Sin embargo, la velocidad a la que los humanos hemos introducido gases invernadero dentro del sistema es un elemento que puede invalidar los modelos de predicción. La introducción creciente de agua dulce en los mares nórdicos y el océano Ártico debida a la fusión de los hielos allí presentes puede dar lugar a una dilución fuerte del agua transportada por la corriente del Golfo y, por tanto, a una gran pérdida de la densidad del agua que se encuentra a latitudes altas del Atlántico. Si ello ocurriese, la desestabilización del clima en que vivimos ahora sería enorme y el hemisferio norte iría a un episodio glacial que podría durar unos cuantos miles de años.

En este sentido, observaciones en el Atlántico Norte indican una reciente desalinización de los mares nórdicos y el océano Ártico y consecuentemente una disminución en la producción de agua profunda atlántica (Hansen et al., 2001). Esta situación conllevaría una reducción en el aporte calorífico hacia el norte de Europa por la corriente del Golfo y así lo indican observaciones recientes según las cuales este flujo se ha podido reducir hasta un 30% en los últimos 60 años (Bryden et al., 2005). Este mecanismo quizá ya ha actuado como freno al proceso de calentamiento global desencadenado por los crecientes gases invernadero.

Estas evidencias sugieren que el sistema termohalino podría estar entrando en una nueva fase de desestabilización cuyas consecuencias

pueden ser devastadoras en un plazo de tiempo corto-medio, de pocas generaciones. En los escenarios climáticos futuros se enfatiza que no se trata solamente de controlar el volumen de emisiones futuras de CO₂ sino la vertiginosa velocidad de incremento de esos gases invernadero en la atmósfera, que podría comprometer el funcionamiento actual del mecanismo termohalino (Stocker & Schmittner, 1997). Es nuestra obligación por tanto evaluar la capacidad de natural de captura de estos gases por parte de los ecosistemas y delimitar los procesos responsables del desencadenamiento, transmisión y amplificación de estas oscilaciones rápidas. Se trata de cuantificar la fragilidad potencial de nuestro sistema climático futuro.

A MODO DE CONCLUSIÓN

Puede parecer paradójico pero es posible que, debido al efecto invernadero del aumento del CO₂, el planeta viviese otro episodio de glaciación en el hemisferio norte en un plazo breve de tiempo. Esta información contrasta con el hecho constatado de que el aumento de los gases de efecto invernadero está dando lugar a un calentamiento del planeta (IPCC, 2001).

Sin embargo, la predicción del IPCC se ha elaborado a partir de la extrapolación de la situación climática actual, suponiendo que los procesos climáticos esenciales no cambiarán a pesar del gran aumento de CO₂ en la atmósfera y que simplemente tendremos una transición suave hacia la situación de mayor temperatura atmosférica debido al efecto invernadero. Esta suposición no se basa en ningún principio científico, simplemente es la hipótesis más razonable ante la falta de datos sobre la posibilidad de alteraciones del sistema climático actual.

REFERENCIAS

- Berger, A. L. (1977). Support for the astronomical theory of climatic changes. *Nature* **269**, 44-45.
- Berger, A. L., Loutre, M. F. (2002). An exceptionally long interglacial ahead?. *Science* **297**, 1,287-1,288.
- Briffa, K. R., Osborn, T. J. (2002). Blowing hot and cold. *Science* **295**, 2,237-2,238.
- Bryden, H. L., Longworth, H. R., Cunningham, S. A. (2005) Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. *Nature* **438**, 655-657.

- Cacho, I., Grimalt, J. O., Pelejero, C., Canals, M., Sierro, F. J., Flores, J. A., Shackleton, N. J. (1999) Dansgaard/Oeschger and Heinrich event imprints in the Alboran Sea paleotemperatures. *Paleoceanography* **14**, 698-705.
- EPICA community members (2004). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* **429**, 623-628.
- Ganopolski, A., Rahmstorf, S. (2001). Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature* **409**, 153-158.
- Hansen, B., Turrell, W. R., Østerhus, S. (2001) Decreasing overflow from the Nordic seas into the Atlantic Ocean through the Faroe Bank channel since 1950. *Nature* **411**, 927-930.
- Hemming, S. R. (2004). Heinrich events: massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Review of Geophysics* **42**, doi: 10.1029/2003RG000128.
- IPCC (2001). Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Keeling, C. D., Whorf, T. P. (2005). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: a compendium of data on global change. Carbon dioxide information analysis center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, **20**, PA1003, doi: 10.1029/2004PA001071.
- Martrat, B., Grimalt, J. O., Lopez-Martinez, C., Cachó, I., Sierro, F. J., Flores, J. A., Zahn, R., Canals, M., Curtis, J. H., Hodell, D. A. (2004) Abrupt temperature changes in the western Mediterranean over the past 250,000 years. *Science* **306**, 1762-1765.
- McManus, J. F., Oppo, D. W., Cullen, J. L. (1999). A 0.5 million-year record of millennial-scale climate variability in the North Atlantic. *Science* **283**, 971-975.
- North Greenland Ice Core Project members (2004). High resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature* **431**, 147-151.

- Rahmstorf, S. (2002). Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* **419**, 207-214.
- Siegenthaler, U., Stocker, T. F., Monnin, E., Lüthi, D., Schwander, J., Stauffer, B., Raynaud, D., Barnola, J. M., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J. (2005). Stable carbon cycle–climate relationship during the late Pleistocene. *Science* **310**, 1313-1317.
- Stocker, T. F., Schmittner, A. (1997). Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature* **388**, 862-865.