CAUSAS DEL CAMBIO EN EL CLIMA

Javier Cano Sánchez

Podemos tener una sucesión de veranos secos, o inviernos suaves, o primaveras tempestuosas u otoños lluviosos, pero las cosas siempre vuelven a su cauce y nada se convierte en auténticamente insuperable. Isaac Asimov, Las amenazas de nuestro mundo.

Si consideramos el clima como el conjunto medio de las condiciones atmosféricas que caracterizan a una región tales como precipitación, temperatura, humedad, horas de insolación, velocidad del viento y otros fenómenos meteorológicos, durante un periodo más o menos largo, podemos pensar que el clima se presenta sin apenas variaciones generación tras generación, salvo en sus valores extremos. Probablemente esto es así, siempre y cuando la escala de tiempo sea relativamente pequeña, tal vez de algunos cuantos siglos. Sin embargo, cuando nos situamos en una escala de tiempo mayor (por ejemplo, considerando toda la historia geológica de la Tierra, es decir, los últimos 4.700 millones de años) la situación es bien diferente pues, como dijera hace 24 siglos en un célebre aforismo, el filósofo griego Heráclito, *todo cambia... de forma continua y perpetua*. ¡Hasta el clima!

Ciertamente, el clima de la Tierra ha cambiado muchas veces de forma gradual y lenta, excepto en determinadas ocasiones, igual que los procesos de modelación de la superficie terrestre transforman el paisaje o la evolución biológica hace desaparecer y aparecer nuevas especies. Estos cambios no suponen una catástrofe porque plantas y animales, incluido el hombre, se adaptan progresivamente a las nuevas condiciones o se trasladan a zonas favorables. Lo que sí supondría un auténtico desastre es que la velocidad de ese cambio se produjera en un lapso de tiempo relativamente corto.

Veamos, por tanto, cuáles son los mecanismos que intervienen en la modificación del clima de la Tierra haciendo un recorrido a través del tiempo desde la formación del planeta hasta nuestros días. Como veremos, estos mecanismos actúan de manera independiente pero sus consecuencias pueden tener efectos sinérgicos si las condiciones son apropiadas para ello.

Periodo de miles de millones de años

Primera causa: la evolución estelar.- Tras la formación del Sistema Solar, hace unos 5.000 millones de años, la Tierra carecía de atmósfera y clima en sus primeros comienzos. La temperatura media de su superficie era tan caliente que el agua permanecía siempre en estado gaseoso. El Sol era hasta un 25% menos luminoso que ahora, según una moderna teoría de la evolución de las estrellas, generalmente aceptada por los astrofísicos, que dice que las estrellas se tornan más calientes cuando envejecen.

Desde hace miles de millones de años el Sol parece haber existido en una forma muy similar a la que exhibe hoy día, aunque en los últimos 6.000 años se sabe, gracias a los resgistros astronómicos dejados por las primeras civilizaciones, que el diámetro total del Sol se ha contraído unos 900 kilómetros (de un diámetro de 1.390.000 km). Pero aún sigue siendo una estrella relativamente joven.

Sin embargo, dentro de unos 8.000 millones de años nuestro Sol comenzará a expandirse para convertirse en una gigante roja y entonces el clima de la Tierra tendrá, otra vez, una temperatura tan elevada que los océanos de la Tierra empezarán a hervir y desaparecerá todo signo de vida.

Segunda causa: la rotación de la Tierra.- En la actualidad la Tierra gira sobre su eje dando una vuelta cada 24 horas. Parte de la energía de rotación se consume convirtiéndose en calor y perdiendo algo de su velocidad de rotación. Esto significa que el día se alarga a razón de un segundo cada 62.500 años, según han calculado los astrónomos.

Si retrocedemos en el tiempo, después de la formación de la Tierra, el día pudo tener unas 12 horas de duración. Hace 3.500 millones de años duraba menos de 18 horas y hace 400 millones de años, 22,2 horas. Este acortamiento inicial del día podría suponer que la temperatura de la Tierra primitiva tuviese una oscilación térmica diaria pequeña, al disponer menos tiempo para calentarse durante un día corto, y menos tiempo para enfriarse durante una noche corta.

Con el alargamiento progresivo del día, lo que sucederá dentro de millones de años, hará más frío por la noche y más calor por el día.

Tercera causa: la composición de los gases de la atmósfera.- La composición de los gases de nuestra atmósfera no siempre ha sido la misma, sino que ha variado a lo largo del tiempo, repercutiendo sensiblememente en la temperatura de la superfice terrestre.

Al comienzo de la formación de la Tierra, los gases expulsados a medida que la corteza terrestre se solidificaba formaron la primera atmósfera, rica en dióxido de carbono, que sería el gas dominante en una proporción del 20% en volumen. Como no existía oxígeno libre en la atmósfera, ni tampoco una capa de ozono en la estratosfera, la intensidad de la radiación ultravioleta sobre la superficie era unas 30 veces mayor que la actual. La temperatura media que alcanzó en aquellos momentos la Tierra fue de 50° C o más.

Sin embargo, a lo largo de un periodo que ha durado más de 3.000 millones de años, el dióxido de carbono ha pasado de ser el gas principal de la atmósfera a tener tan sólo el 0,035% actuales, mientras que el nitrógeno y el oxígeno son los componentes fundamentales de esta nueva atmósfera con un 78,08% y un 20,95%, respectivamente. Esta situación, debida principalmente a la actividad fotosintetizadora de las plantas verdes, ha hecho que la temperatura media de la superficie de la Tierra haya descendido hasta los 15° C de hoy.

Período de cientos de millones de años

Cuarta causa: la deriva continental.- Entre los años 1910 y 1920 el geólogo alemán Alfred Lothar Wegener desarrolló una teoría sugiriendo que todos los continentes existieron inicialmente como un bloque único, llamado *Pangea* (literalmente, toda la tierra). Para ello se basó en la semejanza de las líneas de costa entre los continentes actua-

les, en la coincidencia de los restos fósiles de flora y fauna, y por la presencia de sedimentos consolidados de origen glaciar en regiones donde ahora ya no existen.

Cuando alguna parte del continente *Pangea* se desplazaba hacia un polo, se formaban glaciares. Si no, el clima era cálido. Por alguna razón, este supercontinente sufrió tensiones por debajo de él y se rompió en enormes bloques que fueron a la deriva, durante varios cientos de millones de años, cambiando de latitud, hasta terminar en la disposición continental de hoy. Así por ejemplo, hace unos 250 millones de años, durante el *Pérmico*, hubo un periodo glacial en Brasil, Sudáfrica, la India y en algunas zonas de Australia, regiones que permanecieron cubiertas de hielo como lo están ahora Groenlandia o la Antártida, debido a que en aquella época estuvieron reunidos alrededor del que entonces era el Polo Sur; o también, el subcontinente indio, fragmento de uno mayor llamado *Gondwana*, comenzó a derivar en dirección al continente asiático a partir del *Cretácico superior*, hace 120 millones de años, y a una velocidad de 18 cm/año, pasando de tener un clima templado-frío ha otro de tipo monzónico.

Período de miles de años

Quinta causa: la caída de cometas, asteroides y meteoritos.- Si miramos detenidamente la Luna podemos observar que su superficie presenta una serie de círculos de diferentes tamaños que bien nos podrían recordar los cráteres de los volcanes. Sin embargo, en nuestro satélite no existe actividad volcánica reciente. ¿Qué pueden ser?. Efectivamente son cráteres aunque de origen bien diferente.

A lo largo de miles de millones de años la superficie lunar ha sido, y sigue siendo, bombardeada por millones de meteoritos que han producido cráteres de impacto de diversa magnitud. Los más grandes, y visibles desde la Tierra, son el brillante cráter Copérnico, el enorme cráter Tycho o el cráter en forma de estrella Giordano Bruno. Pero, igual que en la Luna, también se han producido impactos de meteoritos, asteroides y cometas sobre la superficie de la Tierra causando, además de cráteres, otro tipo de efectos.

Hace 214 millones de años, en el *Triásico*, un asteroide o cometa se fragmenta y uno de los trozos cae en la provincia canadiense de Québec creando el cráter Manicouagan, de 100 km de diámetro. Las consecuencias que tuvieron lugar aún se desconocen pero hoy día es un gran lago de agua dulce y uno de los cráteres de impacto más grandes de la Tierra.

Al final del *Cretácico*, hace 65 millones de años, el planeta estaba cubierto desde el Ecuador hasta los 50° de latitud por una flora tropical exhuberante. Un meteorito de 14 km de diámetro se estrellaba en la región de Yucatán con tanta violencia, impactó a una velocidad de 65.000 km/h, que la energía desatada por el choque supuso 1.000 millones de megatones (equivalente a 50 millones de bombas atómicas como la que se arrojó sobre Hiroshima). Según la teoría del impacto, elaborada por los profesores norteamericanos, descendientes de asturianos, Luis Alvarez (premio Nobel de Física en 1968) y su hijo Walter, el cráter que originó tenía, y tiene en la actualidad, unos 300 km de diámetro. El polvo levantado oscureció el cielo de la Tierra a escala planetaria, los mares inundaron algunas regiones continentales y el clima experimentó un enfria-

miento durante milenios tan acusado que provocó la extinción de gran parte de la fauna y la flora, unas dos terceras partes de todas las especies, incluidos los dinosaurios.

Sexta causa: la teoría astronómica de los periodos glaciales.- El geólogo yugoslavo, de origen serbio, Milutin Milankovich sugirió, en la década de los años veinte, que existía un gran ciclo en las condiciones atmosféricas como resultado de unos pequeños cambios periódicos en la órbita de la Tierra y la inclinación y el giro lateral de su eje. Habló de un *gran invierno* durante la época glacial, y un *gran verano* en los periodos interglaciares.

Inicialmente, se inspiró en el trabajo de James Croll (siglo XIX) quien consideraba sólo dos factores: la variación de la excentricidad de la órbita terrestre, que pasa de un círculo casi perfecto a una elipse muy marcada, durante un ciclo orbital que dura entre 90.000 y 100.000 años; y el giro lateral del eje de la Tierra, que describe un cono en el espacio (llamado movimiento de precesión) al no permanecer siempre inclinado en la misma dirección, cuya revolución completa requiere 25.789 años. Milankovich añadió otro tercer factor: el ángulo de inclinación del eje de rotación terrestre, que oscila desde 21,8° hasta 24,4°, en el transcurso de un periodo regular de unos 40.000 años.

Tras el análisis de las variaciones en los ritmos de la geometría Tierra-Sol, Milankovich supuso que la glaciación ocurriría durante las épocas en que la cantidad de radiación recibida en las altas latitudes fuese mínima, o sea, tenían que darse las siguientes circunstancias: 1º) que cuando la Tierra estuviese en su posición más próxima al Sol fuera verano en el hemisferio norte, y no invierno, como hoy, de modo que el solsticio de verano sería el 21 de diciembre y el solsticio de invierno el 21 de julio (esto ocurrirá dentro de algo más de 12.000 años), y 2º) que la inclinación del eje de la Tierra fuese la más pequeña, lo que significa que ambos hemisferios de la Tierra reciben menos radiación en verano y más en invierno (en el año 2000 la inclinación del eje es de 23,44°, y está disminuyendo).

En el presente la órbita de la Tierra es casi circular, con una excentricidad próxima a cero (siendo la mayor excentricidad del 6%); el *perihelio* o punto de máxima proximidad al Sol se produce el 3 de enero, recibiendo un 7% más de radiación, y el *afelio* el 6 de julio. Ambos, *perihelio* y *afelio*, varían de lugar completando un círculo alrededor del Sol cada 21.310 años, es decir, cada 58 años los días del *perihelio* y *afelio* saltan un día en nuestro calendario. Cuanto menor sea la excentricidad de la órbita terrestre alrededor del Sol, menor será la diferencia en el grado de calor que recibe la Tierra y menor contraste entre el invierno y el verano.

Por otra parte, el climatólogo alemán Vladimir Köppen sugirió que lo que conduce a una glaciación es una reducción de la insolación en verano, y no una sucesión de inviernos muy rigurosos. Cuando los inviernos son suaves (irónicamente se producen las máximas nevadas) y los veranos son frescos, hay mucha nieve y poca fusión, siendo esta la mejor forma de crear un nuevo periodo glaciar, porque la nieve se mantiene a lo largo del año.

De acuerdo con el modelo Milankovich, por el momento todas las observaciones y pruebas que se han venido realizando no han contradicho esta teoría, los periodos glaciales sólo pueden desarrollarse en el norte cuando los giros de la Tierra posibilitan

veranos fríos, mientras que para la creación de periodos glaciales en el sur, lo que necesitamos son inviernos muy rigurosos (el verano del norte coincide con el invierno del sur).

Si la naturaleza sigue su curso, nos aproximamos con rapidez a una configuración orbital apta para un próximo periodo glacial que debe comenzar dentro de 4.000 ó 5.000 años, y duraría unos 100.000 años.

Séptima causa: los cambios del campo magnético terrestre.- El campo magnético de la Tierra cambia de fuerza y dirección cada 1.000 ó 2.000 años, y de sentido cada 450.000 años de promedio, aunque este último varía desde los 3 millones de años hasta los 50.000 años. El polo magnético no coincide con el geográfico y su posición se altera todos los años.

Según el grupo de trabajo de Goesta Wollin y David Ericson, dos físicos norteamericanos, cuando el campo magnético terrestre es más débil, los rayos cósmicos pueden penetrar en la baja atmósfera más fácilmente, produciéndose un calentamiento. En la actualidad el campo magnético se está debilitando.

Períodos cortos

Octava causa: la influencia de los planetas.- Cada 179 años acontece un *sínodo* o conjunción de los planetas, es decir, cuando todos ellos se encuentran al mismo lado del Sol y agrupados en la misma parte del cielo (según se ve desde la Tierra).

Desde el año 1.300 d. C. hasta la actualidad, se han asociado los *sínodos* con décadas frías en la Tierra. Esto se debe a que el equilibrio de masas planetarias está descompensado, haciendo que la órbita terrestre se alargue de forma real en 1,5 millones de km (un 1% de su distancia media al Sol). Como este cambio es significativo se reduce la cantidad de calor que llega a la superficie de la Tierra.

Novena causa: la actividad de las manchas solares.- El Sol obtiene su energía como resultado de ciertas reacciones nucleares que se operan en su interior, transformando 654,6 millones de toneladas de hidrógeno por segundo en 650 millones de toneladas de helio, mientras que 4,6 millones de toneladas se convierten en energía nuclear de fusión. La temperatura de su superficie es de 6.000° C y la de su núcleo es de unos 15 a 20 millones de grados. El 2% de la energía de la luz solar mantiene la fotosíntesis de todas las plantas verdes y la vida animal de la Tierra.

Sin embargo, el sistema de radiación del Sol no es del todo uniforme, ya que, su superficie se encuentra salpicada de manchas solares, cuyo diámetro supera los 130.000 km. Como la temperatura que alcanzan estas manchas es relativamente baja aparecen como zonas oscuras que destacan contra un fondo que es más caliente y brillante.

A lo largo de un ciclo de 11 años de duración, las manchas solares aparecen y desaparecen desde un mínimo (*Sol tranquilo* o *inmóvil*) hasta un máximo (*Sol tormentoso* o *activo*). Estas manchas son centros de intensa actividad magnética. Cuando se fun-

de un grupo de ellas suele desarrollarse una región explosiva enormemente caliente, emitiéndose grandes cantidades de rayos x, ultravioletas, luz visible, energía radiante de onda larga y partículas cargadas eléctricamente (originando el viento solar). Cuantas más manchas, más aumenta la actividad solar y la troposfera se calienta: el calor emitido por el Sol cuando tiene manchas (80-100%) es un 2% mayor que cuando no las tiene.

Décima causa: la actividad volcánica.- Alrededor de unos 500 volcanes, repartidos por todos los continentes, están activos en la actualidad. De ellos, unos 170 emiten permanentemente cenizas y gases a la atmósfera, aunque sólo unos cuantos los expulsan hacia la alta atmósfera de forma violenta. Las cenizas, al mantenerse en suspensión durante dos o tres años como máximo, provocan un enfriamiento como consecuencia de la disminución de la cantidad de radiación directa que viene del Sol.

Desde 1980 las mayores erupciones registradas, considerando sólo la cantidad de cenizas emitidas a la atmósfera, han sido: el Mount Saint Helens (USA) en 1980, el Heckla (Islandia) en 1981, El Chichón (México) en 1982, el Galunggung (Indonesia) en 1982, el Oyama (Japón) en 1983, el Gunungapi (Indonesia) en 1988, el Pinatubo (Filipinas) en 1991, el Unzen (Japón) en 1991, el Mayón (Filipinas) en 1993 y el Rabaul (Papúa Nueva Guinea) en 1994.

Por ejemplo, El Chichón, volcán situado en el estado mexicano de Chiapas, tuvo tres erupciones en un breve espacio de tiempo: el 28 de marzo, la nube de cenizas alcanzó los 20 km de altura; el 3 de abril, algo menos de 20 km; y el 4 de abril, llegó a los 26 km. Las cenizas y el polvo volcánico alcanzó la isla de Hawai el 9 de abril; Japón el 16; el mar Rojo el 20 y el 26 había completado la vuelta al globo. La temperatura de la estratosfera ecuatorial subió unos 4° C, mientras que la temperatura del hemisferio norte descendió alrededor de 0,4° C hacia finales de 1983.

Ultima causa: la actividad antropogénica.- Es la más reciente de todas, y hasta ahora nunca se había producido antes debido al desarrollo que está llevando a cabo la humanidad, especialmente en este último y devastador siglo XX. Situaciones ambientales tan difíciles de resolver como el crecimiento de la población, que demanda cada vez más el consumo de recursos naturales y energía, la escasez de agua dulce, la contaminación del suelo y los océanos, la desaparición de los bosques, y el aumento de las emisiones globales de dióxido de carbono, entre otros, están deteriorando progresivamente la calidad de vida en nuestro planeta y contribuyen, poco a poco, a la variación en las concentraciones de ciertos gases traza de la atmósfera.

Los expertos de todo el mundo coinciden en señalar que el daño que estamos produciendo a nuestra atmósfera puede hacer aumentar la temperatura global de la superficie terrestre, provocar alteraciones en la distribución del régimen de precipitaciones para el próximo siglo, agravar determinados fenómenos climáticos extremos cuyas consecuencias serán todavía más devastadoras (sequías, inundaciones,...), e incrementar la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra.

Como consecuencia, una evolución natural que ha durado miles de millones de años de tiempo, como es la de nuestra actual atmósfera, se está viendo alterada con una rapidez sin precedentes debido a nuestro modo de vida actual, poco respetuoso

con la naturaleza. La tendencia, todavía plagada de grandes incertidumbres, que adquieran estas variaciones en un futuro próximo dependerá, esencialmente, del nivel de compromiso y del escenario que elijamos en el presente. Como ha dicho James Lovelock, autor de la teoría de *Gaia*, en un planeta que actúa como si fuera un organismo vivo, *la atmósfera es la cara del planeta y muestra cuál es su estado de salud e incluso si está vivo o muerto*. No podemos posponer los remedios por más tiempo.

Bibliografía

Asimov, I. 1973. *El Universo*. Alianza Editorial, S.A. Madrid.

Breuer, G. 1983. *El aire en peligro*. Alhambra S.A. Madrid.

Cano, J. 1994. *Grandes erupciones volcánicas y su influencia en el clima*. Calendario Meteorológico 1994, MOPTMA. Madrid.

Gribbin, J. 1981. *Génesis. Los orígenes del Hombre y del Universo*. Biblioteca Científica Salvat; Salvat Editores, S.A. Barcelona.

Gribbin, J. 1987. *El clima futuro*. Biblioteca Científica Salvat; Salvat Editores, S.A. Barcelona.

Hallam, A. 1976. *De la deriva de los continentes a la tectónica de placas*. Labor S.A. Barcelona.

Lovelock, J. 1993. *Las edades de Gaia. Una biografía de nuestro planeta vivo.* Tusquest Editores. Barcelona.

Rampino, M. R. y Self, S. 1984. *Efectos atmosféricos de El Chichón*. Investigación y Ciencia.

Smoluchowski, R. 1986. *El sistema solar.* Biblioteca Scientific American; Labor S.A. Barcelona.

Varios autores. 1983. *El libro del clima*. Hermann Blume Ediciones. Barcelona.

Varios autores. 1991. *El clima*. Libros de investigación y ciencia. Barcelona.