

## ORIGINAL

# UNA PERSPECTIVA TEMPORAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## A TIME PERSPECTIVE OF CLIMATE CHANGE

**Laia Alegret Badiola<sup>1</sup>**

1. Académica de número, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

### RESUMEN

Desde que comenzó el periodo industrial, las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de las actividades humanas han causado un cambio climático a gran escala. Sus efectos se han documentado con medidas directas de los parámetros que caracterizan el clima, como la temperatura, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, el viento o las precipitaciones. No obstante, el público recibe a menudo información errónea que arroja dudas sobre la realidad del cambio global causado por el hombre. Con el fin de desacreditar el “escepticismo” climático, es necesario evaluar el cambio climático en un contexto temporal amplio, pero las medidas instrumentales únicamente proporcionan series históricas de datos. Para períodos de tiempo de miles de años, las burbujas de aire atrapadas en el hielo ofrecen una medida directa de la concentración dióxido de carbono en la atmósfera, y la evolución del clima a lo largo de millones de años se infiere a partir de indicadores indirectos que se obtienen analizando las rocas sedimentarias y los fósiles. Los registros de los últimos 66 millones de años ponen de manifiesto la excepcionalidad del actual cambio climático, confirman la íntima relación que existe entre la temperatura y la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, y alertan sobre posibles puntos de no retorno. El registro geológico también revela la existencia de rápidos eventos de calentamiento superpuestos a las tendencias graduales del clima, que se estudian como análogos del actual cambio climático y permiten mejorar los modelos predictivos.

**Palabras clave:** Cambio global; gases invernadero; paleoclimatología; registro geológico; fósiles.

### ABSTRACT

Since the beginning of the industrial era, greenhouse gases emissions derived from human activities have caused large-scale climate change. Its effects are documented by direct measurements of parameters that characterize the climate, such as temperature, atmospheric carbon dioxide concentration, winds, or precipitation. However, the public often receives erroneous information that poses doubts about the man-caused global change. In order to debunk climate “scepticism,” climate change needs to be assessed over a long time frame, but instrumental measurements only provide historical data series. For time periods of thousands of years, air bubbles trapped in ice provide a direct measure of atmospheric carbon dioxide concentration, and climate evolution over millions of years is inferred from indirect indicators obtained by analyzing sedimentary rocks and fossils.

Records from the past 66 million years demonstrate the exceptional nature of the current climate change, they support the close relationship between temperature and atmospheric carbon dioxide concentration, and warn about possible non-returning points. The geological record also reveals the existence of rapid warming events superimposed on gradual climate trends, which are studied as analogues of current climate change and allow for improved predictive models.

**Keywords:** Global change; greenhouse gases; palaeoclimatology; geological record; fossils.

Correspondencia

Laia Alegret Badiola

Departamento de Ciencias de la Tierra (Facultad de Ciencias) e Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

E-mail: laia@unizar.es | Web: <https://personal.unizar.es/alegret/>



## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las muchas transformaciones a gran escala que se están produciendo en nuestro planeta desde el siglo XIX como consecuencia de las actividades humanas. Constituye uno de los grandes desafíos de nuestro tiempo, y ha pasado a ocupar un primer plano en foros científicos, políticos, económicos y sociales a nivel mundial. Las consecuencias del cambio climático son evidentes y los datos sobre su impacto a día de hoy son cada vez más contundentes, pero la circulación de bulos e información errónea alimentan el “escepticismo” climático.

En los últimos cuatro años se han batido récords de temperaturas en todos los continentes. Los fenómenos meteorológicos extremos como las lluvias torrenciales o las sequías, los cambios en las pautas meteorológicas, el aumento de la temperatura global, la disminución del hielo y el ascenso del nivel del mar, afectan a la salud global, aumentan las muertes por calor y por catástrofes, pandemias y enfermedades, amenazan la producción de alimentos, provocan migraciones de muchas especies, incluida la nuestra, y ya han causado ingentes pérdidas económicas (IPCC, 2023; Romanello et al., 2023).

El concepto de “cambio global” se refiere a este amplio conjunto de cambios y transformaciones, y para entender su excepcionalidad y plantear soluciones o mecanismos de mitigación y adaptación, es fundamental analizar sus causas y ponerlo en contexto. Un contexto temporal amplio, que permita compararlo no sólo con el clima que hemos experimentado a lo largo de nuestras vidas, o con el registrado en las series históricas, sino con los cambios climáticos que se han sucedido a lo largo de miles y millones de años, en épocas anteriores a la aparición de *Homo sapiens*. Sólo así podremos entender los mecanismos que regulan el clima global, comprender su naturaleza y sus ritmos de cambio, y discernir la señal antropogénica en épocas más recientes.

En este artículo se pretende abordar el cambio climático desde la perspectiva temporal que aporta el registro geológico y paleontológico, y mostrar cómo el estudio de la historia climática de nuestro planeta permite contextualizar el actual cambio global.

## CLIMA Y CAMBIO CLIMÁTICO

El clima representa el conjunto de condiciones atmosféricas de una región, y se caracteriza por elementos meteorológicos como la temperatura, la presión, la humedad, la precipitación o el viento. El clima global de nuestro planeta está ligado al “forzamiento radiativo” o forzamiento climático, que es la diferencia entre la energía solar absorbida por la Tierra (efecto invernadero) y la energía irradiada de vuelta al espacio (a través del albedo). Cuando se recibe más energía de la que se emite, el balance es positivo y se produce calentamiento, mientras que un balance negativo conlleva enfriamiento.

Aunque esta ecuación parece sencilla, el clima es un sistema complejo y su comportamiento es difícil de predecir, porque a las tendencias a largo plazo en la radiación solar o en los ritmos orbitales se suman fluctuaciones caóticas, resultantes de la interacción entre forzamientos, retroalimentaciones y moderadores. Las tres principales causas de la variación climática incluyen factores astronómicos, otros inherentes a nuestro propio planeta, y procesos relacionados con las actividades humanas. Entre los factores astronómicos, las variaciones de la órbita y el eje terrestres, o las manchas solares, determinan la cantidad de energía que llega desde el Sol y modulan el clima terrestre. Los procesos de nuestro planeta que influyen sobre el clima incluyen la deriva continental, la distribución de los continentes y océanos, las corrientes oceánicas, el volumen de hielo, la actividad volcánica y otras emisiones naturales de gases de efecto invernadero. Por último, las actividades humanas también tienen la capacidad de modificar el clima, por ejemplo a través de la deforestación, las emisiones de gases de efecto invernadero (como el dióxido de carbono, el metano o el óxido nitroso) o la modificación del albedo planetario, mediante la inyección de aerosoles en la atmósfera, cambios en el uso del suelo, o el depósito de partículas minúsculas de “carbono negro”, resultantes de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa. Las emisiones de dióxido de carbono o metano se deben principalmente a la quema de combustibles fósiles como carbón, gas natural o petróleo. También están ligadas a su transporte y fugas de las conducciones, a la fabricación del cemento, o a las actividades agrícolas y ganaderas. Las emisiones de metano a la atmósfera son inferiores a las de dióxido de carbono, pero el metano es un gas de efecto invernadero más potente y su capacidad para atrapar el calor en la atmósfera es 25



veces mayor, siendo responsable de más de un tercio del calentamiento antropogénico actual.

El clima actual está perfectamente documentado con mediciones instrumentales de los parámetros que caracterizan la atmósfera (temperatura, presión, precipitaciones, humedad, radiación solar, velocidad del viento, etc.) y el océano (temperatura, salinidad, estado químico de las aguas). El aumento en la concentración del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera es un componente del cambio climático global, y se ha medido de forma continua desde 1958 en el observatorio de Mauna Loa, en Hawái (Figura 1). Las

mediciones únicamente se detuvieron siete meses por la erupción del volcán Mauna Loa, a finales de 2022, y durante ese periodo de tiempo se obtuvieron en el observatorio cercano de Maunakea. La “Curva de Keeling” (Figura 1) debe su nombre a Charles David Keeling, químico estadounidense que inició la recopilación de datos y alertó sobre la posible contribución antropogénica al efecto invernadero y al calentamiento del planeta. La relación entre los gases de efecto invernadero y el aumento de temperatura ya había sido demostrada de forma experimental por Eunice Newton Foote en 1856, y en 1938 Guy S. Callendar identificó la quema de combustibles fósiles como la

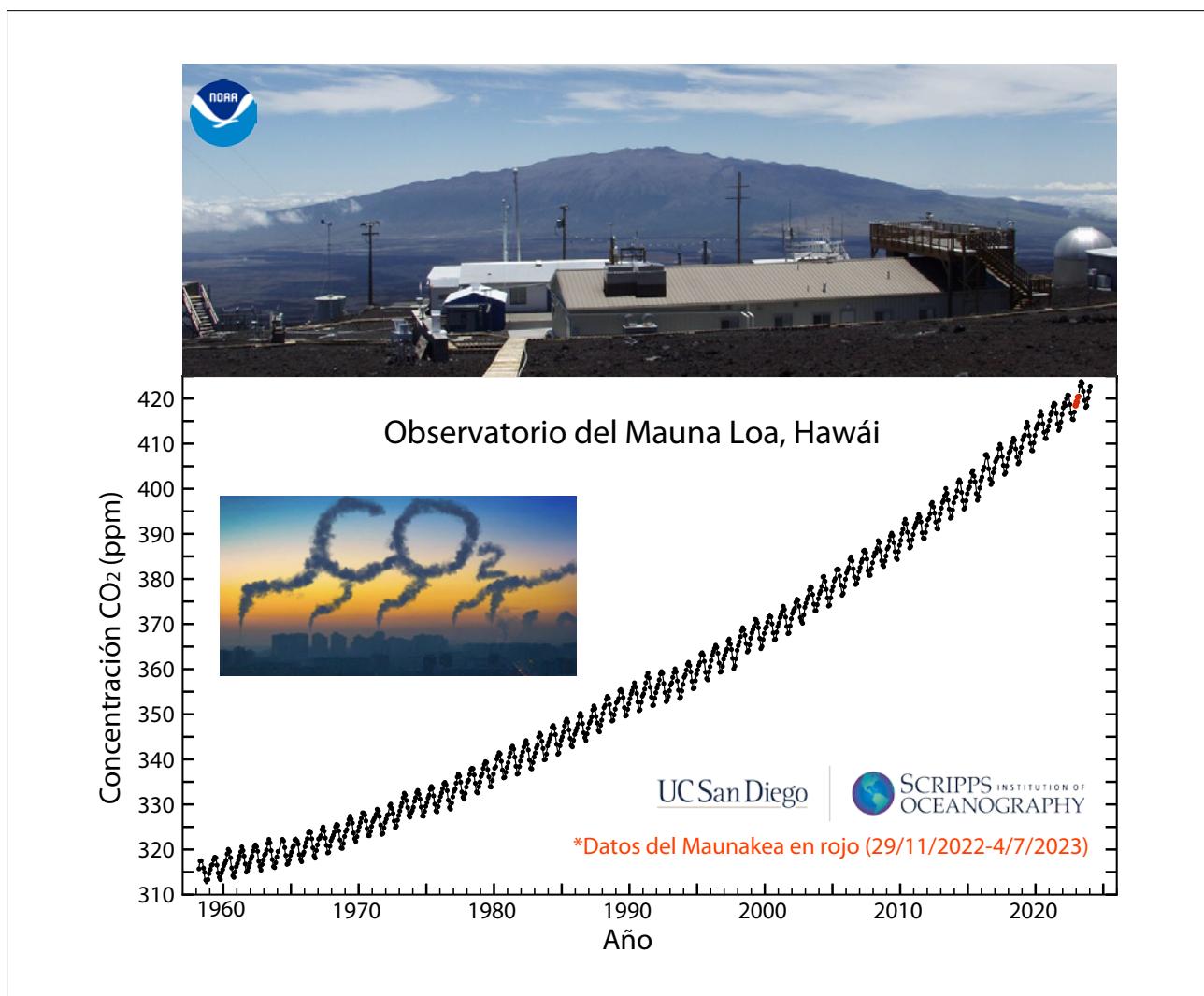


Figura 1. *Medidas instrumentales de la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico obtenidas diariamente desde 1958 en el observatorio de Mauna Loa (Hawái). La concentración de  $\text{CO}_2$  representa las medias mensuales, y se expresa en partes por millón de la fracción molar (ppm). La curva evidencia el rápido aumento del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, y su forma serrada se debe a las variaciones estacionales en la absorción o liberación de  $\text{CO}_2$  en el hemisferio Norte. Modificado de: Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego (Keeling y Keeling, 2017; Keeling et al., 2001).*



principal causa del calentamiento global. El trabajo de Keeling aportó la evidencia del rápido aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, y proporcionó la serie histórica más larga que existe de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico. La curva resultante muestra una tendencia ascendente desde 1958 hasta la actualidad, que se ha acelerado en los últimos años. En detalle, su forma serrada se debe a la basculación anual del hemisferio norte, acercándose al sol en verano y alejándose de él en invierno, que determina la absorción o liberación de CO<sub>2</sub> por los bosques caducifolios (Figura 1).

El aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante el periodo industrial ha ido ligado a un incremento en la temperatura de 1,4°C con res-

pecto a la media entre 1850 y 1900 (Figura 2). El calentamiento a comienzos del siglo XX coincide con un incremento en la radiación solar, mientras que el aumento en la temperatura global desde mediados del siglo XX se relaciona inequívocamente con el incremento en la concentración de gases invernadero de origen antropogénico (IPCC, 2007) (Figura 2). La interrupción del calentamiento global entre 1940 y 1975 ha sido objeto de debate, y se ha relacionado con las emisiones masivas de aerosoles tras la Segunda Guerra Mundial, que provocaron un rápido forzamiento climático hasta que se tomaron medidas para limitar estas emisiones por sus efectos nocivos para la salud (Martín-Chivelet, 2016).

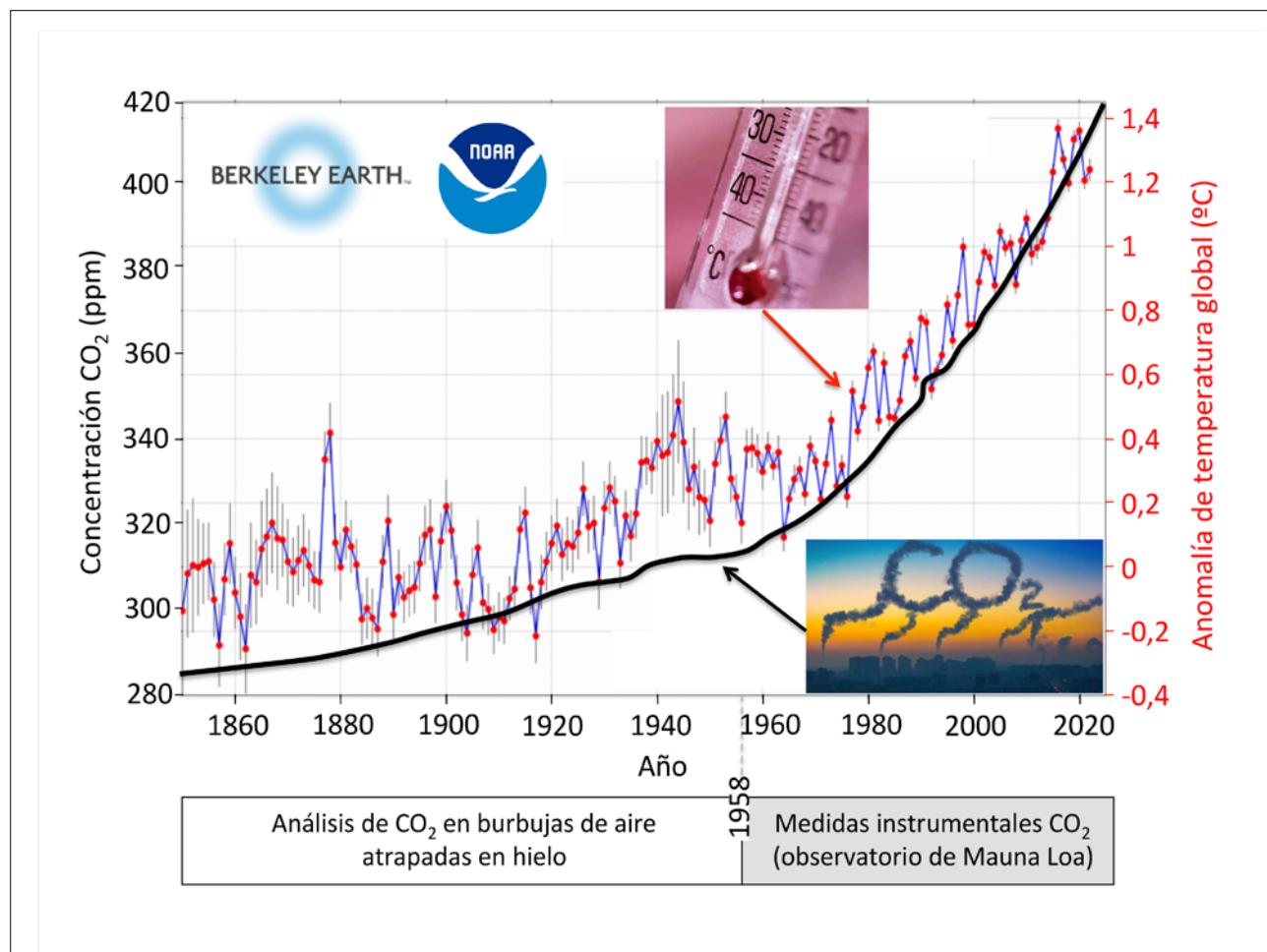


Figura 2. Anomalía global de temperatura relativa a la media 1850-1900 (puntos rojos, media en azul), y concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (en negro, media anual expresada en partes por millón de la fracción molar, ppm). Los datos muestran la íntima relación entre el aumento en los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante el periodo industrial y el incremento en la temperatura. Figura de anomalía de temperatura modificada de [www.berkeleyearth.org](http://www.berkeleyearth.org), añadiendo datos de CO<sub>2</sub> atmosférico de la curva Keeling desde 1958, y procedentes de análisis de las burbujas de aire atrapadas en el hielo para los años previos (NOAA Global Monitoring Laboratory).



Una vez liberado, el CO<sub>2</sub> permanece en la atmósfera y en los océanos durante miles de años, por lo que la acumulación de emisiones ejerce un papel decisivo en los cambios climáticos forzados por el CO<sub>2</sub>.

### ¿FORMA PARTE DE LA VARIABILIDAD NATURAL DEL PLANETA?

Debido a que los gases de efecto invernadero permanecen en la atmósfera durante miles de años, las series históricas no son suficientes para entender la evolución del clima. Es necesario un contexto temporal más amplio, a lo largo de miles y millones de años, en épocas anteriores a *Homo sapiens*. Sólo así podremos responder a la pregunta de si el actual cambio climático forma parte de la variabilidad natural del planeta.

La Paleoclimatología es una ciencia multidisciplinar que estudia el clima del pasado, sus variaciones y sus causas. Los cambios a escala geológica de los factores que determinan el clima actual, como la energía de la radiación solar, la situación astronómica, los movimientos planetarios, el relieve y la distribución de continentes y océanos, o la composición y dinámica de la atmósfera, constituyen los factores más utilizados en la deducción de los climas del pasado. Los registros paleoclimáticos aportan información del clima del pasado, que aparece recogida en archivos como el sedimento, las rocas, los fósiles, las estalagmitas de las cuevas, los anillos de los árboles, o el hielo acumulado en los glaciares.

La curva Keeling proporciona un registro continuo del CO<sub>2</sub> atmosférico desde el año 1958, y los datos previos a estos registros instrumentales requieren estudios paleoclimáticos. En concreto, para un

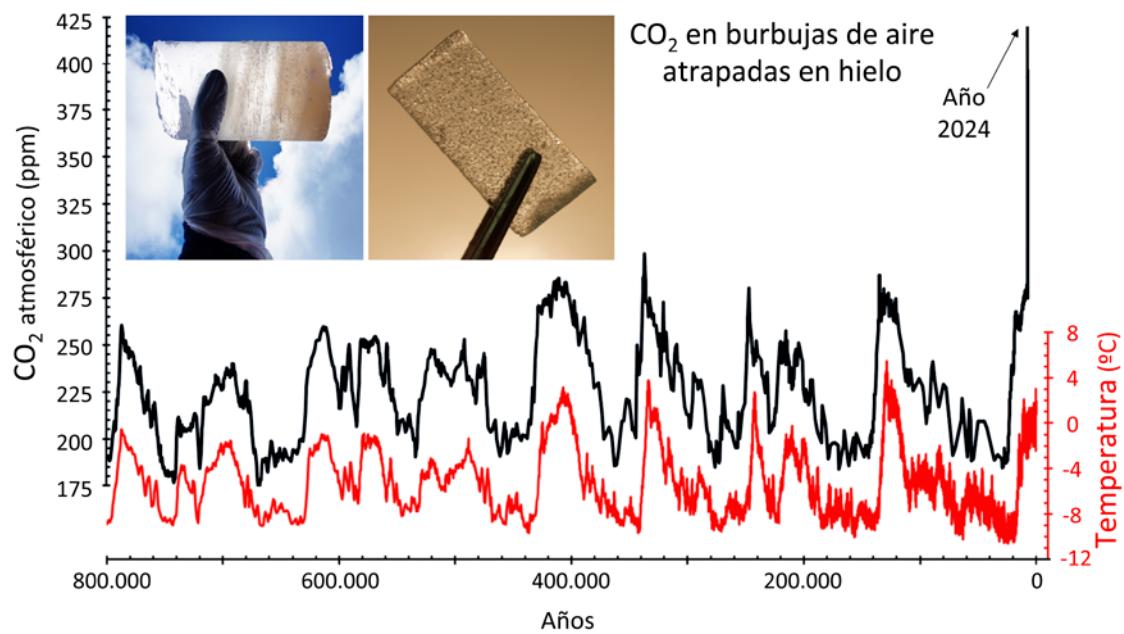


Figura 3. Concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante los últimos 800.000 años medida en las burbujas de aire atrapadas en hielo (en negro, expresada en partes por millón, ppm), y diferencia de temperatura comparada con la media de los últimos 1000 años (en rojo, expresada en grados centígrados, °C) para el mismo intervalo. El año "cero" corresponde al año 2020. Datos procedentes de [http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/domec/domec\\_epica\\_data.html](http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/domec/domec_epica_data.html) para los registros de hielo de la Antártida, de NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>) para las medidas actuales de dióxido de carbono, y de NASA ([http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v3/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/)) para la temperatura actual. Modificado de Lüthi et al. (2008). Se observa cómo la concentración actual de CO<sub>2</sub> en la atmósfera sobrepasa ampliamente la variabilidad natural del planeta de los últimos 800.000 años, y que en la actualidad se están registrando las temperaturas globales más cálidas de los últimos 100.000 años.



intervalo de miles o cientos de miles años, cuando no existían instrumentos para medir los parámetros del clima (termómetros, pluviómetros, barómetros, anemómetros, etc.), la única medida directa de la composición de la atmósfera la proporcionan las pequeñas burbujas de aire que quedaron atrapadas en la nieve (y posteriormente en el hielo) en los polos y en otras regiones donde la nieve nunca se funde. El análisis de la concentración de CO<sub>2</sub> en estas burbujas es por tanto una medida directa de las condiciones del pasado. Así, el hielo glacial aporta un registro de la composición de la atmósfera a lo largo de cientos de miles de años.

Los análisis del aire atrapado en las burbujas de testigos de hielo de la Antártida muestran que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha variado de forma cíclica a lo largo de los últimos 800.000 años, observándose picos mínimos y máximos asociados a las épocas glaciares e interglaciares, respectivamente (Figura 3). La principal causa de los ciclos glaciares e interglaciares son las variaciones en la órbita de la Tierra alrededor del Sol asociadas a los ciclos de Milankovitch, que determinan la luz solar que llega a nuestro planeta. No obstante, la magnitud total de los cambios de temperatura y volumen de hielo glacial-interglacial requiere tener en cuenta, además, los cambios en la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico y las retroalimentaciones climáticas asociadas (Masson-Delmotte et al., 2013).

Los valores máximos de CO<sub>2</sub> en la atmósfera alcanzados durante las épocas interglaciares de los últimos 800.000 años no han superado las 300 partes por millón (ppm), pero a partir de la revolución industrial se observa un aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico, que crece a un ritmo aún mayor desde la Segunda Guerra Mundial hasta alcanzar los valores actuales (Figura 3). Estos valores, y la concentración de otros gases de efecto invernadero como el metano o el óxido nítrico, sobrepasan claramente la variabilidad natural del planeta durante los ciclos glaciares e interglaciares de los últimos 800.000 años. Debido a su importante efecto invernadero, estos cambios han condicionado la temperatura del planeta, y en la actualidad se están registrando las temperaturas globales más cálidas de los últimos 100.000 años (Figura 3).

En detalle, a lo largo de los últimos 5.000 años se registra una tendencia natural de enfriamiento relacionada con factores orbitales, que persistió hasta el siglo XIX (Masson-Delmotte et al., 2013) y fue revertida por el calentamiento medio anual desde el siglo XX. Las reconstrucciones de la temperatura a

escala continental muestran que durante la Anomalía Climática Medieval (años 950 a 1250) se produjeron períodos de varias décadas en los que algunas regiones fueron tan cálidas como a mediados y finales del siglo XX. Sin embargo, estos períodos cálidos regionales no fueron tan sincrónicos entre regiones como el calentamiento desde mediados del siglo XX. Las reconstrucciones climáticas y las simulaciones de los modelos indican que los cambios de temperatura entre la Anomalía Climática Medieval y la Pequeña Edad de Hielo (1450 a 1850) se debieron a una combinación de forzamiento orbital, solar y volcánico, y variabilidad interna (Masson-Delmotte et al., 2013).

Las medidas instrumentales del CO<sub>2</sub> atmosférico desde el periodo industrial reflejan un aumento tan rápido y de tal magnitud que únicamente puede ser atribuido a la acción antropogénica (ej., IPCC 2007), no siendo posible justificarlo mediante otros factores que afectan al clima. La antigua concepción de que los efectos de la actividad humana eran insignificantes frente a las fuerzas naturales que controlan el clima, ha cambiado radicalmente ante las evidencias del aumento de gases de efecto invernadero desde finales del siglo XVIII, cuyo impacto en la composición química de la atmósfera y en los ciclos biogeoquímicos del planeta se hizo evidente a mediados del siglo XX (Cearreta, 2021). La actividades humanas han conducido a la Tierra a una fase nueva de su historia geológica, conocida informalmente como el Antropoceno, modificando la trayectoria de muchos procesos clave como por ejemplo las tasas de extinción, la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, calentamiento, ascenso del nivel del mar, o acidificación de los océanos (Cearreta, 2021).

Para ampliar aún más el contexto temporal de estos cambios, se estudian las rocas y los sedimentos que se depositaron hace millones de años, y los fósiles que contienen, que son indicadores indirectos del clima del pasado. Así, la Paleontología y la Geología permiten poner en contexto el actual cambio global, y entender su excepcionalidad. Los fósiles marinos de tamaño microscópico son especialmente útiles para estudiar el clima del pasado, porque son muy abundantes y fáciles de encontrar y permiten hacer estudios cuantitativos y estadísticos de sus poblaciones, además de análisis geoquímicos en sus caparazones. Entre los microfósiles marinos, destacan los foraminíferos (Figura 4), un filum de protozoos que protegen su única célula mediante una concha que puede estar formada por una única cámara, o por varias que se conectan entre sí a través de un orificio interno

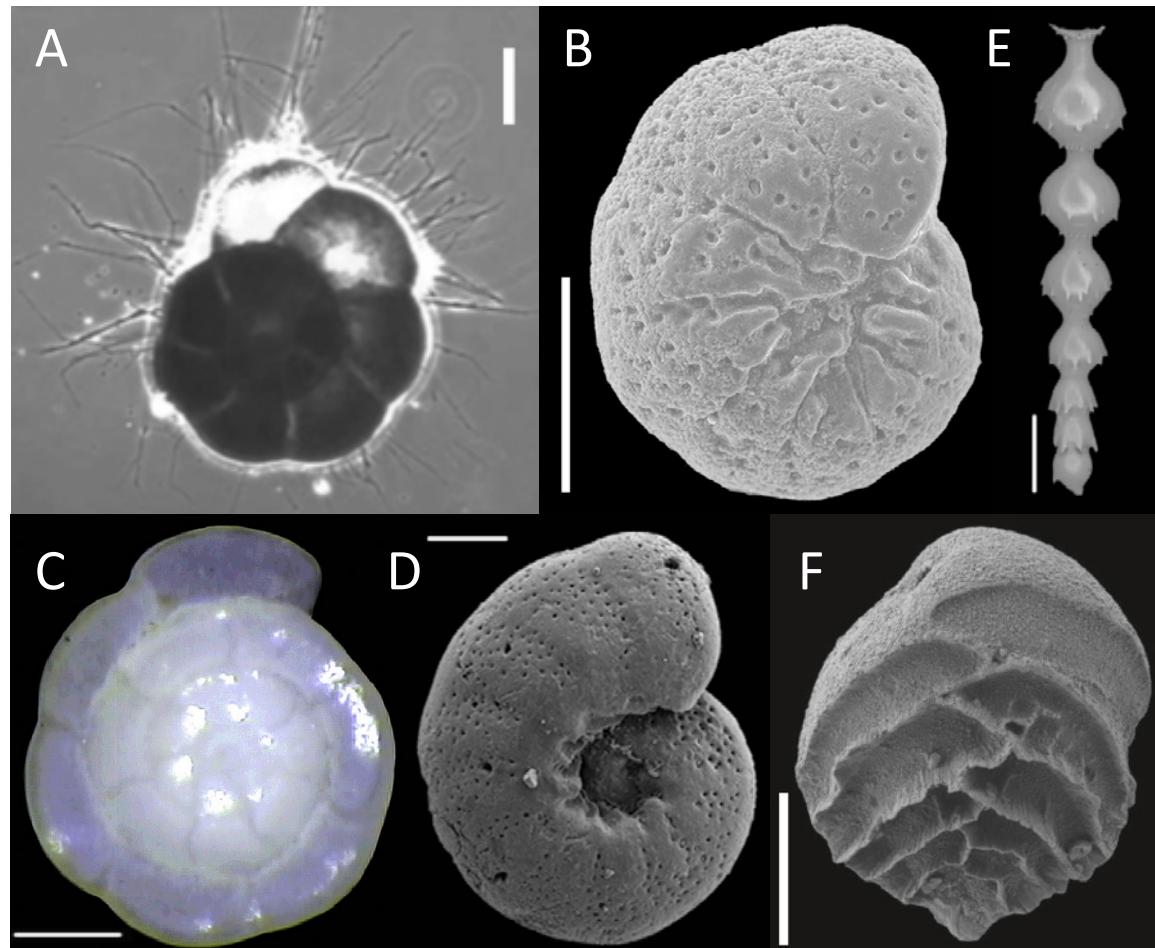


Figura 4. Foraminíferos bentónicos actuales (A) y fósiles (B-F) de distintas morfologías. (A) Se observan las distintas cámaras de la concha espiralada, y los pseudópodos extendidos hacia el exterior (*Ammonia tepida*). Fuente: J. P. Debenay). (B-D) Foraminíferos bentónicos de conchas espiraladas, sus caparazones muestran perforaciones a través de las cuales extendían los pseudópodos. (E) Foraminífero bentónico uniseriado. (F) Foraminífero bentónico biseriado. Las escalas equivalen a 100 micras.

llamado foramen, y que da nombre al grupo. A través de pequeñas perforaciones de la concha, extienden sus pseudópodos para desplazarse, alimentarse, y relacionarse con el medio. En cuanto a su modo de vida, se diferencian los foraminíferos planctónicos, que flotan en la columna de agua, y los bentónicos, que viven en el fondo marino. Los foraminíferos bentónicos ocupan el mayor hábitat del planeta, los fondos marinos, en todas sus profundidades y latitudes, son indicativos de cambios globales y constituyen el grupo estrella en estudios paleoclimáticos (Alegret et al., 2021). El análisis geoquímico de las conchas de

los foraminíferos bentónicos permite reconstruir la temperatura global de hace millones de años (Figura 5), aportando el contexto temporal necesario para evaluar el actual cambio climático. Al igual que en épocas recientes, las temperaturas inferidas a partir de foraminíferos bentónicos para los últimos 66 millones de años muestran que la temperatura global va íntimamente ligada a la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico (Figura 5). Entre hace 66 y 34 millones de años, las elevadas temperaturas y la alta concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera caracterizaron un “Planeta Cálido” e incluso un “Planeta Invernadero”, en el

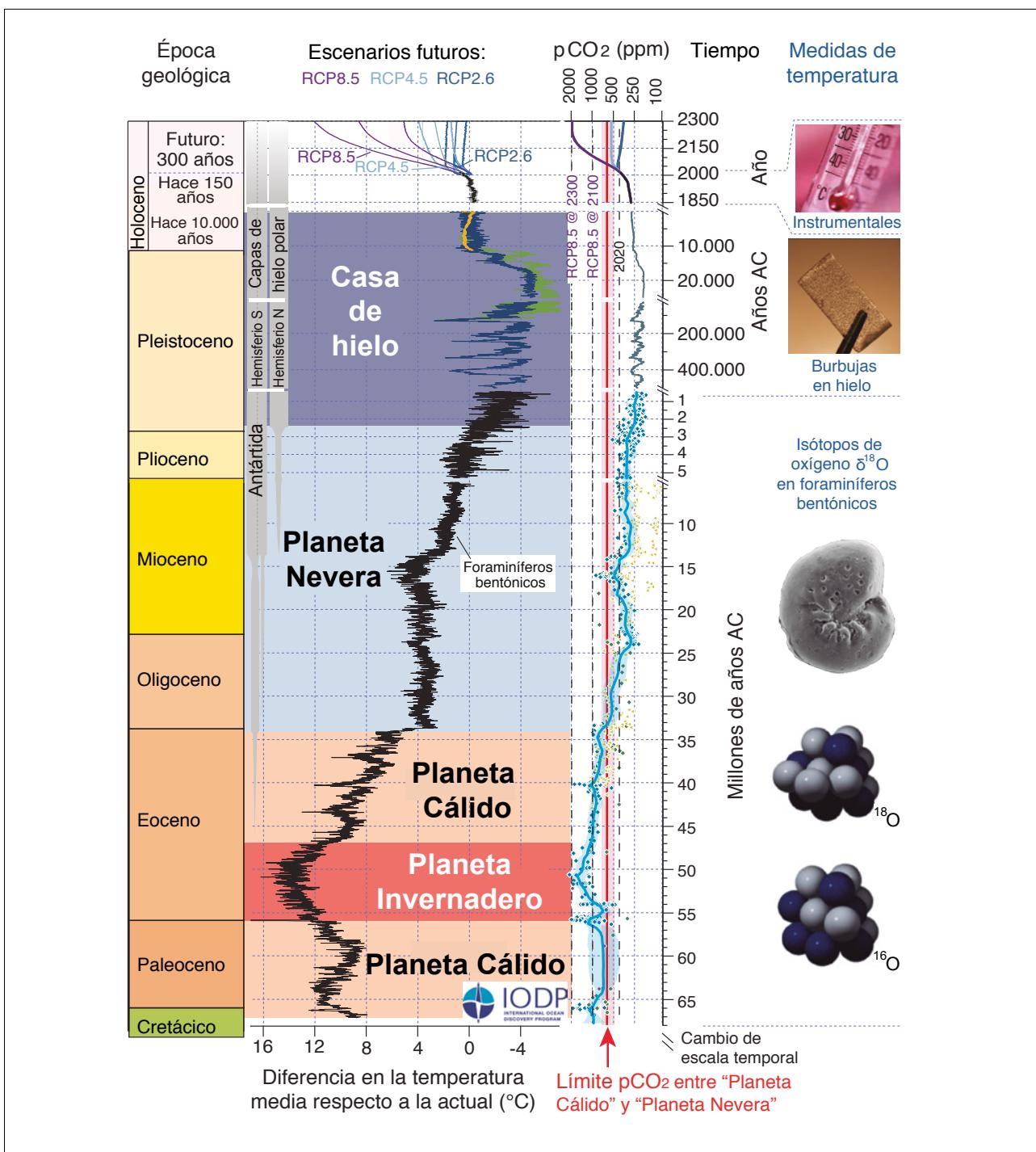


Figura 5. Variaciones en la temperatura y en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico para los últimos 67 millones de años, y proyecciones para los próximos 300 años. El nivel actual de CO<sub>2</sub> atmosférico es el mayor registrado en los últimos 2 millones de años, y está muy cerca de alcanzar el nivel (línea roja) que marca la diferencia entre un "Planeta Nevera" y un "Planeta Cálido" o "Invernadero". Fuentes de los datos de temperatura: entre 70 y 0,5 millones de años, isótopos de oxígeno medidos en conchas de foraminíferos bentónicos; entre 800.000 años y el año 0, burbujas atrapadas en hielo (proyectos EPICA y NGRIP, y Marcott et al. 2013); hace 150 años, medidas instrumentales HadCRUT4. Curvas de temperatura y pCO<sub>2</sub> cedidas por Thomas Westerhold; los cambios relativos en la temperatura del pasado se han convertido a diferencias de temperatura con respecto a la actualidad. Las proyecciones para el año 2300 muestran tres escenarios futuros de temperatura global (Palmer et al., 2018) en función de tres vías de concentración de CO<sub>2</sub> (RCP). Las barras grises marcan estimaciones del volumen de hielo en cada hemisferio. AC: Antes de Cristo.



que no había capas de hielo permanente, y se alcanzaron temperaturas de hasta 16 °C por encima de la media actual. El enfriamiento progresivo dio paso a un planeta más fresco o "Planeta Nevera" a partir de 34 millones de años, cuando comenzaron a aparecer capas de hielo permanente. El descenso en el CO<sub>2</sub> atmosférico y en la temperatura global desde hace 2 millones de años dio paso a un planeta aún más frío, denominado "Casa de Hielo", en el que se alternan los ciclos glaciares e interglaciares.

Esta serie temporal larga muestra que el nivel actual de CO<sub>2</sub> atmosférico es el mayor registrado en los últimos 2 millones de años, y que estamos muy cerca de alcanzar el nivel de CO<sub>2</sub> que marca la diferencia entre un "Planeta Nevera" y un "Planeta Cálido" o "Planeta Invernadero" (Figura 5).

### MIRANDO AL PASADO PARA ENTENDER EL FUTURO: LOS EVENTOS HIPERTERMALES

El estudio del clima de hace entre 66 y 34 millones de años cobra por tanto especial relevancia, porque constituye un excelente ejemplo geológico en el que las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico fueron muy similares a las que vamos a alcanzar en breve según las simulaciones (Figura 5). Además, este intervalo de tiempo resulta especialmente interesante porque incluye varios eventos rápidos de calentamiento que se superponen a los cambios graduales en el clima. Estos eventos tuvieron lugar durante el Paleoceno y el Eoceno y se conocen como eventos hipertermales (Figura 6). Cada uno presenta una distinta magnitud y velocidad, y su estudio permite calibrar y conocer mejor el actual cambio climático.

Las temperaturas más elevadas de los últimos 66 millones de años se alcanzaron en el límite entre el Paleoceno y el Eoceno (hace 56 millones de años), momento en el que se registra el mayor de los hipertermales. Conocido como el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, este evento se relaciona con la emisión de gases invernadero a través de diversos mecanismos naturales, que causaron un aumento de unos 6°C en la temperatura global (Figura 6). Las fuentes más plausibles incluyen dióxido de carbono procedente de los volcanes y del permafrost, metano (procedente de los hidratos del metano almacenados en los márgenes continentales, y metano termogénico), y C<sup>12</sup> liberado por la quema de turba y carbón y

por la oxidación de la materia orgánica continental. Los mecanismos concretos que provocaron la liberación de grandes cantidades de carbono (C<sup>12</sup>) al océano y a la atmósfera son objeto de debate (Dunkley Jones et al., 2013). La intensa actividad volcánica en el Atlántico Norte debió de contribuir, liberando CO<sub>2</sub>, elevando la temperatura en altas latitudes, cambiando las corrientes oceánicas y provocando la desestabilización de los hidratos del metano almacenados en los márgenes continentales, que a su vez contribuyeron al efecto invernadero y a un sucesivo calentamiento de los océanos. Además del calentamiento global de todo el planeta (en todas las latitudes y profundidades, incluidos los fondos oceánicos), los ciclos del carbono e hidrológico se vieron intensamente afectados, y provocaron fenómenos meteorológicos extremos. En algunas regiones oceánicas se registra una disminución de la oxigenación de las aguas o disolución de carbonatos profundos (Thomas, 2007; Alegret et al., 2021). La retroalimentación del proceso forzó el sistema como una goma elástica hasta que se rompió, alcanzando un punto de no retorno que instauró un nuevo escenario climático durante más de nueve millones de años: el "Planeta Invernadero", sin capas de hielo permanentes y con las temperaturas más elevadas de los últimos 66 millones de años.

Durante el hipertermal del Paleoceno-Eoceno, muchas especies marinas y terrestres evolucionaron y migraron a altas latitudes, y en el Ártico se han encontrado fauna y flora típicamente tropicales, como cocodrilos, nenúfares, tortugas y palmeras (Figura 7). Por el contrario, los foraminíferos bentónicos que vivían en los fondos oceánicos sufrieron extinciones (Alegret et al., 2021), al igual que los corales y algas en los arrecifes.

Resulta interesante comparar el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno con el actual cambio climático. La liberación gases de efecto invernadero durante el hipertermal del Paleoceno-Eoceno se produjo de forma lenta, a lo largo de unos 6.000 años, mientras que en la actualidad se está liberando un mayor volumen de gases y de forma mucho más rápida (Figura 8). La velocidad de emisión de gases de efecto invernadero resulta crítica porque tiene consecuencias en la geoquímica de los océanos. En la actualidad el sistema no tiene tiempo para adaptarse, y los modelos predicen un descenso en el pH de las aguas superficiales y acidificación oceánica. Estos procesos ya se están empezando a observar en la actualidad. La acidificación de las aguas superficiales está afectando a invertebrados marinos, que son la base de la cadena alimentaria de muchos peces, comprometiendo la cantidad y calidad nutricio-

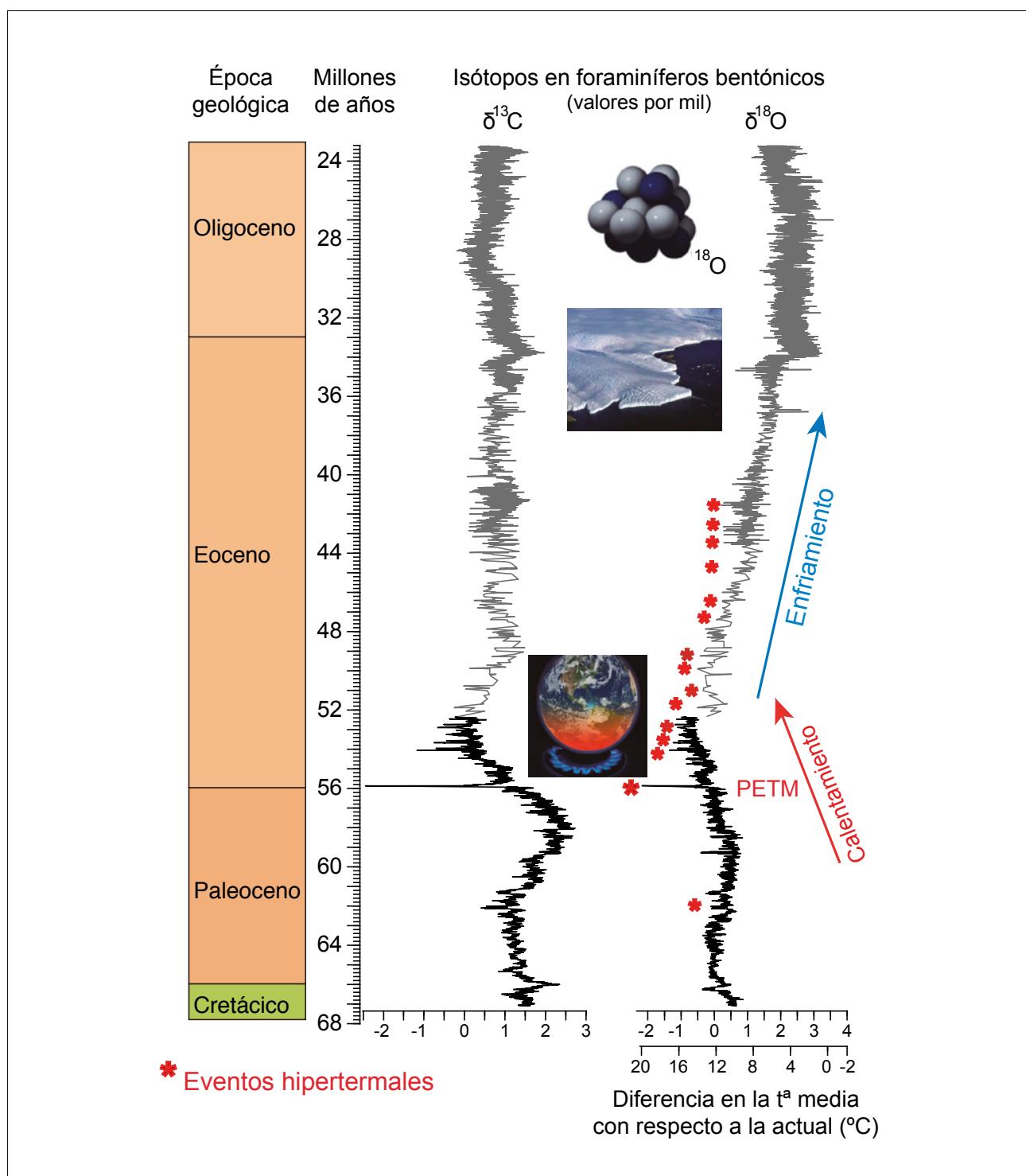


Figura 6. Variaciones en los isótopos estables de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) medidos en foraminíferos bentónicos entre hace 23 y 67 millones de años. El  $\delta^{13}\text{C}$  mide la relación entre los isótopos  $^{13}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$  en foraminíferos, con respecto a un estándar, y el  $\delta^{18}\text{O}$  mide la relación entre los isótopos  $^{18}\text{O}$  y  $^{16}\text{O}$  en foraminíferos, con respecto a un estándar; representan cambios en el ciclo del carbono y en la temperatura, respectivamente. Durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM) se observa cómo el calentamiento va ligado a alteraciones del ciclo del carbono (a través de la liberación de gases de efecto invernadero). Los asteriscos rojos señalan los rápidos eventos de calentamiento (hipertermiales) que se superponen a los cambios graduales en la temperatura global (indicados con flechas: calentamiento en rojo y enfriamiento en azul). Modificado de Alegret et al. (2021).

## Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM)

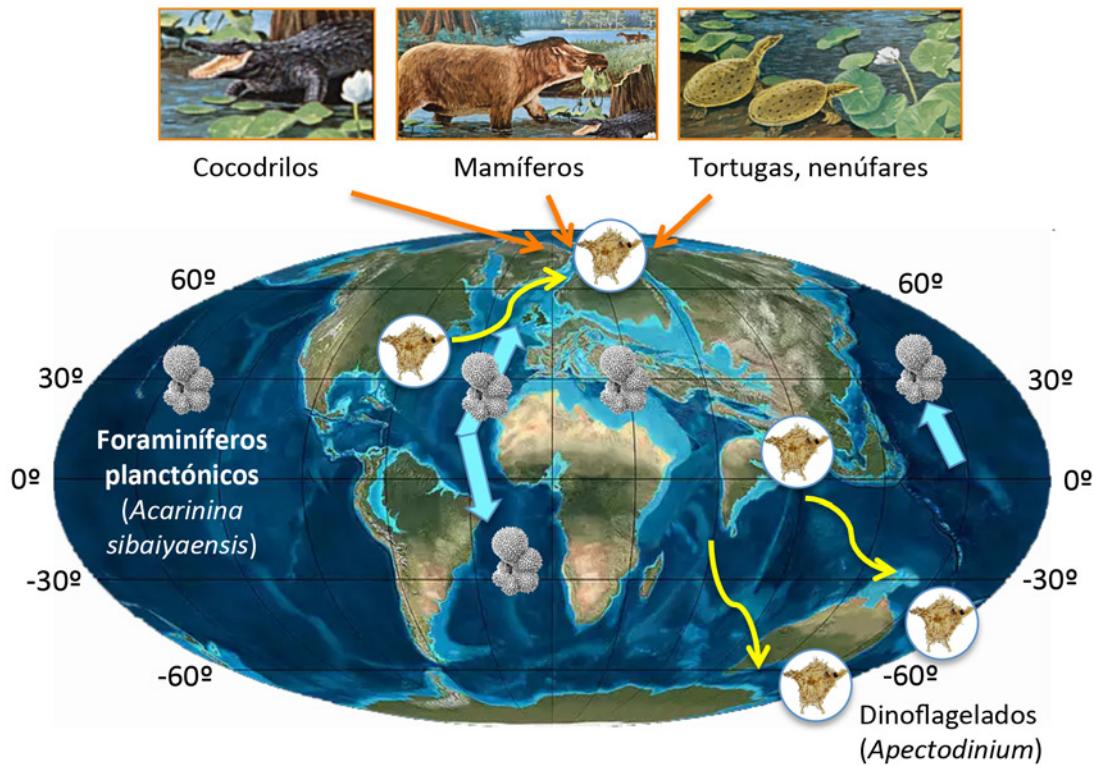


Figura 7. Reconstrucción de continentes y océanos hace 56 millones de años, y migración de especies típicas de medios tropicales a altas latitudes durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno.

nal de los productos del mar, que a su vez constituyen la principal fuente de proteínas de más de mil millones de personas. La acidificación oceánica está fomentando la proliferación de algas tóxicas, la propagación de contaminantes como metales pesados, y está afectando a los corales y arrecifes y a su capacidad de absorber el exceso de CO<sub>2</sub>. Llama la atención que la velocidad de calentamiento en la actualidad (1,6 °C por siglo) es de 2 a 30 veces más rápida que la registrada durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno. El drástico descenso en los isótopos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) durante el límite Paleoceno/Eoceno (Figura 6) sugiere una liberación de carbono ligero (C<sup>12</sup>) de cuatro a ocho veces mayor que las emisiones antropogénicas desde que comenzó la era industrial hasta la actualidad (Marland et al., 2005), y es comparable a las previsiones para finales del siglo XXI.

El estudio de este y de otros eventos hipertermales de distinta magnitud, duración y velocidad, permite evaluar la respuesta del planeta a eventos globales de calentamiento, y contribuye a mejorar los modelos climáticos que se emplean para hacer simulaciones del clima del futuro.

### CONSIDERACIONES FINALES

La Tierra ha experimentado cambios climáticos desde que se formó como planeta. A diferencia de los anteriores, el cambio climático actual no se debe a causas naturales, sino que está siendo provocado por la acción de nuestra especie, *Homo sapiens*.

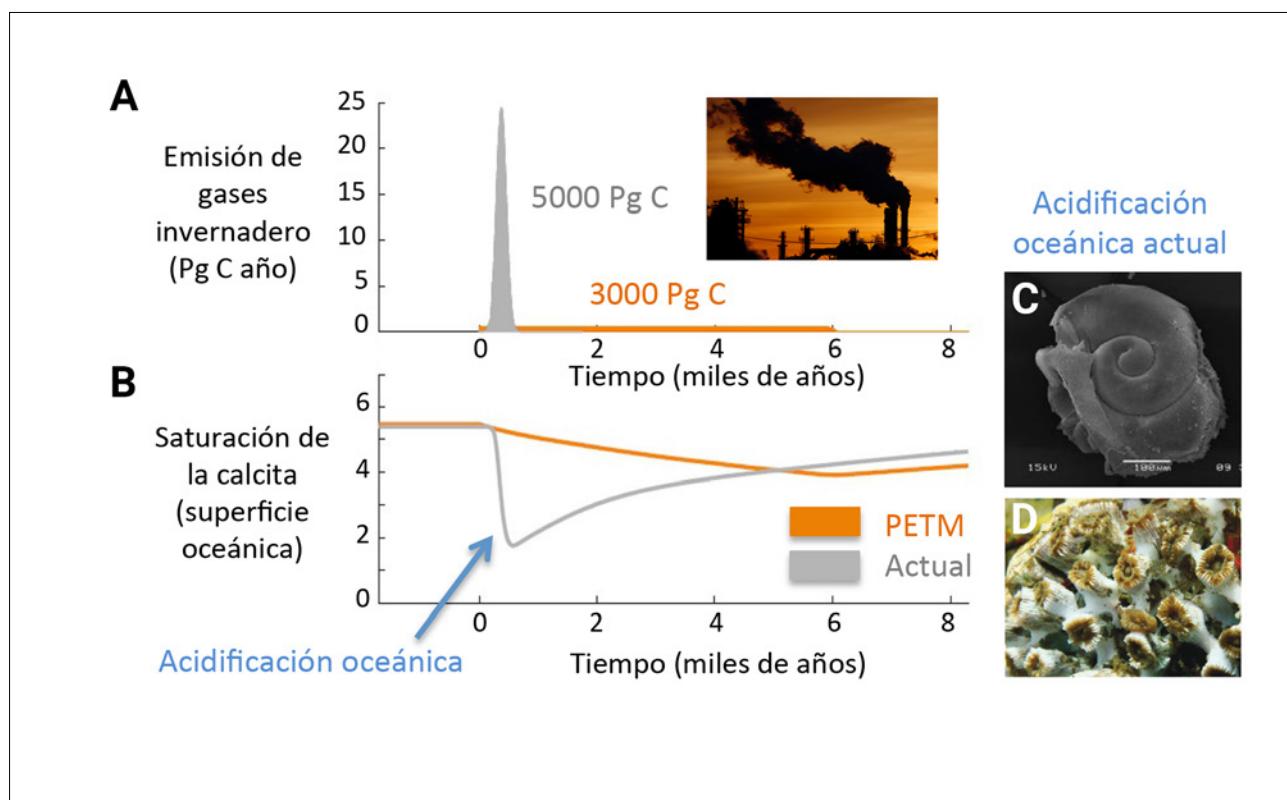


Figura 8. (A) Rapidez (expresada en miles de años en el eje horizontal) y magnitud (eje vertical) de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el PETM (naranja) y en la época industrial (gris). (B) Efecto de las emisiones representadas en (A) en la geoquímica de los océanos, expresado como variaciones en la saturación de la calcita en las aguas superficiales (eje vertical, un descenso en los valores menor pH de las aguas, y acidificación oceánica). A mayor rapidez de las emisiones (A), se produce disolución del carbonato (B), tal y como indican las líneas grises. (C, D) Disolución de organismos marinos en la actualidad: (C) pterópodo, (D) coral *Cladocora caespitosa*. Modificado de Alegret (2024).

Siempre ha habido cambios climáticos, y siempre los habrá, pero el registro geológico y los fósiles indican que las emisiones de gases de efecto invernadero durante la época industrial, y el cambio climático asociado, no tienen precedentes en los últimos 66 millones de años. Cualquiera que sea su desenlace, no impedirá que nuestro planeta y la vida sobre él continúen su largo viaje. Pero las condiciones ambientales quizás no sean las adecuadas para *Homo sapiens*. Las simulaciones para los próximos 300 años (Figura 5), indican que estamos muy cerca de alcanzar el nivel crítico de CO<sub>2</sub> atmosférico que marca la diferencia entre el “Planeta Nevera” y el “Planeta Cálido” o “Invernadero” del Eoceno. A corto plazo, se producirá un calentamiento global, fenómenos meteorológicos intensos, cambios en la circulación oceánica, acidificación de los océanos, la pérdida del hielo permanente y el ascenso del nivel del mar. Todo ello condiciona la habitabilidad del

planeta para nuestra especie. Las consecuencias a medio y largo plazo no se conocen con exactitud, y el estudio de los hipertermales del pasado permite mejorar los modelos predictivos, y realizar simulaciones.

La historia climática de nuestro planeta a lo largo de millones de años revela, además, la existencia de rápidos cambios climáticos que llevaron a alcanzar puntos sin retorno, a partir de los cuales no fue posible volver a las condiciones previas y se instauraron escenarios climáticos muy distintos. *Homo sapiens* ha logrado alterar en apenas un siglo la viabilidad natural del planeta, y la Paleoclimatología pone la voz de alarma sobre posibles puntos de no retorno en la situación climática actual, que podrían causar daños irreversibles sobre los ecosistemas, y comprometer la habitabilidad del planeta para nuestra especie.



*Homo sapiens*, esa especie recién llegada que ha cambiado el clima del futuro, tiene la capacidad de reducir, en la medida de lo posible, las emisiones de gases de efecto invernadero, e implantar mecanismos de mitigación y adaptación que mantengan los peligros climáticos dentro de los niveles tolerables para nuestra civilización.

## AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte de los proyectos de I+D+I PID2019-105537RB-I00, financiado por MCIN / AEI/10.13039/501100011033/ y "FEDER Una manera de hacer Europa", y PID2023-149894OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

## CONFLICTO DE INTERESES

La autora de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alegret L. (2024). La especie de cambió el clima del futuro, y se asustó leyendo el pasado. Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza. ISBN: 978-84-1340-806-4.
2. Alegret L., Ortiz S., Arenillas, I., Molina E. (2010). What happens when the ocean is overheated? The foraminiferal response across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Alamedilla section (Spain). Geological Society of America Bulletin, 122 (9/10): 1616-1624.
3. Alegret, L., Arreguín-Rodríguez, G. J., Trasviña-Moreno, C. A., Thomas, E. (2021). Turnover and stability in the deep sea: benthic foraminifera as tracers of Paleogene global change. Global and Planetary Change, 196, 103372.
4. Cearreta, A. (2021). La perspectiva del Antropoceno: Una mirada geológica al cambio climático. *Mètode Science Studies Journal*, 110: 45-51.
5. IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
6. IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
7. Keeling, R. F. y Keeling, C. D. (2017). Atmospheric Monthly In Situ CO<sub>2</sub> Data - Mauna Loa Observatory, Hawaii (Archive 2023-06-04). En: Scripps CO<sub>2</sub> Program Data. UC San Diego Library Digital Collections. <https://doi.org/10.6075/J08W3BHW>
8. Keeling, C. D., Piper, S. C., Bacastow, R. B., Wahlen, M., Whorf, T. P., Heimann, M. and Meijer, H. A. (2001). Exchanges of atmospheric CO<sub>2</sub> and <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 págs.
9. Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. y Stocker, T.F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, 453: 379-382.
10. Marcott, S. A., Shakun, J. D., Clark, P. U., Mix, A. C. (2013). A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science*, 339: 1198-1201, doi: 10.1126/science.1228026
11. Marland, G., Boden, T. A. y Andres, R. J. (2005). Global, Regional, and National Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. En: Trends: A Compendium of Data on Global Change. CO<sub>2</sub> Information Center, Oak Ridge Nat. Laboratory. [http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/meth\\_reg.htm](http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.htm)



12. Martín-Chivelet, J. (2016). *Memorias de un clima cambiante*. Batiscafo, S.L., Barcelona, 142 pp.
13. Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J.F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T., Osborn, T., Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X. y Timmermann, A. (2013). Information from Paleoclimate Archives. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
14. Palmer, M. D., Harris, G. R. y Gregory J. M. (2018). Extending CMIP5 projections of global mean temperature change and sea level rise due to thermal expansion using a physically-based emulator. *Environmental Research Letters* 13, 084003, doi: 10.1088/1748-9326/aad2e4
15. Romanello, M., di Napoli, C., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., et al. (2023). The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *Lancet* 2023; 402: 2346–2394, doi: 10.1016/S0140-6736(23)01859-7

---

**Si desea citar nuestro artículo:**

Alegret Badiola L. Una perspectiva temporal del cambio climático. RACSG.2025;113(01):40-53.  
rac.2025.113.1.org03