

LAS GLACIACIONES, EL DIÓXIDO DE CARBONO Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL

MARTÍN MEDINA-ELIZALDE

ESTAMOS VIVIENDO EN UN PERIODO CLIMÁTICO PARTICULAR, QUE SE inició hace 10,000 años (ka) y constituye la fase cálida de la última glaciación. Las glaciaciones son ciclos climáticos que han tenido una duración de varias decenas de miles de años caracterizados por una fase cálida, llamada “intervalo interglacial”, y una fría o “intervalo glacial”.

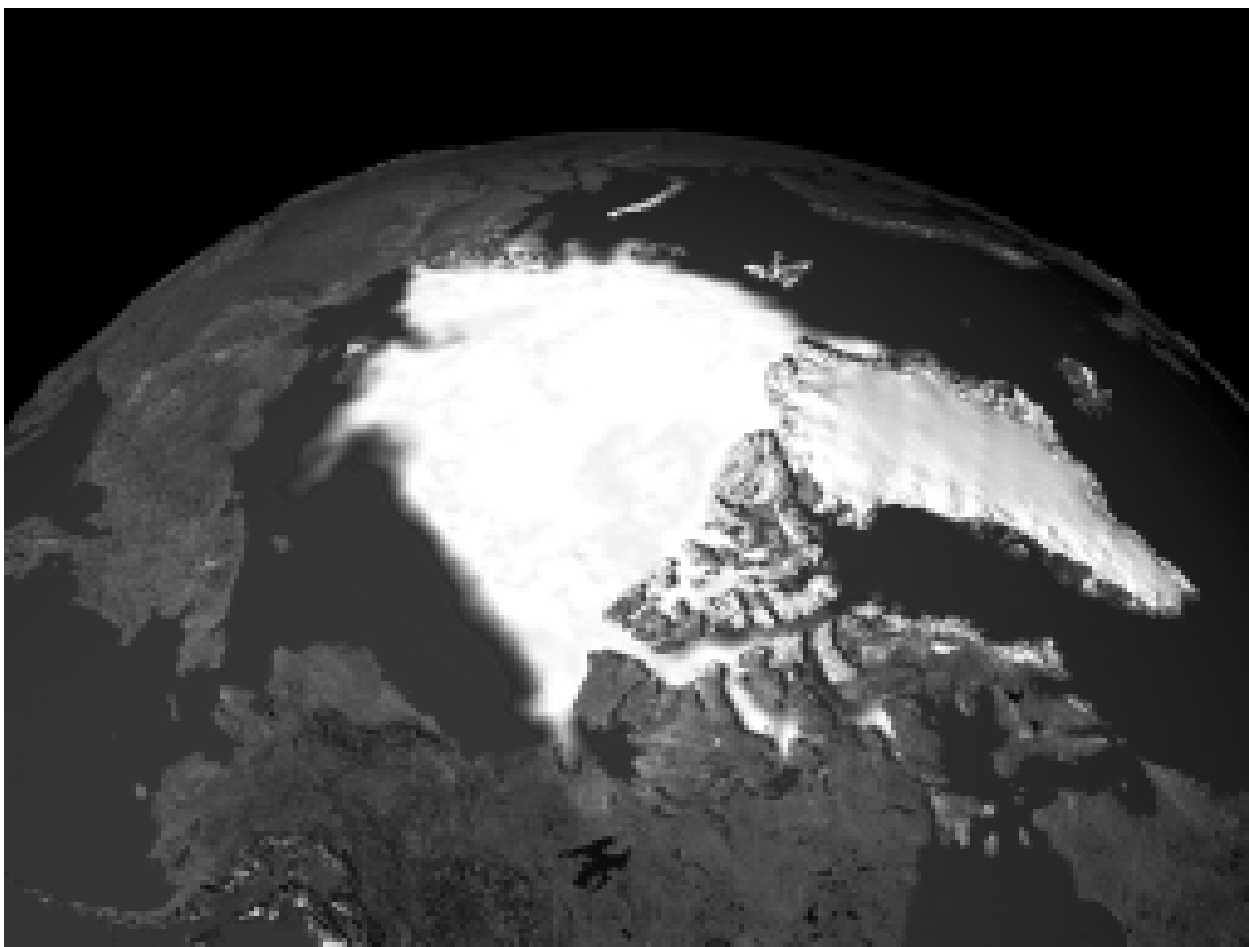
Durante el último periodo glacial, hace ~20 ka, grandes extensiones de América del Norte, Europa y Asia estaban cubiertas por casquetes de hielo de hasta cuatro kilómetros de altura (figura 1). Estos casquetes han desaparecido en su mayor parte, permaneciendo únicamente el que cubre Groenlandia, el cual tiene una altura promedio de 2.3 km. En los últimos dos millones de años (Ma) se han producido alrededor de treinta glaciaciones y tan sólo durante el 10% de ese tiempo la Tierra ha disfrutado de un clima interglacial como el actual. Estamos viviendo tiempos peculiares.

Descifrar la causa y los mecanismos que han regido la evolución del clima es uno de los mayores retos que enfrentamos los científicos y es una tarea revestida de especial interés a la luz del actual calentamiento global. La década de 1990 y los primeros años del siglo XXI han sido los más cálidos registrados instrumentalmente desde 1861 y documentados por reconstrucciones paleoclimáticas de los últimos 2 ka.¹

Todo parece indicar, como concuerdan expertos y sugieren varias líneas de evidencia, que este calentamiento está siendo desencadenado por la emisión antropogénica a la atmósfera de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero.² Más aún, en este trabajo presento información reciente que sugiere que el CO₂ atmosférico ha estado implicado en las glaciaciones y que incluso ha representado el principal conductor del clima tropical durante al menos los últimos 2 Ma.

En este espacio doy a conocer también algunas respuestas climáticas observadas relacionadas con nuestras emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, así como lo que nos anuncian las predicciones basadas en el registro paleoclimático y en estudios de modelación climática más recientes.

Martín Medina-Elizalde es investigador del programa de Ciencias Marítimas de la Universidad de California, en E.U.A.



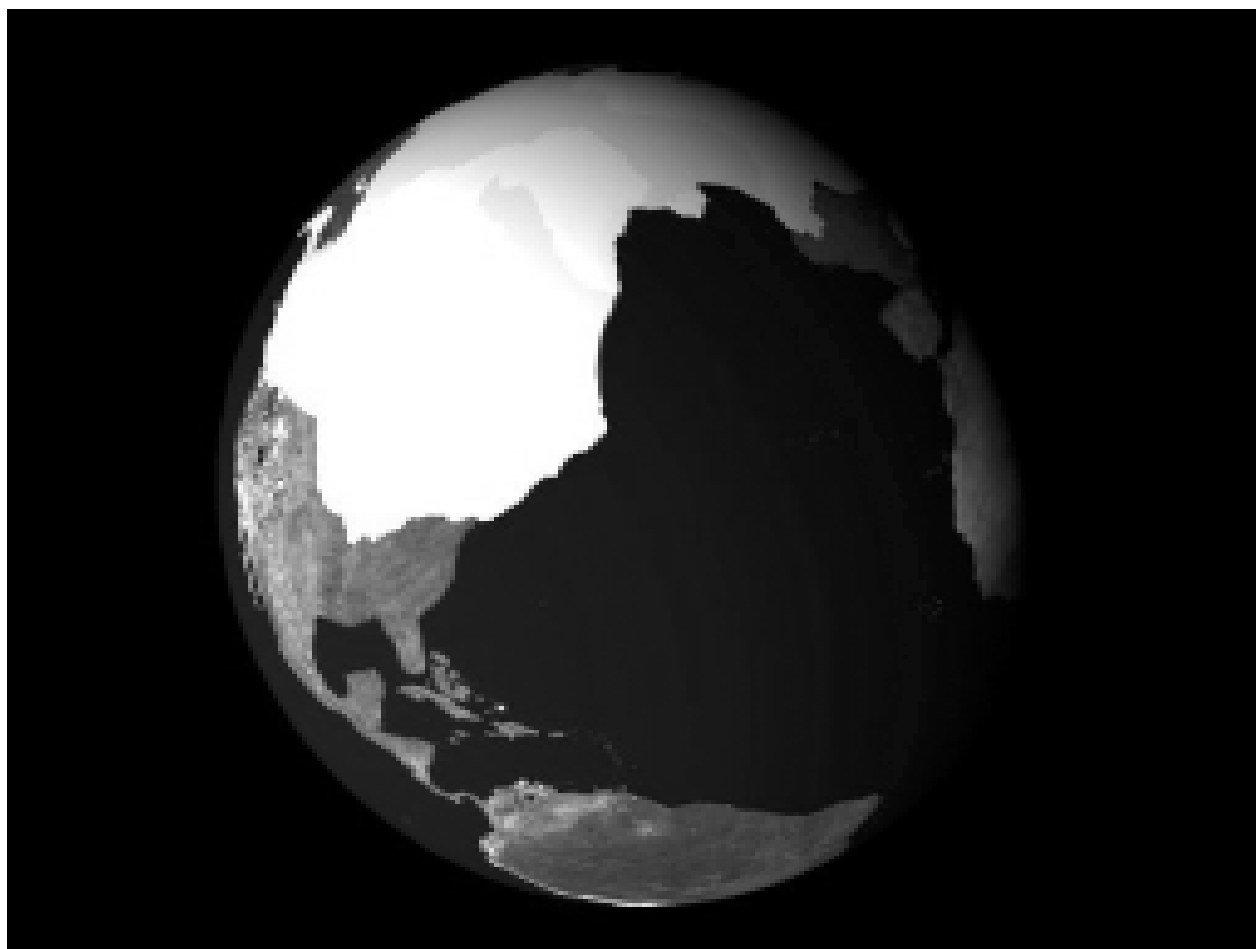
LOS REGISTROS PALEOCLIMÁTICOS DE ISÓTOPOS DE OXÍGENO ($D^{18}O$)

Una gran parte de lo que sabemos sobre magnitud, duración y periodicidad de las glaciaciones proviene de mediciones de isótopos de oxígeno en foraminíferos³ fósiles (fig. 2) extraídos de registros sedimentarios del fondo oceánico. La razón de dos isótopos de oxígeno, el ^{18}O y el ^{16}O , en un carbonato precipitado orgánicamente (e.g. por una almeja o un foraminífero) o inorgánicamente, disminuye al incrementarse la temperatura del agua en la cual el carbonato es precipitado.

Por cuestiones analíticas, la razón $^{18}O/^{16}O$ es denotada en referencia a un estándar, y en notación delta, por mil ($d^{18}O$).⁴ El cambio en

$d^{18}O$ es una función logarítmica de la temperatura con una pendiente, en un rango de temperaturas oceánicas de -2 a 30 °C, de entre -0.2 y -0.25% .⁵ El contenido de $d^{18}O$ de un foraminífero fósil no refleja únicamente la temperatura del agua en el momento de calcificación sino también la composición promedio oceánica de $d^{18}O$, la cual varía en función del volumen de hielo continental.⁶ En la figura 3 se presenta un registro de referencia de $d^{18}O$ producido a partir del análisis de foraminíferos bentónicos en registros sedimentarios extraídos en el Pacífico tropical este.

La variación de $d^{18}O$ en este registro refleja cambios en la composición oceánica de $d^{18}O$, principalmente, y en la temperatura del océano profundo. Este registro nos revela la ocurrencia



de alrededor de treinta glaciaciones en los últimos 2 Ma. La frecuencia de estos ciclos climáticos ha variado en el tiempo y representa la clave más importante para discernir la causa o los desencadenantes de las glaciaciones.

LA TEORÍA DE MILANKOVITCH Y LA FRECUENCIA DE LAS GLACIACIONES

La teoría formal que ha orientado las ideas, cual brújula apuntando siempre al norte, sobre la causa de las glaciaciones, es la planteada por el matemático serbio Milutin Milankovitch (1879-1958).

Su teoría, conocida como "Teoría astronómica de las edades de hielo", propone que las glaciaciones

son causadas por una disminución en la intensidad solar de verano en las altas latitudes del hemisferio norte, debido a las variaciones en los parámetros orbitales de la Tierra. Cuando la radiación de verano disminuye, pensó Milankovitch, ocasiona una disminución en el derretimiento del hielo y, por lo tanto, el balance anual de hielo se vuelve positivo, conduciendo a la expansión glacial.

El problema fundamental con esta propuesta es que predice que las glaciaciones deberían tener una periodicidad constante de 23 ka, ya que la radiación solar en verano ha variado con esta periodicidad durante los últimos 2 Ma.⁷ En tiempos de Milankovitch todavía no existían registros de isótopos de oxígeno ni depósitos glaciares fechados.

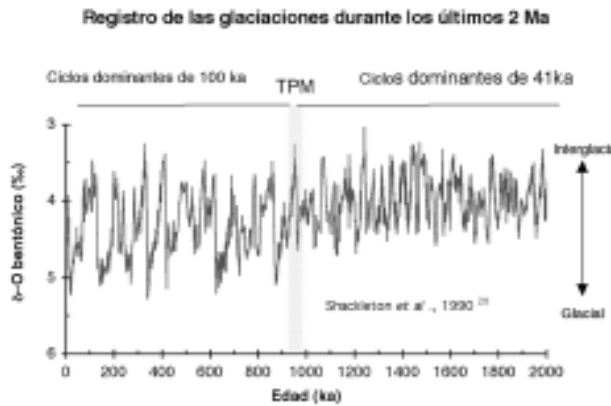


Fig. 3.

Los registros de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos disponibles en la actualidad sugieren que la periodicidad dominante de las glaciaciones (e.g. volumen de hielo, temperaturas oceánicas y atmosféricas) cambió de 41 ka, característica del Pleistoceno temprano, de 1.0 a 2.0 Ma antes del presente (a.p.), a ~100 ka durante el Pleistoceno medio y tardío (de 10 ka a 1 Ma a.p.). Esta transición en la periodicidad de las glaciaciones es conocida como “Transición del Pleistoceno medio (TPM).”

La teoría de Milankovitch ha sido reformulada actualmente para explicar la TPM. En la reciente formulación, sugerida por algunos científicos, las glaciaciones fueron moduladas por variaciones en la oblicuidad de la Tierra (periodo de 41 ka) durante el Pleistoceno temprano, y por el efecto de la excentricidad sobre la radiación solar de verano (periodo de 100 ka)⁷ después de la TPM. El problema fundamental de esta propuesta es que el efecto de la excentricidad sobre la radiación de verano es sumamente pequeño en comparación con la magnitud de los cambios de esta radiación en sí.

Más importante aún, reconstrucciones paleoclimáticas recientes han comenzado a girar la brújula, fija por tanto tiempo en el norte, hacia el sur, hacia las regiones tropicales del planeta.

Evolución de temperaturas superficiales del Pacífico ecuatorial occidental y oriental durante los últimos 450 ka

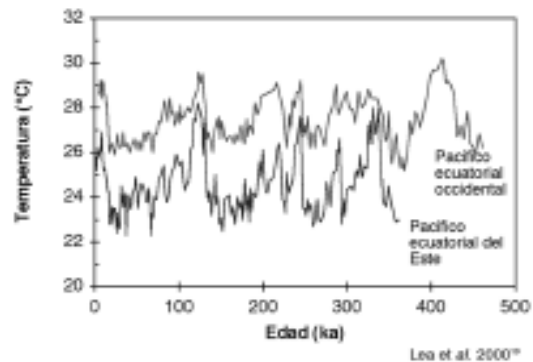


Fig. 4.

EL PAPEL DE LOS TRÓPICOS EN LAS GLACIACIONES

Hasta hace unos cuantos años era una idea generalizada entre los paleoclimatólogos que las zonas tropicales habían permanecido estables durante las glaciaciones, o experimentado una disminución en la temperatura, de 1 °C como máximo, debido al forzamiento radiativo⁸ negativo de los grandes casquetes polares asentados sobre los continentes, o a retroalimentaciones⁹ disparadas por este forzamiento.

Esta concepción estaba soportada por: 1. el hecho de que la evidencia más tangible de la existencia de las glaciaciones es encontrada en las altas latitudes de América del Norte y en Europa (e.g. depósitos sedimentarios dejados atrás por los glaciares), y 2. por el resultado de modelos que sugerían que los trópicos se habían mantenido cálidos durante el último máximo glacial hace 20 ka.

El desarrollo de la paleotermometría de Mg/Ca en foraminíferos ha revolucionado nuestro entendimiento del clima tropical durante los últimos 2 Ma. La paleotermometría de Mg/Ca se basa en la sustitución endotérmica del Ca por Mg en la calcita de foraminíferos, la cual es favorecida a altas temperaturas. Las ecuaciones de calibración obtenidas a partir de estudios de foraminíferos en vivo y de muestras superficiales de sedimento indican que hay un cambio exponencial en la razón molar de Mg/Ca de ~9% por grado Celsius.

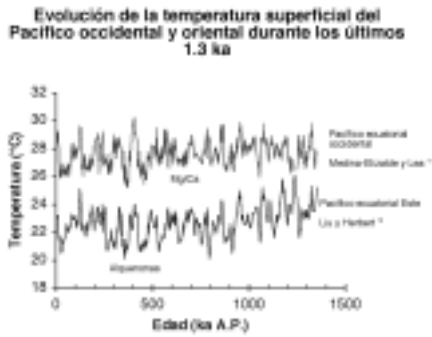


Fig. 5.

David Lea y Dorothy Pak, de la Universidad de California en Santa Barbara, y Howard Spero, de la Universidad de California en Davis, produjeron los primeros registros de paleotemperaturas de Mg/Ca¹⁰ (fig. 4). Lea y colaboradores reconstruyeron la evolución térmica del océano Pacífico ecuatorial oriental y occidental durante los últimos 450 ka a.p. y observaron que el Pacífico tropical participó en las glaciaciones experimentando una disminución de hasta 4 °C durante episodios glaciales. Sus resultados sobre el enfriamiento de los trópicos han sido confirmados en otras regiones tropicales del planeta en estudios posteriores.

Los modelos de circulación general (MCG), con forzamiento radiativo parametrizado para un escenario del último intervalo glacial, sugieren que el efecto radiativo de los glaciales no basta para enfriar las regiones cercanas al ecuador. La disminución de 4 °C en las temperaturas glaciares inferidas a partir de las reconstrucciones de Mg/Ca sugiere que los trópicos no han respondido al efecto directo de enfriamiento de las altas latitudes del hemisferio norte, como se pensaba anteriormente.

Sin embargo, siguiendo con un razonamiento “norte-centrista” de las glaciaciones, el enfriamiento tropical observado podría haber sido el resultado de retroalimentaciones disparadas en primera instancia por las oscilaciones climáticas de las altas latitudes.

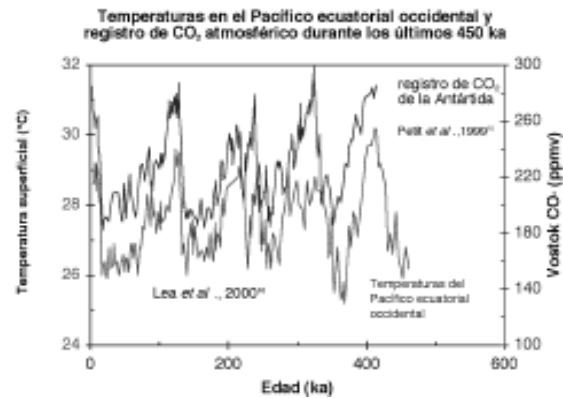


Fig. 6.

No obstante, esta idea es fuertemente cuestionada por reconstrucciones tropicales recientes, las cuales sugieren que los ciclos climáticos en los trópicos preceden a los cambios en el clima de las altas latitudes del hemisferio norte y que han respondido a otro factor: el CO₂ atmosférico.

LA TMP EN LOS TRÓPICOS OCURRIÓ ANTES

Medina y Lea¹¹ han publicado un registro de paleotemperaturas de Mg/Ca de la *warm pool* (piscina cálida) del Pacífico ecuatorial occidental (PEO) que se extiende hasta el Pleistoceno temprano (1.3 Ma a.p.), (fig. 5).

La *warm pool* del PEO es la región oceánica más cálida y térmicamente estable del planeta y es ideal para probar hipótesis que proponen mecanismos de variabilidad climática en los trópicos porque: 1. no está sujeta a influencias oceanográficas regionales, tales como cambios en la profundidad de la termoclina, los cuales controlan las temperaturas del Pacífico ecuatorial este (PEE); 2. se encuentra alejada de la influencia radiativa directa de los casquetes de hielo continental, y 3. responde más directamente al forzamiento radiativo de cambios atmosféricos de gases de efecto invernadero.

El registro de Medina y Lea indica que el PEO también experimentó un cambio en la periodici-

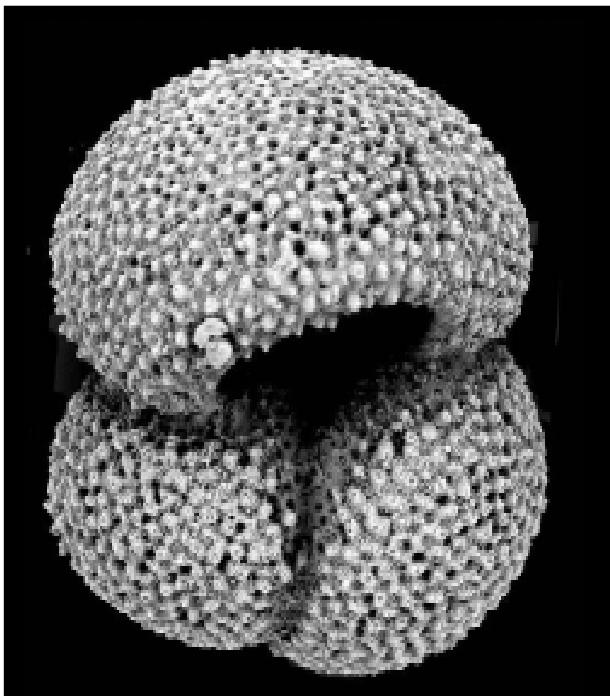


Figura 2. Foto de foraminífero planctónico de la especie *Globigerinoides ruber* utilizada en estudios de referencias 10 y 11, obtenida de:

dad dominante de 41 ka a ~100 ka durante la TPM, semejante a lo observado en las altas latitudes del hemisferio norte. Más aún, estos ciclos en la temperatura del PEO son sincrónicos y tienen una magnitud semejante (~3 - 4 °C) a los observados en el PEE (fig. 5).

La evolución térmica del PEE durante los últimos 1.8 Ma ha sido reconstruida por Zhonghui Liu y Timothy Herbert¹² de la Universidad de Brown, utilizando una técnica independiente: el índice de insaturación de alquenonas¹³. La medición de Mg/Ca y d¹⁸O, a partir del mismo grupo de foraminíferos, permite calcular la fase entre estas dos señales. Es decir, si el cambio en una de estas señales precede o no al de la otra.

Asumiendo que d¹⁸O en un foraminífero planctónico refleja predominantemente cambios en el volumen de hielo continental,¹⁴ los resultados de los cálculos de la fase entre Mg/Ca y d¹⁸O a partir del registro del PEO sugieren que los cambios en la temperatura suceden ~5 ka antes que los cambios en el volumen de hielo continental durante el Pleistoceno temprano y ~10 ka antes durante el Pleistoceno medio y tardío.

Esto indica que los trópicos comenzaron a calentarse/enfriarse varios miles de años antes que se observaran cambios en las altas latitudes del hemisferio norte. Esta precesión de las temperaturas tropicales sobre d¹⁸O ha sido documentada en diferentes estudios y es asunto de gran debate entre la comunidad científica por sus importantes implicaciones.

LA HIPÓTESIS DEL DIÓXIDO DE CARBONO

La presencia de ciclos de temperatura sincrónicos y con magnitud semejante en los dos extremos del Pacífico ecuatorial, y que preceden a los cambios en las altas latitudes, sugiere que esta variabilidad tiene una causa común: variaciones en el dióxido de carbono atmosférico.

Los registros de la concentración atmosférica de CO₂ y metano, obtenidos a partir del análisis de burbujas de aire atrapadas en el hielo de Antártica, así como el registro de temperaturas atmosféricas derivadas de la razón de isótopos de hidrógeno en el hielo, ofrecen apoyo adicional a la hipótesis del CO₂.

Estos registros, producidos por Petit y colaboradores,¹⁵ indican que los ciclos de los gases invernadero y de la temperatura sobre la Antártida se correlacionan fuertemente entre sí y son similares a los observados en las altas latitudes del hemisferio norte, lo cual indica una conexión causa-efecto entre los gases de efecto invernadero y la temperatura atmosférica. Más aún, la correlación entre estos registros y los de temperaturas del Pacífico tropical es notable (fig. 6).

Debo recordar que las temperaturas derivadas por Petit y colaboradores provienen del análisis de isótopos de hidrógeno en el hielo precipitado sobre la Antártida, mientras las temperaturas superficiales del agua son derivadas de la relación Mg/Ca presente en organismos planctónicos que habitan en los trópicos.

Finalmente, los seres humanos estamos realizando un experimento que está confirmando las inferencias a partir del registro paleoclimático:

estamos agregando gases de efecto invernadero a la atmósfera y al parecer el clima de la Tierra está respondiendo, como se esperaba.

EL CALENTAMIENTO GLOBAL

La temperatura promedio de la superficie de la Tierra ha aumentado ~ 0.5 °C a partir del comienzo del siglo xx; y en algunas regiones oceánicas las temperaturas han aumentado hasta 2 °C en los últimos 50 años. La variabilidad en las temperaturas globales de los últimos 2 ka se explica a partir de cambios en la intensidad solar o en la actividad volcánica. Sin embargo, el calentamiento global del último siglo es explicado principalmente por variaciones en la concentración atmosférica de CO_2 .

Una forma de estimar el efecto en el clima que tienen los cambios en la concentración de CO_2 es mediante el cálculo de la sensibilidad climática. La sensibilidad climática mide cuán fuertemente el sistema climático de la Tierra responde al duplicar la concentración de CO_2 atmosférico, y a menudo es expresada como el incremento de equilibrio en la temperatura global. Los cálculos disponibles de sensibilidad climática realizados partir de simulaciones computacionales y de reconstrucciones paleoclimáticas predicen un cambio de temperatura de equilibrio global de entre 2 y 11 °C, como resultado de doblar la concentración atmosférica de CO_2 respecto al nivel preindustrial de 280 ppmv.¹⁶ La concentración atmosférica de CO_2 en el año 2004 era de 377 ppmv; es decir, casi 70% del doble de la concentración atmosférica preindustrial (560 ppmv).

¿Por qué la Tierra se ha calentado tan sólo ~ 0.5 °C desde principios de siglo xx? Una posibilidad es que todavía no ha alcanzado la temperatura de equilibrio debido a un retraso en el tiempo de respuesta de las retroalimentaciones inducidas por el aumento del CO_2 atmosférico. El ejemplo más obvio es la lenta respuesta de los glaciares alpinos y del hielo sobre Groenlandia. Las predicciones indican que a la tasa de repliegue observada en la

actualidad, gran parte de los glaciares alpinos del mundo habrán desaparecido por completo dentro de unas décadas (e.g. el glacial del Kilimanjaro en África desaparecería en el 2020). De igual manera, el casquete de Groenlandia ha experimentado un deshielo neto anual durante la última década, como revelan estudios realizados por científicos de la NASA.¹⁷

La consecuencia de esta reducción en la extensión del hielo continental es la disminución en la reflexión de la energía solar que alcanza la superficie de la Tierra de regreso al espacio (i.e. albedo), lo que amplifica el calentamiento global. Otra posibilidad es que los aerosoles atmosféricos antropogénicos hayan contrarrestado el efecto de calentamiento en una medida potencialmente significativa. Pero los modelos predicen que este efecto disminuirá respecto al de los gases invernadero, debido a su vida más corta en la atmósfera.¹⁸

El nuevo estado del sistema climático podría no ser de nuestro agrado. Como consecuencia del calentamiento global el casquete de hielo sobre Groenlandia podría derretirse completamente ocasionando un aumento en el nivel del mar de hasta siete metros, inundando extensas regiones costeras del mundo como la Península de Florida, las costas actuales de la Península de Yucatán y muchas islas caribeñas.

Aun cuando no existen fundamentos teóricos para sospechar un aumento en la frecuencia de huracanes, provocados por el calentamiento de los océanos, los climatólogos modernos concuerdan en que este calentamiento ciertamente gestaría huracanes más intensos y con mayor precipitación. Una prueba clara de este fenómeno es la formación en el 2005 de los huracanes Katrina, Rita y Wilma, que alcanzaron la máxima intensidad en la escala Saffir-Simpson, y golpearon las costas de Estados Unidos y de México, ocasionando terribles pérdidas humanas y materiales.

En un estudio reciente sobre el huracán Katrina¹⁹ se encontró una relación estrecha entre la evolución de su intensidad y el patrón de tem-

peraturas superficiales en el Golfo de México. Katrina aumentó de categoría 3 a 5 al cruzar sobre aguas con temperaturas anormalmente cálidas (>29 °C) en el norte del Golfo de México.

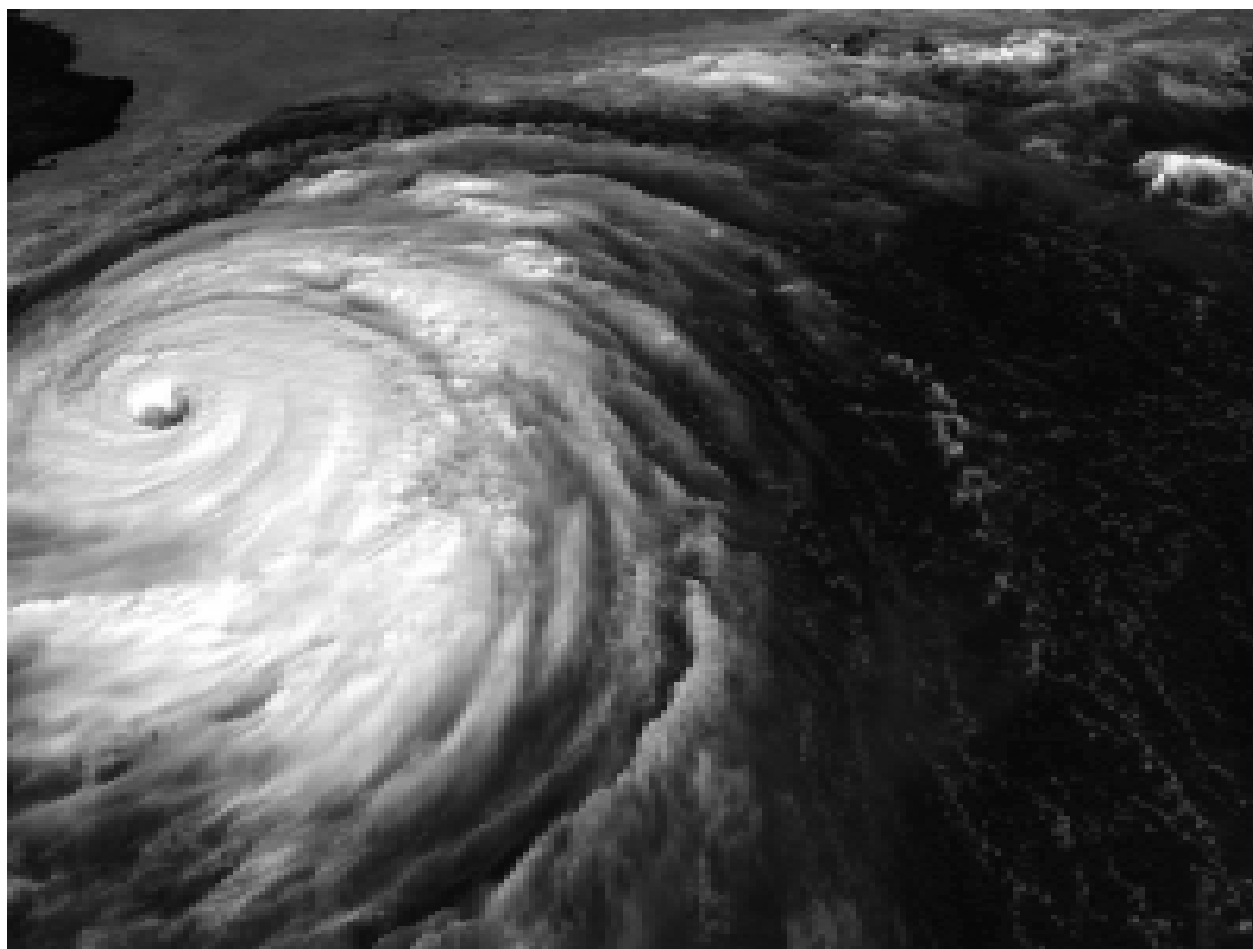
Por otra parte, la cantidad total de vapor de agua en la columna de aire se ha incrementado a una tasa de 1.3% por década. Como resultado de este aumento se pronostican eventos más severos de inundación y sequía, así como mayor precipitación asociada a huracanes. Este aumento se correlaciona fuertemente con las anomalías de temperaturas oceánicas observadas en las últimas dos décadas y concuerda con las predicciones teóricas (la presión de vapor se incrementa exponencialmente con la temperatura).

Es importante reconocer que el sistema climático de la Tierra ha amortiguado nuestras emisiones de gases invernadero a la atmósfera al secuestrar más de la mitad de estas emisiones en el océano profundo; de lo contrario, ya hubiéramos doblado los niveles preindustriales de CO₂ atmosférico. Sin embargo, el registro paleoclimático y los modelos climáticos recientes nos señalan que las perturbaciones modestas en la concentración atmosférica de gases invernadero pueden producir grandes impactos en el delicado sistema climático del planeta.

Las observaciones realizadas hasta la fecha sugieren que la respuesta del clima de la Tierra se agudizará en los próximos años. Esta emisión de gases a la atmósfera, en la que participamos todos, en mayor o menor grado, promete tener, como ya hemos comenzado a observar, fuertes implicaciones sociales, políticas y económicas en "el orden" global actual, como han admitido los líderes de varias naciones.

NOTAS Y REFERENCIAS

- ¹ M. E. Mann y P. D. Jones, *Geophys. Res. Lett.* 30, núm. 15, 2003.
- ² IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/
- ³ Los foraminíferos son microorganismos marinos que tienen una concha calcárea con orificios a través de los cuales se proyectan pseudópodos. Existen ejemplares planctónicos, que viven en la columna de agua, y bentónicos, que habitan en el sedimento del fondo marino.
- ⁴ $d^{18O} = [(^{18}O/^{16}O \text{ muestra}) / (^{18}O/^{16}O \text{ estándar})] \times 1000$
- ⁵ B. E. Bemis y otros, *Paleoceanography* 13, 150, 1998.
- ⁶ La composición oceánica de d¹⁸O cambia en el tiempo debido a que existe un fraccionamiento isotópico de oxígeno entre el agua y el vapor generado de ella. Durante la evaporación las moléculas de agua que contienen el isótopo más ligero se van preferentemente al estado gaseoso, y durante la precipitación el agua con el isótopo más pesado es llovido preferentemente. Como resultado, el vapor de agua al viajar de los trópicos a las altas latitudes se enriquece en el isótopo más ligero, fenómeno conocido como "destilación de Raleigh". Durante la inserción glacial esta humedad es precipitada como nieve y acumulada en forma de casquetes de hielo continental en las altas latitudes del hemisferio norte, secuestrando grandes cantidades de ¹⁶O y aumentando la cantidad relativa de ¹⁸O en el océano. Por este motivo, las variaciones en d¹⁸O de foraminíferos observadas a lo largo de un registro sedimentario reflejan cambios en el volumen de hielo continental.
- ⁷ La variación de la radiación de verano, calculada generalmente como la radiación cuando la Tierra tiene la configuración espacial de junio 21, ha variado en función del giro en el sentido de las manecillas del reloj, del eje norte-sur de la Tierra, conocido como "precesión" y con una periodicidad de 23 ka. Precesión tiene un efecto dominante en la cantidad de radiación estacional (e. g. de verano) que incide sobre una determinada latitud únicamente, debido al hecho de que la órbita de la Tierra alrededor del sol es excéntrica. Si fuera circular el efecto de precesión en la radiación estacional sería nulo. La excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol ha variado entre 0 y 5 % de elipticidad en ciclos dominantes de 100 ka. Existe otro parámetro orbital que afecta la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra, estacional y anualmente: la oblicuidad. La oblicuidad se refiere a la inclinación del eje de la Tierra respecto a una perpendicular a la eclíptica (plano entre el Sol y la Tierra). La oblicuidad ha variado entre ~22.5 y 24° con una periodicidad de 41 ka y es responsable de variaciones en la cantidad de radiación solar que llega a una determinada latitud anualmente. La oblicuidad también tiene un efecto sobre la radiación estacional en las altas latitudes, pero es modesto.
- ⁸ Forzamiento radiativo: Un cambio en el balance entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente. Sin forzamiento radiativo la radiación entrante a la Tierra continúa siendo igual a la infrarroja emitida por la Tierra. La adición de gases invernadero atrapa una fracción de la radiación infrarroja, reirradiándola de regreso a la superficie y creando una influencia de calentamiento (i. e. un forzamiento radiativo



positivo porque la radiación solar entrante excederá la saliente). Sin estos gases la temperatura promedio de la Tierra sería igual a 5 °C (sin considerar el albedo) en lugar de 15 °C, la cual es la temperatura promedio.

⁹ "Retroalimentaciones" son mecanismos que aumentan (positivas) o disminuyen (negativas) el efecto de cambio de uno de los factores que conducen al sistema climático. Como ejemplo: Un aumento en la temperatura de la atmósfera, como resultado de un incremento del CO₂ atmosférico, incrementa la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, el cual, al ser también un poderoso gas de efecto invernadero, contribuye a aumentar aún más la temperatura atmosférica.

¹⁰ D. Lea y otros, *Science* 289, 1719, 2000.

¹¹ M. Medina-Elizalde y D. Lea, *Science* 310, 1009, 2005.

¹² Z. Liu y T. Herbert, *Nature* 427, 720, 2004.

¹³ Esta técnica se basa en la dependencia en la temperatura de la razón de metilcetonas insaturadas de 37 carbonos con doble y triple enlace.

¹⁴ J. F. Adkins y otros, *Science* 298, 1769, 2002.

¹⁵ J. R. Petit y otros, *Nature* 399, 429, 1999.

¹⁶ D. A. Stainforth y otros, *Nature* 433, 403, 2005.

¹⁷ W. Krabill y otros, *Science* 289, 428, 2000.

¹⁸ M. O. Andrae y otros, *Nature* 435, 1187, 2005.

¹⁹ R. Scharroo, *EOS* 86, núm. 40, 2005.

²⁰ N. J. Shackleton y otros, *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.* 81, 251 1990.

Figura 1. Distribución de los glaciares en el hemisferio norte durante el

último máximo glacial, obtenida de: <http://www.johnstonsarchive.net/other/earthiceage.jpg>

ILUSTRACIONES

www.math.unifi.it

www.nasa.gov

www.concreteutopia.com

www.soton.ac.uk

