

MAR GÓMEZ

# EL TICTAC CLIMÁTICO



La transformación del planeta  
y el destino que nos espera

OBERON

# **EL TICTAC CLIMÁTICO**

**LA TRANSFORMACIÓN DEL PLANETA  
Y EL DESTINO QUE NOS ESPERA**



# **EL TICTAC CLIMÁTICO**

**LA TRANSFORMACIÓN DEL PLANETA  
Y EL DESTINO QUE NOS ESPERA**

**MAR GÓMEZ**

**OBERON**

# OBERON

Primera edición: abril de 2026

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.

Imágenes no aportadas por el autor:  
© 2003-2025 Shutterstock, Inc

© EDICIONES ANAYA MULTIMEDIA (GRUPO ANAYA), 2026  
Calle Valentín Beato, 21  
28037 Madrid



PAPEL DE FIBRA  
CERTIFICADA

ISBN: 979-13-87775-04-9  
Depósito legal: M-2926-2026  
Impreso en España - Printed in Spain

*A mis luces en esta Tierra.*

## Agradecimientos

Quería comenzar este libro dando las gracias a todos los que me apoyan en cada proyecto en el que me embarco. Quienes me conocen saben que tengo pasión por la comunicación y la ciencia y que cada proyecto que inicio lo hago con motivación y determinación. Sin embargo, el camino muchas veces no es sencillo. Disfruto escribiendo, me hace aislarme del ritmo frenético del día a día y poner foco en el presente, pero en todo este proceso, a veces duro, debo dar las gracias, en primer lugar, a mi marido. Gracias por ser luz en la vida y por impulsarme a ser más grande, por sentirte orgulloso cuando brillo y alumbrarme cuando me oscurezco. Por tu paciencia, por las correcciones en todo el libro, por nuestras discusiones acaloradas sobre lo que incluir y cómo explicarlo de la mejor manera. Sin tus apuntes, este libro no sería lo que es hoy. Así que gracias, gracias y gracias.

Gracias a mi hija, porque por ti este libro cobra más sentido. Reconozco que no ha sido fácil sacar este proyecto adelante con una niña tan pequeña, pero aquí está el resultado y espero que puedas disfrutar de un mundo más saludable. Deseo que mi pequeño grano de arena despierte conciencias y contribuya a mejorar las cosas. Vendrán años difíciles en cuanto al clima, pero espero y confío en que la humanidad pueda recapacitar y promover los cambios necesarios para que tú heredes un planeta mucho mejor.

Gracias a mi familia y amigos, por sentir que mis éxitos son suyos, por las risas en las cenas y las palabras de aliento. Por creer que sigo siendo la «lista del grupo», aunque yo no lo crea en absoluto.

Gracias a mi abuela. Allá donde estés, sé que me mandas tu fuerza. Gracias por enseñarme que la perseverancia, el carácter y la lucha es el camino para conseguir las cosas. Que nada viene regalado y que hay que pelear por los sueños. Pienso en ti cada día. Gracias por dejarme ese legado.

Por supuesto, gracias a la persona que ha confiado desde el minuto uno en este proyecto para que fuera publicado aquí, en Oberon, Eugenio Tuya, gracias por confiar en mí para realizar esta obra de divulgación. Gracias a Lidia Señarís, maravillarme ante tu conocimiento de la lengua española es poco. He aprendido muchísimo en el proceso. Gracias a todo el equipo de Anaya, a Antonio Mellado y José Carlos Jiménez por su implicación, rapidez y profesionalidad, por saber captar todo lo que quería transmitir en estas páginas. Un trabajo de maquetación y de diseño de imágenes increíble. Sin vosotros, esto no sería posible.

Gracias también a todos los expertos, muchos de ellos amigos, que se han tomado la molestia de leer este libro y contribuir con sus reflexiones. Carlos Briones, Mario Picazo, Fernando Valladares, Jorge Olcina, Odile Rodríguez de la Fuente, María José Sanz, María Neira, José Miguel Viñas, Mario Viciosa, Isabel Moreno, Cristina Monge y Pablo Álvarez.

Por último, gracias a ti, querido lector, que te has tomado la molestia de comprar y leer este libro. Gracias porque creo que eres una persona comprometida y eso es lo que el mundo necesita. Espero que hayas aprendido, disfrutado y reflexionado con su lectura y, sobre todo, que tu ejemplo inspire a quienes te rodean para crear un mundo mejor, un mundo habitable y un mundo donde la vida pueda seguir.

## Sobre la autora

Mar Gómez es doctora *cum laude* en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Ha trabajado en televisión como presentadora del tiempo y divulgadora y colaborado con medios como *National Geographic*, *RNE*, *Cadena COPE*, *Telemadrid*, *Mediaset*, *TVE* y *Atresmedia*. A nivel internacional es fuente de referencia para medios tan prestigiosos como la *BBC*.



Como divulgadora, ha participado en foros internacionales como la COP25 y en proyectos de Naciones Unidas para la protección del Ártico. Es autora de tres libros de divulgación científica: *En qué se parecen las gotas de lluvia al pan de hamburguesa* (2021), *Meteorosensibles* (2023) y *Gota a Gota: el gran viaje del agua* (2024). Precisamente en ese mismo año 2024 fue reconocida con dos premios a la mejor creadora de contenido en Ciencia. Con más de medio millón de seguidores, comparte contenidos sobre meteorología, astrofísica y ciencia en redes sociales. Más información: [www.margomez.com](http://www.margomez.com) (@margomez en redes sociales)

Actualmente es la responsable de meteorología de [eltiempo.es](http://eltiempo.es)

# Índice

PRÓLOGO 11

**Cae la noche 15**

**MEDIANOCHE 17**

CÓMO HEMOS LLEGADO HASTA AQUÍ

**LA ÚLTIMA HORA 263**

UNA REFLEXIÓN FINAL. CAMINO A LA ESPERANZA

**EL DESVELO 35**

LA SITUACIÓN CLIMÁTICA ACTUAL

**CARRERA CONTRARRELOJ 251**

EL FUTURO QUE NOS ESPERA  
Y EL QUE PODEMOS CREAR

**VIGILIA 55**

BAJO EL ASEDIO DEL CALOR

**LA MAÑANA**

**DE LA INNOVACIÓN 227**

DESAFÍOS, PROYECTOS Y RIESGOS  
DE JUGAR CON EL CLIMA

**INSOMNIO 85**

SE DESATA LA TORMENTA

**EL DESPERTAR TARDÍO 213**

LA CONCIENCIA GLOBAL  
Y EL NEGACIONISMO

**PESADILLAS 111**

PLANETA EN LLAMAS

**AMANECER 193**

MARCANDO LOS LÍMITES

**NOCHE AGITADA 125**

EL DESHIELO Y NUESTROS OCEANOS

**¡SUENA LA ALARMA! 175**

EFFECTOS EN LA SALUD HUMANA  
Y EL REINO ANIMAL

**Amanecer 191**

**LA ÚLTIMA CAMPANADA 269**





## Prólogo

El tiempo nos importa. Es una de las cosas que más valoramos y cuidamos. Nuestro tiempo. Nos preocupa que pase demasiado rápido. Nos preocupa perderlo. Pero ¿nos preocupa el tiempo que pasa sin actuar en nuestro planeta? Actualmente nos enfrentamos a la mayor amenaza medioambiental de nuestra era: el calentamiento global. El planeta se está calentando a un ritmo sin precedentes y va a continuar haciéndolo en las próximas décadas e incluso siglos si no hacemos nada. Ante esta situación surgen muchas preguntas. ¿Es este cambio climático reversible? ¿Si la Tierra ha pasado por otros eventos climáticos importantes en su historia, por qué lo que vivimos es diferente? ¿Hay consenso en toda la comunidad científica? Y si lo hay ¿por qué hay un colectivo negacionista que no quiere ver los efectos graves de esta situación?

En este libro, comprometido lector, vas a invertir tu tiempo en conocer cómo hemos llegado hasta esta situación, por qué es diferente y cuáles son sus efectos y consecuencias. Pero, además, reflexionaremos juntos sobre la importancia de actuar a tiempo y los métodos innovadores (y también arriesgados) que se están desarrollando para «ayudar» al ser humano a contener esta situación. ¿Cuáles son las medidas óptimas? ¿Es responsabilidad de todos los ciudadanos o, por el contrario, deben ser los países más contaminantes los responsables de revertir la situación? ¿Estamos en un punto de no retorno en el

cual, independientemente de lo que hagamos, la situación no cambiará? ¿Es la geoingeniería una solución ante la crisis climática? Y lo más importante de todo: ¿podremos vivir en un mundo dominado por el calor y sus efectos colaterales?

A través de la metáfora del tiempo y siguiendo las horas de un reloj, avanzarás en los capítulos de este libro, en una cuenta atrás del reloj climático en la que sus horas exponen las reflexiones sobre la crisis climática y sus consecuencias. Comenzaremos en la oscuridad de la medianoche, conociendo cómo ha evolucionado nuestro planeta hasta llegar a ser lo que es hoy en día, cómo ha sido nuestro pasado y los eventos climáticos más catastróficos que han conducido a extinciones masivas y al desarrollo de la vida tal y como la conocemos hoy. Porque no lo dudes, cada evento histórico a nivel climático ha determinado lo que somos en la actualidad. Tú y yo estamos aquí porque durante miles de millones de años el planeta se ha transformado de maneras impensables: desde un planeta ardiente en su nacimiento hasta convertirse en una bola de hielo. Juntos conoceremos, en esa medianoche, que este es el momento crítico para conocer por qué el calentamiento global actual es diferente del resto de cambios climáticos precedentes.

En el avance de la madrugada nos desvelaremos juntos para conocer el presente y abordar la crisis climática actual con los últimos datos científicos e informes de alto rigor. Esto sentará las bases para que, en un momento de vigilia, entremos en calor. El calor, el tema central de esta obra, es también el mecanismo impulsor del resto de los efectos que estamos sintiendo en nuestro planeta Tierra. Un planeta más cálido, pero ¿cuánto más cálido?

Con este calor, en nuestra madrugada surgirán algunas pesadillas que afrontaremos enfrentándonos al miedo. Un miedo ante los efectos que ya nos afectan. Porque el planeta arde, no solo con olas de calor, sino con incendios graves y devastadores y sequías extremas en diversas partes del mundo. A pesar de lo dramático de la situación, permaneceremos despiertos en nuestra noche con algo de insomnio para abordar los efectos de los fenómenos meteorológicos extremos.

¿Es cierto que el calor está provocando que los huracanes sean más intensos? ¿Qué pasará con las ciudades costeras? ¿Van a cambiar los monzones?

En esta noche agitada no nos podemos olvidar del deshielo y de los secretos que oculta el hielo. Nuestro congelador planetario se derrite y con él aparecen secretos ocultos en el permafrost. Estos secretos, escondidos a varios metros de profundidad, pueden alterar la vida de todos.

Pero mantén la calma, ¡esto no va de catastrofismo! Va de sentar las bases de la realidad para que... ¡suene la alarma! Porque todo esto que le sucede al planeta nos sucede a nosotros mismos y a nuestro entorno. ¿Qué efectos tiene el calentamiento global en la salud de las personas? ¿Va a modificar los cerebros de las próximas generaciones? ¿Cómo serán las enfermedades del futuro? ¿Están en peligro muchas especies?

Con el amanecer llega la esperanza de construir juntos un nuevo mundo, a partir de límites que no deben sobrepasarse. Analizando los acuerdos actualmente sobre la mesa y la realidad de lo que podemos hacer cada uno de nosotros. ¿Son los políticos absolutamente responsables de la situación o cada uno de nosotros tiene una responsabilidad individual sobre la forma de vida que llevamos?

Tras conocer todo esto, no es tarde para despertar. Sí, hemos tardado muchos años en empezar a adoptar medidas, pero el momento de actuar es ahora. Por eso, en nuestro despertar tardío hablaremos de la conciencia global y del negacionismo, del activismo y de las nuevas generaciones a bordo de un cambio estructural global.

Todo cambio requiere de creatividad, innovación y superación de retos. Por eso, además de querer eliminar el problema básico, os contaré sobre los últimos proyectos pioneros de apoyo a la contención del calentamiento planetario. Y aquí surgirán nuevas interrogantes: ¿son la geoingeniería y la modificación climática una solución? ¿Debemos jugar a ser Dios con la atmósfera o debe nuestro planeta autorregularse por sí mismo?

Esta es una carrera contrarreloj porque a pesar de toda la información disponible, que conocerás en este libro, no nos queda mucho tiempo para conservar el planeta como lo conocemos. Te informaré de

las predicciones para las próximas décadas, y del mundo que posiblemente heredarán nuestros hijos, en el escenario más optimista y en el más pesimista.

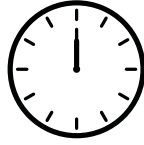
En nuestra última hora juntos reflexionaremos sobre las medidas para mitigar el calentamiento global y hacer de nuestro hogar un mundo habitable, sostenible y responsable para todos los que vivimos en él.

Pero todo esto no lo haremos solos. A lo largo de estas doce horas que conforman los capítulos de este libro, nos acompañarán las reflexiones de expertos en cada campo, quienes te ofrecerán su visión sobre cada uno de estos temas. Porque este libro es un viaje para repensar nuestras acciones y construir, juntos, un futuro mejor.

Espero y deseo que estas páginas te hagan reflexionar, te inspiren y te motiven a actuar. Tomar decisiones más conscientes no es solo una cuestión de responsabilidad personal, sino una necesidad urgente para enfrentar los desafíos del calentamiento global y todas sus consecuencias. Como dijo Albert Einstein: «El mundo que hemos creado es un proceso de nuestro pensamiento. No puede ser cambiado sin cambiar nuestra forma de pensar». Porque el verdadero cambio comienza en cada uno de nosotros. Comienza en ti, en tus acciones diarias y en tus decisiones. Sin embargo, solo cuando unimos esfuerzos podemos marcar, JUNTOS, una gran diferencia.

**Cae la noche**





# Medianoche

Cómo hemos llegado hasta aquí

*«Debemos conocer el pasado para comprender el presente».*

—Carl Sagan (1934-1996).

Nuestro planeta es un lugar único y excepcional en el sistema solar, pero para llegar a ser lo que es hoy en día ha pasado por multitud de procesos. La Tierra, nuestro hogar, no ha sido en su pasado como lo ven nuestros ojos hoy. Con el paso del tiempo, las piezas del rompecabezas de lo que llamamos mundo han ido encajando a la perfección. Para entender el momento climático en el que se encuentra nuestro planeta debemos viajar juntos hacia atrás en el tiempo, muchos millones de años, hasta el momento en el que se gestó nuestro mundo.

Hace unos 4500 millones de años comenzó la historia de nuestro planeta. En una nube de polvo y gas en forma de disco girando alrededor del sol, y después de un complejo proceso, la Tierra apareció en el sistema solar. Al principio no era más que un grano de polvo alrededor del Sol primitivo, pero poco a poco y a partir de colisiones entre partículas, asteroides y otros planetas (incluido el impacto gigante que formó la Luna), y gracias a la fuerza de la gravedad, fue creciendo y transformándose en una esfera lo suficientemente grande.

Pero ¿cómo era esta Tierra primitiva? Muy diferente al mundo que vemos hoy. Era un lugar más violento, infernal y tóxico. Incompatible con la vida. La superficie terrestre estaba extremadamente caliente, con temperaturas que podían fundir las rocas. De hecho, en ese momento hubiera sido muy difícil bautizar a nuestro planeta como el *Planeta Azul*, pues la Tierra primitiva no estaba llena de mares y océanos, sino cubierta por un océano de magma, es decir, una capa de roca fundida de cientos de kilómetros de profundidad derretida por la energía liberada en su formación.

A medida que fue pasando el tiempo y una vez que el océano de magma se enfrió lo suficiente para solidificarse y formar una superficie sólida, la atmósfera terrestre se enriqueció a través de erupciones volcánicas, así como por la contribución de agua y otros gases liberados, posiblemente, de cometas y meteoritos que impactaron contra la superficie.

Así que sería unos 4400 millones de años atrás cuando el agua empezaría a dominar nuestro planeta y entre 4200 y 3800 empezarían aparecer las primeras formas de vida. Los primeros fósiles conocidos en la Tierra datan de hace 3500 millones de años y hay evidencia de que la actividad biológica tuvo lugar incluso antes. Estas formas de vida, como las bacterias, eran muy simples y se desarrollaron en condiciones extremas, porque las condiciones primitivas de la Tierra, con una atmósfera rica en gases como dióxido de carbono, metano y amoníaco y una superficie cubierta de océanos, proporcionaban un ambiente que fue evolucionando para ser cada vez más propicio para el desarrollo y evolución de la vida.

Pero ni siquiera en aquel momento la Tierra se parecía al mundo en el que nos movemos los seres humanos hoy. Desde sus orígenes hasta hace pocos miles de años, ha pasado por numerosos cambios climáticos que le han dado forma al planeta y a la vida que en él se encuentra. Solo en los últimos 800 000 años, hemos tenido ocho ciclos de edades de hielo y períodos más cálidos, hasta que el final de la última edad de hielo —hace unos 11 700 años— marcara el comienzo de la era del clima moderno y de la civilización humana. Cada uno de estos ciclos ha

dejado una marca en la estructura del planeta, para influir en el destino de las especies que lo habitan y determinar el nuestro. Estos eventos climáticos han resultado cruciales a la hora de configurar el mundo actual y llevarnos al momento en el que nos encontramos hoy. Pero ¿cuáles han sido y por qué se han producido?

## LOS EVENTOS CLIMÁTICOS QUE REDEFINIERON LA TIERRA: LAS EDADES DE HIELO DE NUESTRO PLANETA

Cuando la Tierra se originó era muy diferente a la que hoy conocemos. Sabemos que el Sol emitía una menor cantidad de radiación que la actual, aproximadamente un 30 % menos que en hoy en día, algo que afectaba directamente al clima planetario. A pesar de esta debilidad solar, los primeros registros geológicos indican la existencia de agua en forma líquida en nuestro planeta, cuando debería de haber estado congelada debido a las bajas temperaturas. Esto plantea una cuestión conocida como la «paradoja del Sol joven»: ¿cómo pudo la Tierra mantener agua líquida y evitar congelarse a pesar de que el Sol era menos radiante?

A medida que la composición de nuestra atmosfera iba constituyéndose, apareció el efecto invernadero, producido por la presencia de ciertos gases que son muy eficientes a la hora de retener el calor recibido y emitido por la Tierra y procedente del Sol. Estos gases, como el metano o el dióxido de carbono, han estado presentes en los períodos muy cálidos de la Tierra, en concentraciones elevadas. A raíz de esto se han producido temperaturas extremadamente cálidas, además de otros efectos, como alteraciones en el nivel del mar o cambios en los patrones de precipitación.

Hoy todos nosotros estamos vivos, entre otras cosas, porque respiramos oxígeno. Damos por sentado su existencia, pero esto no siempre fue así. De hecho, el oxígeno no ha estado presente en nuestro planeta durante casi la mitad de su historia, pero cuando llegó, marcó un antes

y un después en la vida y el clima terrestre. Este elemento llegó a nuestra atmósfera gracias a las cianobacterias hace entre 2400 y 2100 millones de años, en un evento que los geólogos conocen como la Gran Oxidación, causante de una catástrofe global. Resulta que, al surgir estos organismos, y empezar a realizar la fotosíntesis, se empezó a producir oxígeno molecular en cantidades nunca vistas.

Este aumento tan enorme en los niveles de oxígeno trajo un cambio de suma importancia a la composición de la atmósfera de la Tierra, y esto lógicamente impactó en la evolución de la vida en el planeta. En primer lugar, porque creó un gran evento de extinción, pues la vida que había en el planeta se había formado al menos 1500 millones de años antes, cuando no había oxígeno. Cuando este gas se incrementó tan drásticamente resultó tóxico, venenoso, y acabó con la mayor parte de esta vida anaeróbica. Sin embargo, esto también permitió la aparición de nuevas formas de vida que pudieron adaptarse y sobrevivir a la presencia de oxígeno en nuestra atmósfera.

En segundo lugar, este evento de oxidación provocó que la química de la atmósfera terrestre cambiase drásticamente a medida que los niveles de oxígeno aumentaron y reemplazaron al metano (todavía presente hoy, pero en cantidades muy pequeñas). El metano, al ser un gas de efecto invernadero, retiene el calor solar y contribuye al calentamiento global. Sin embargo, a medida que el oxígeno reemplazó al metano en la atmósfera, las temperaturas globales descendieron lo suficiente como para provocar la formación de extensas capas de hielo, desde los polos hasta los trópicos. Esta edad de hielo —un período geológico en el que el planeta queda casi cubierto de hielo— fue una de las más intensas y largas del registro geológico: duró unos 300 millones de años<sup>1</sup>.

Nuestro planeta ha pasado por varias épocas glaciares. Se estima que ha habido al menos otras cuatro grandes edades glaciares en el pasado. El período glacial<sup>2</sup> más reciente comenzó hace unos 115 000

---

1. La glaciación Huroniana.

2. Un período glacial (también llamado glacial o glaciación) es un intervalo de tiempo (de miles de años) dentro de una era glacial o edad de hielo que se caracteriza por temperaturas más frías y avances de los glaciares.

años y ahora estamos en una época interglaciaria, avanzando hacia una próxima glaciación (sí, ¡tal como lo lees!). Pero ¿cómo es posible si resulta que estamos en una época de calentamiento global y este libro va sobre esto? Ello puede explicarse porque entre glaciación y glaciación, suelen aparecer períodos con clima templado llamados etapas interglaciales, como la que experimentamos ahora. Los científicos llamamos a esta época Holoceno. Resulta paradójico que, mientras nos dirigimos hacia una próxima glaciación, estemos inmersos en un proceso de calentamiento global, pero en realidad es así. Durante una edad de hielo, las temperaturas experimentan variaciones entre niveles más fríos y más cálidos. Durante las fases más cálidas, conocidas como interglaciales, las capas de hielo y los glaciares se derriten, mientras que, durante las fases más frías, llamadas glaciales, se expanden. Ahora mismo llevamos unos pocos miles de años en un planeta sin hielo, un tiempo que puede parecernos mucho, pero que en cuestión de la edad del planeta es bastante breve. Estos períodos interglaciares suelen durar, como promedio, varias decenas de miles años. Así que sí, en teoría vamos camino de un período glacial dentro de decenas de miles de años, lo cual no es excluyente del calentamiento global antropogénico que estamos viviendo actualmente y del que te hablaré más adelante.

**RESULTA CONTRADICTORIO PENSAR QUE NOS DIRIGIMOS HACIA UNA FUTURA GLACIACIÓN MIENTRAS, AL MISMO TIEMPO, ESTAMOS INMERSOS EN UN ACELERADO PROCESO DE CALENTAMIENTO GLOBAL. ESTA APARENTE PARADOJA NOS DEMUESTRA LA COMPLEJIDAD DE NUESTRO SISTEMA CLIMÁTICO.**

Volviendo a las glaciaciones, imagínate la Tierra completamente congelada. Otro de los eventos más destacados fue cuando se cree que la Tierra se convirtió en una gigantesca bola de nieve hace unos 717 a 660 millones de años. Se considera que fue uno de los sucesos climáticos más extremos de nuestra historia planetaria y duró cincuenta y siete millones de años. Para que nos hagamos una idea de lo que sucedió, el

planeta estaba cubierto (o casi cubierto) totalmente de hielo desde los polos hasta el ecuador y las temperaturas cayeron hasta cincuenta grados bajo cero. Se estima que en la región ecuatorial la temperatura media era de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (aproximadamente similar a la actual Antártida).

En cuanto a lo que realmente pudo causarlo, se cree que una reorganización de las placas tectónicas redujo al mínimo la desgasificación volcánica y, al mismo tiempo, una zona volcánica continental en Canadá empezó a erosionarse, consumiendo  $\text{CO}_2$  atmosférico<sup>3</sup>. A la vez, y a medida que el planeta se congelaba, el hielo reflejaba más radiación solar al espacio, impidiendo que se retuviese en la superficie terrestre y alimentando aún más el enfriamiento. Esto se debe a lo que llamamos albedo —la capacidad de una superficie de reflejar la radiación solar de vuelta al espacio— y que es máximo en la nieve y el hielo. Otro aspecto interesante y que resultó crucial en el desencadenamiento de este evento fue la ubicación de la Tierra respecto al Sol y la inclinación de la órbita terrestre. Pero ahora analizaremos con más detalle las causas de las glaciaciones.

Si mencionamos otro evento glacial destacado podemos remontarnos al último vivido. Como ya sabes, el último período glacial comenzó hace unos 115 000 años y finalizó hace unos 11 000 años con el inicio del período interglacial actual. Esta fue la glaciación Würm<sup>4</sup> y durante dicha etapa gran parte de la superficie de la Tierra fue ocupada por hielo y la temperatura media global descendió drásticamente. Durante la glaciación Würm, enormes capas de hielo se extendieron desde los polos hacia latitudes más bajas, hasta cubrir grandes áreas de Europa, incluidos los Alpes, los Pirineos y la mayor parte de Europa del norte<sup>5</sup> y América del Norte<sup>6</sup>.

---

3. *Grosso modo*, al disminuir la presencia de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, disminuyó la presencia de este importante gas de efecto invernadero y, por lo tanto, su concentración para retener calor, y el planeta se enfrió.

4. Y Weichseliana, otra denominación para la última glaciación y que hace referencia al norte de Europa, especialmente Escandinavia, el norte de Alemania, Polonia, y el Báltico.

5. Glaciación Weichseliana.

6. Glaciación de Wisconsin.

Nuestros antepasados no lo tuvieron nada fácil. En la recta final de este período los Neandertales ya se habían extinguido<sup>7</sup> y en Europa deambulaban los *Homo sapiens*<sup>8</sup>. Sobrevivimos al frío, nos adaptamos y le sacamos partido, tanto que nos marchamos a la costa española y el sur de Europa (1) buscando un clima más agradable. Se cree que fue en ese momento, cuando los seres humanos también aprovechamos para cruzar de Asia a América<sup>9</sup> por el estrecho de Bering, debido al bajo nivel del mar.

Sin embargo, cuando estábamos a punto de salir de esta gélida época y los glaciares comenzaban a derretirse hace unos 13 000 años, el clima en Europa recayó de nuevo en un brusco enfriamiento conocido como *Younger Dryas* o *Dryas Reciente*. Este fenómeno no fue un cambio climático puntual o transitorio, sino una época de condiciones climáticas frías que se extendieron por un largo período de tiempo: nada más y nada menos que alrededor de unos 1300 años. Los científicos aún no tienen claras las causas detrás de este fenómeno de tan suma duración, pero numerosos expertos plantean la hipótesis de que el enfriamiento abrupto pudo haber sido desencadenado por el cierre parcial o total de la circulación termohalina del océano, un proceso crucial para la distribución global del calor y la salinidad en los océanos. Básicamente, el enfriamiento pudo haberse producido por cambios en las corrientes oceánicas, probablemente debido al derretimiento previo de las capas de hielo en América del Norte que liberaron grandes cantidades de agua dulce en el océano Atlántico Norte, y alteraron esa circulación termohalina. Esto afectó la redistribución del calor a nivel global y, por lo tanto, la llegada de este período tan frío. Otras hipótesis (2) plantean que el impacto de un asteroide en nuestro planeta pudo desencadenar un brusco cambio en el clima y dar lugar a un resultado similar. Sea como fuere, este enfriamiento y cambio climático tuvo grandes

---

7. Los neandertales se extinguieron hace unos 40 000 años.

8. La llegada de los Homo Sapiens al norte de Europa sucedió hace unos 45 000 años.

9. Hace unos 15 000 años.

implicaciones en nuestro planeta. Por ejemplo, a raíz de todo esto hubo mucha megafauna que se extinguió al final de esta época helada como los mamuts<sup>10</sup> o los mastodontes.<sup>11</sup>

Pero, volviendo a las edades de hielo y glaciaciones, ¿por qué se produjeron estos gélidos eventos climáticos? ¿Qué llevó a que el frío se apoderara del planeta de forma progresiva y a lo largo de tantos miles o incluso millones de años? Está claro que algo tuvo que suceder y hoy en día contamos con registros que nos hacen intuir y, en algunos casos confirmar las causas de este tipo de eventos climáticos. A pesar de su posible diversidad de causas, durante los últimos 400 000 años estos eventos fríos han sucedido de manera cíclica y esto responde principalmente a cambios astronómicos conocidos, como los ciclos de Milankovitch. Hace un siglo, el científico serbio Milutin Milankovitch planteó la hipótesis de que los efectos a largo plazo de los cambios en la posición de la Tierra en relación con el Sol eran un fuerte impulsor del clima a largo plazo de la Tierra, y señaló su responsabilidad como desencadenantes del comienzo y el final de los períodos de glaciación y edades de Hielo.

Estos ciclos de Milankovitch son básicamente cambios periódicos en la órbita de la Tierra y en la inclinación de su eje de rotación, que influyen en la cantidad de luz solar que llega al planeta y, en consecuencia, afectan el clima a largo plazo. Por ejemplo, la forma de la órbita terrestre cambia entre casi circular y más elíptica en un ciclo de unos 100 000 años. Cuando la órbita es más elíptica, la Tierra recibe hasta un 23 % más de radiación solar en su punto más cercano al Sol. Actualmente la órbita de la Tierra se está volviendo lentamente más circular, por así decirlo.

---

10. El Younger Dryas trajo consigo un enfriamiento abrupto que afectó los ecosistemas donde vivían los mamuts. Sin embargo, tras este enfriamiento, el posterior calentamiento al final de la glaciación modificó aún más su hábitat, reduciendo las praderas y estepas que eran cruciales para su supervivencia.

11. La mayoría de los mamuts lanudos se extinguieron en el continente al final del Pleistoceno, hace unos 10 000 años, aunque una pequeña población sobrevivió hasta extinguirse por completo. En su extinción influyeron también otros factores, como la caza. Por otro lado, el mastodonte americano se extinguió hace unos 13 000 años.

## **LOS CICLOS DE MILANKOVITCH CAUSAN VARIACIONES DE HASTA EL 25 % EN LA CANTIDAD DE INSOLACIÓN ENTRANTE EN LAS LATITUDES MEDIAS DE LA TIERRA. ESTO TIENE UN IMPACTO IMPORTANTE EN EL CLIMA TERRESTRE EN GRANDES ESCALAS TEMPORALES.**

También sabemos que la inclinación del eje de la Tierra varía entre 22,1 y 24,5 grados en ciclos de unos 41 000 años<sup>12</sup>. De hecho, la dirección de este eje es la que señala al norte, a la estrella Polar actual<sup>13</sup>, pero hace unos 13 000 años el norte lo determinaba la estrella Vega<sup>14</sup>. Pues bien, todo ello es determinante en la cantidad total de radiación solar recibida y en su efecto sobre las estaciones terrestres: cuando el ángulo es mayor, los veranos e inviernos son más extremos, porque cada hemisferio recibe radiación solar más perpendicular y durante más horas durante su verano cuando el hemisferio está inclinado hacia el Sol, y menos durante el invierno, cuando se inclina hacia alejarse. Actualmente, el eje está inclinado a 23,4 grados, y este valor disminuye lentamente. Para que te hagas una idea de las escalas de tiempo, hace unos 10 000 años la inclinación fue máxima, y en otros 10 000 años alcanzará su punto mínimo.

Además, la dirección del eje también cambia debido a la precesión axial<sup>15</sup> en un ciclo de 26 000 años. Esta oscilación se debe a las fuerzas de las mareas causadas por las influencias gravitacionales del Sol y la Luna que hacen que la Tierra se abulte en el ecuador, lo que afecta a su rotación. Esto modifica la relación de la Tierra con el Sol, y afecta a

---

12. Esta duración corresponde al ciclo completo desde un mínimo hasta un máximo y de vuelta al mínimo.

13. La estrella polar puede ayudarnos a orientarnos y encontrar el camino, ya que está situada en dirección del norte verdadero (o norte geográfico, a diferencia del norte magnético). Está situada más o menos directamente sobre el polo norte de la Tierra a lo largo del eje de rotación de nuestro planeta.

14. Vega fue la estrella polar alrededor del año 12000 a. C. y volverá a serlo alrededor del año 13720 d. C.

15. También hay precesión absidal, un cambio gradual en la orientación de la línea de los ápsides de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Los ápsides son los puntos de la órbita donde la Tierra está más cerca del Sol (perihelio) o más lejos del Sol (afelio). El ciclo de la precesión del áspide abarca unos 112 000 años.

las estaciones. Hoy en día, el perihelio (el punto más cercano de la Tierra al Sol) ocurre durante el invierno del hemisferio norte, lo que suaviza las estaciones. Sin embargo, en unos 13 000 años, el perihelio ocurrirá durante el verano en el hemisferio norte, lo que causará estaciones más extremas.

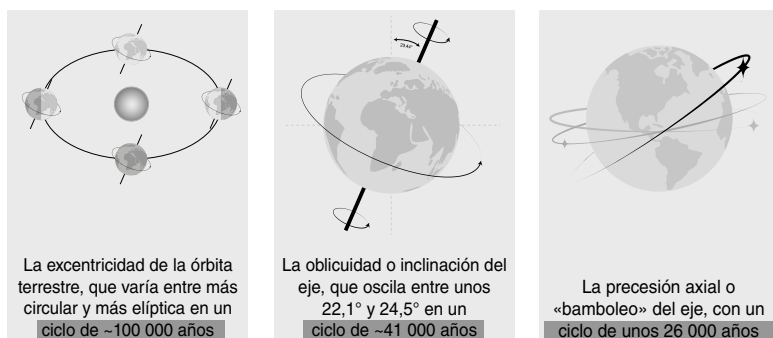
En conclusión, la teoría de Milankovitch explica cómo estos cambios en la órbita y el eje terrestre pueden desencadenar glaciaciones y períodos interglaciares al alterar la cantidad de energía solar que llega a la Tierra. Al principio, esta teoría no fue aceptada inmediatamente, pero los estudios posteriores nos han demostrado que los datos de los registros geológicos la respaldan, pues muestran que las glaciaciones han ocurrido aproximadamente cada 41 000 años, aunque desde hace 800 000 años los ciclos han cambiado a intervalos de 100 000 años, coincidiendo con el ciclo de excentricidad de la órbita terrestre, algo cuya explicación demanda aún mucho debate científico.

Porque ¿qué paso para que, de repente, los intervalos entre una edad de hielo y otra pasaran a ser de 100 000 años en vez de unos 40 000? Hace unos años parece que se encontró (3) una explicación relacionada con la forma en que los océanos absorben el dióxido de carbono de la atmósfera. Analizando la composición química de microfósiles obtenidos de los fondos marinos, los científicos encontraron que, durante los períodos de hielo, ocurridos desde ese momento en intervalos regulares de aproximadamente 100 000 años, había una mayor cantidad de dióxido de carbono almacenada en las profundidades del océano. Este hallazgo sugiere que, en esos momentos, una cantidad adicional de dióxido de carbono estaba siendo absorbida desde la atmósfera hacia el océano, algo que —combinado con cambios en la distribución de continentes y corrientes oceánicas— resultaba en un enfriamiento global más duradero<sup>16</sup> y permitía la expansión de grandes masas de hielo que cubrían prácticamente todo el hemisferio norte de la Tierra.

---

16. Esto hizo que el sistema climático se volviera menos sensible a los cambios de 41 000 años y más propenso a responder a ciclos más largos, como el de 100 000 años.

## Los tres ciclos de Milankovitch, responsables de cambios periódicos en el clima de la Tierra



**Figura 0.1.** Los tres ciclos de Milankovitch, responsables de cambios periódicos en el clima de la Tierra: (1) la excentricidad de la órbita terrestre, que varía entre más circular y más elíptica en un ciclo de ~100 000 años; (2) la oblicuidad o inclinación del eje, que oscila entre unos 22,1° y 24,5° en un ciclo de ~41 000 años; y (3) la precesión axial o «bamboleo» del eje, con un ciclo de unos 26 000 años. Estos ciclos modifican la cantidad y distribución de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, e influyen en la sucesión de glaciaciones e interglaciaciones.

Si bien los ciclos de Milankovitch son una parte importante de nuestra comprensión de los cambios climáticos a largo plazo, no pueden explicar por completo todos los cambios climáticos ocurridos en los últimos 2,5 millones de años, especialmente en períodos más cortos de tiempo, como el calentamiento tan rápido que hemos experimentado desde el período preindustrial, en concreto desde mediados del siglo XX y del que te hablaré en profundidad en este libro.

Por supuesto, puede haber otras causas para que se produzcan las glaciaciones y/o edades de hielo, como los cambios en las concentraciones de los gases de efecto invernadero, cambios en las corrientes oceánicas y la actividad volcánica, capaces de liberar grandes cantidades de gases y partículas en la atmósfera, lo que puede enfriar la temperatura global al bloquear la radiación solar que llega a la Tierra.

En definitiva, la pregunta sobre por qué ocurren las edades de hielo no tiene una respuesta simple debido a la gran complejidad de factores involucrados. En general, estas son el resultado de una serie de interacciones nada sencillas que se desencadenan por cambios periódicos en la órbita de la Tierra alrededor del Sol y que dan lugar a una cadena de retroalimentaciones positivas. Estas retroalimentaciones, que incluyen

la expansión del hielo y la liberación de gases de efecto invernadero, actúan unidas para enfriar la Tierra. Sin embargo, a medida que el ciclo orbital cambia nuevamente, esto se invierte, calentando la Tierra una vez más. La última edad de hielo concluyó hace aproximadamente 11 000 años, y se prevé que el próximo ciclo de enfriamiento severo comience dentro de unos 50 000 años o más en el futuro<sup>17</sup>.

## LOS EVENTOS CLIMÁTICOS QUE REDEFINIERON LA TIERRA: EL CALOR QUE HIZO FLORECER LA VIDA

A lo largo de los 4500 millones de años de la historia de nuestro planeta se han producido muchas variaciones extremas en las temperaturas, desde el calor abrasador durante su formación hasta los períodos más cálidos ocurridos después. Durante la mayor parte de esa larga historia, los períodos cálidos han dominado sobre los fríos, aunque algunos de estos últimos, como has podido leer antes, han sido muy destacados.

En sus orígenes, ya lo sabes, la Tierra era un lugar infernal en el que las temperaturas se elevaban peligrosamente hasta los aproximadamente 2000 °C en la parte superior de la atmósfera. En ese momento, la Tierra era un planeta en proceso de formación, caracterizado por un entorno caótico e inhóspito y chocando con otros cuerpos y escombros rocosos que pululaban por el sistema solar. Esas colisiones mantenían a la Tierra «fundida» con temperaturas propias del mismísimo infierno. En este entorno extremadamente hostil, con temperaturas lo suficientemente altas como para fundir rocas, la Tierra, en sus primeros millones de años, era básicamente una esfera de material fundido. Solo tras cientos de millones de años, el planeta empezó a enfriarse gradualmente, lo cual permitió la formación de una corteza sólida.

---

17. De hecho, la próxima puede haberse retrasado de 50 000 a 100 000 años, debido al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, según un estudio de la revista *Nature* (Ganopolski, A., Winkelmann, R. & Schellnhuber, H. Critical insolation-CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529, 200-203 (2016)).

Si nos quedamos en un tiempo algo más reciente en términos temporales de la historia de la Tierra, sabemos que en los últimos cien millones de años se han registrado dos períodos de calor extremo muy destacados. Durante el Cretácico, hace aproximadamente 145-66 millones de años, el planeta tuvo temperaturas excepcionalmente altas en comparación con las condiciones actuales (entre 5-10 °C más elevadas que las de hoy) y el nivel del mar llegó a estar hasta más de doscientos metros por encima del nivel actual (4). ¿El culpable de este clima tan cálido? Fue principalmente el aumento de dióxido de carbono asociado a la actividad volcánica. Este gas de efecto invernadero atrapaba el calor en la atmósfera, lo cual aumentaba las temperaturas globales.

Con el impacto del meteorito de Chicxulub hace sesenta y seis millones de años finalizó este período y se dio una de las extinciones masivas más importantes acontecidas en la historia del planeta. Causó la desaparición de alrededor del 75 % de todas las especies en la Tierra, incluyendo a los dinosaurios no avianos.

Otro evento que merece la pena mencionar en términos de calor planetario ocurrió durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, hace unos cincuenta y seis millones de años, cuando las temperaturas globales también alcanzaron niveles extraordinariamente altos de entre 5 y 8 °C de media global en apenas 20 000 años. Durante su apogeo, el planeta experimentó condiciones abrasadoras, con temperaturas superficiales del océano tropical alcanzando niveles cercanos a los 40 °C (¡¡más que la temperatura de un jacuzzi!!). Esta cifra es tan elevada que, si los seres humanos hubieran existido en ese entonces, habrían evitado las aguas tropicales, porque superaban la temperatura corporal humana. Conforme las temperaturas se elevaban, comenzó el derretimiento progresivo de los pocos depósitos de hielo existentes, lo cual desencadenó el fenómeno conocido como retroalimentación positiva. Este proceso fue impulsado por la reducción del albedo que, a su vez, contribuyó a un aumento en las temperaturas, y dio lugar a un ciclo de retroalimentación positiva en el que el calentamiento continuaba alimentando aún más el derretimiento del hielo. Era como la pescadilla que se muerde la cola y una cosa llevaba a la otra en un bucle sin freno de calentamiento provocado por esa reducción del albedo.

Como resultado de este proceso, las temperaturas aumentaron de manera más pronunciada en los polos, donde el derretimiento del hielo era protagonista. Esto llevó a que las temperaturas medias anuales en las regiones polares alcanzaran valores de entre 10 y 20 °C. De hecho, para que te hagas una idea, durante gran parte del Paleoceno y principios del Eoceno, los polos estaban libres de casquetes de hielo, y las palmeras y los cocodrilos (5) vivían sobre el Círculo Polar Ártico. ¡Un paisaje totalmente diferente al actual!

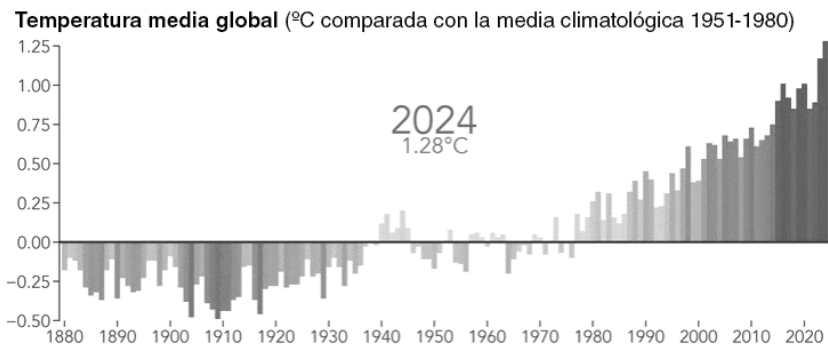
Debido a la fusión del hielo y al aumento térmico del planeta, el nivel del mar ascendió y la circulación de océano cambió. Los arrecifes de coral fueron uno de los organismos más afectados durante este período; experimentaron un enorme declive que prácticamente condujo a su desaparición total. Y ¿por qué sucedió todo esto? Pues, básicamente, el calentamiento durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno fue impulsado por una gran liberación de dióxido de carbono y metano en la atmósfera, un fenómeno muy similar al calentamiento global que experimentamos en la actualidad, pero con la particularidad de que se produjo en un período de tiempo muy largo y sin la intervención del ser humano.

**DURANTE GRAN PARTE DEL PALEOCENO Y PRINCIPIOS DEL EOCENO, LOS POLOS ESTABAN LIBRES DE CASQUETES DE HIELO, Y LAS PALMERAS Y LOS COCODRILOS VIVÍAN SOBRE EL CÍRCULO POLAR ÁRTICO DEBIDO AL CALENTAMIENTO GLOBAL EXISTENTE EN ESE MOMENTO.**

Pero no tenemos que irnos tan lejos en nuestra historia para encontrar momentos en los que el planeta se ha calentado intensamente. Si nos centramos en los últimos 20 000 años hemos tenido varios períodos de clima cálidos: el más reciente (exceptuando el actual, claro) fue el conocido como el periodo cálido medieval, entre aproximadamente el año 900-1300, en plena Edad Media, de ahí su nombre. Durante este momento de nuestra historia, hubo condiciones climáticas relativamente cálidas en varias partes del mundo, en concreto en el hemisferio norte.

En ese momento, y a lo largo de aproximadamente tres siglos, estas condiciones climáticas modificaron los ecosistemas y provocaron cambios radicales en las sociedades humanas de la época. Tanto influyeron que, como curiosidad, este evento cálido está asociado con una serie de momentos históricos relevantes como el florecimiento de la cultura vikinga en Escandinavia y la colonización de Groenlandia por los vikingos (6). Conforme el hielo marino y terrestre del Ártico disminuía debido al aumento de las temperaturas, aparecieron nuevas zonas accesibles y, claro, había que aprovecharlo: los vikingos se aventuraron hacia el norte más allá de sus fronteras habituales y ocuparon nuevas tierras hasta llegar a Groenlandia —que en ese entonces poseía un paisaje más verde y acogedor que en la actualidad— e Islandia, donde establecieron asentamientos, al menos por un tiempo.

Por si todo esto fuera poco, llegamos al tema central de este libro porque nuestro último periodo cálido es el que estamos viviendo hoy; un calentamiento global iniciado con la Revolución Industrial a comienzos del siglo XIX, con la quema de combustibles fósiles y la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero para la generación de energía, la industria, el transporte y otras actividades que necesitábamos desarrollar.



**Figura 0.2.** Evolución de las anomalías de temperatura (desviaciones respecto a la media) desde finales del siglo XIX hasta casi la actualidad. Como puedes ver, este último siglo ha destacado por ser mucho más cálido de lo normal (colores más oscuros). Fuente: Observatorio de la Tierra de la NASA por Michala Garrison, basadas en datos del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA.

Hoy sabemos que estos gases, conocidos como gases de efecto invernadero, desempeñan un papel crucial al actuar como una especie de «invernadero» natural y retener el calor en la atmósfera terrestre. De hecho, sin la presencia de estos gases en su justo equilibrio, la temperatura promedio en la Tierra sería de alrededor de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la vida tal y como la conocemos no existiría. Es más, si se eliminara todo el dióxido de carbono, el efecto invernadero terrestre colapsaría y la temperatura de la superficie de la Tierra disminuiría significativamente, en aproximadamente  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ninguno de nosotros estaría aquí. Sin duda, estos gases resultan sumamente importantes, pero el problema aparece cuando su concentración, y la del resto de gases de efecto invernadero, se desequilibra. Algo que lleva pasando desde hace décadas.

### **EL CALENTAMIENTO GLOBAL ACTUAL COMENZÓ HACE CASI DOS SIGLOS Y SE DEBIÓ AL IMPACTO DE LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL EN EL CLIMA.**

Como bien estas leyendo, a diferencia de los cambios climáticos acontecidos en nuestro pasado, el actual calentamiento global está provocado por causas que recaen sobre el ser humano (nuestra actividad, nuestra forma de vivir, de producir, de consumir...) y se ha desarrollado a una velocidad vertiginosa.

No obstante, en contraste con la mayor parte de la historia de la Tierra y con todo lo leído anteriormente, podemos decir que la temperatura actual es inusualmente baja (claro, imagínate, si la comparamos con sus orígenes o con eventos antes comentados). Nos encontramos actualmente en lo que los geólogos denominan un momento interglaciar, un intervalo de tiempo entre las fases glaciales de una era de hielo, caracterizado por temperaturas más cálidas y una menor extensión de los glaciares en comparación con los períodos glaciales. Sin embargo, a medida que las emisiones de gases de efecto invernadero continúan calentando el planeta y los efectos del cambio climático siguen retroalimentándose, existe la posibilidad de

que nuestro planeta haya experimentado su última glaciación, al menos durante un muy largo período de tiempo. Este escenario actual, en el que ahondaremos en este libro, plantea grandes preguntas sobre el futuro climático de la Tierra, la estabilidad de nuestros ecosistemas y la posibilidad de nuevas extinciones en un mundo en un constante *cambio*.

