



¿POR QUÉ CAMBIA EL CLIMA?

LOS FENÓMENOS QUE CONFIGURAN EL CLIMA DE LA TIERRA Y LOS FACTORES QUE EXPLICAN LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS

Josep Calbó

Así como un coche modifica la velocidad si pasa de ir por llano a subir una rampa o si se aprieta el acelerador, el clima de la Tierra cambia si se modifica el valor de los equivalentes climáticos a la pendiente o a la fuerza de tracción del motor, sea por la causa que sea. Antes de explicar cuáles son los factores que configuran el clima de la Tierra, y si están o no cambiando, es bueno que nos paremos a definir el concepto clave de este artículo: el clima. Se puede decir que el clima es la estadística del tiempo meteorológico a lo largo de un período relativamente largo de tiempo cronológico y para un determinado territorio. Así, el área para la que se define el clima puede ser tan pequeña como unos pocos kilómetros cuadrados (en este caso, a menudo se habla de microclima). Pero es más habitual hablar de clima de un territorio más extenso, limitado o no políticamente, donde las características geográficas y meteorológicas sean más o menos comunes (el Mediterráneo occidental, el Sáhara...). También se puede generalizar aún más el término, y hablar del clima global, es decir, para toda la Tierra.

Por lo que respecta a las variables que se incluyen en una climatología, a menudo se limitan a la temperatura del aire y la precipitación. Pero se pueden hacer estudios climáticos de muchas variables más: el viento, la radiación solar, la nubosidad... o combinarlas para obtener una descripción más completa. En relación con la caracterización estadística, lo más simple es limitarla a la media correspondiente a una determinada base temporal (anual, por ejemplo) pero una descripción completa del clima requiere también la de las variaciones a lo largo del año y de los extremos de las distribuciones; es decir, los fenómenos que se dan extraordinariamente pero que pueden tener efectos relevantes (Martín Vide, 2002).

■ ¿POR QUÉ TENEMOS EL CLIMA QUE TENEMOS?

De entrada tenemos que decir que nos referiremos al clima de toda la Tierra y lo caracterizaremos por una

sola variable: la temperatura media del aire en la superficie, que actualmente es próxima a 15°C. Por tanto, lo que queremos explicar es por qué la temperatura del aire en la superficie de la Tierra es precisamente de 15°C.

La Tierra intercambia energía con el resto del Universo, así que tiende a alcanzar un equilibrio entre la energía que recibe y la que emite. Como el intercambio de energía solo se puede hacer mediante radiación (dado que el espacio alrededor del planeta está vacío), se dice que la Tierra se encuentra en balance radiativo. Así, la Tierra recibe energía proveniente del Sol: la radiación solar, básicamente luz visible pero también radiación ultravioleta y en el infrarrojo próximo. Dada

la actividad actual del Sol, y la distancia a la que la Tierra orbita alrededor del astro, la radiación media a lo largo del año que llega sobre un metro cuadrado de superficie horizontal perpendicular al haz solar es de 1367 W (valor que se llama *constante solar*, lo que ya indica que varía muy poco, por lo menos en escalas de tiempo relativamente cortas). Como el haz solar no llega a toda la Tierra

perpendicularmente, y como en cualquier momento la Tierra tan solo expone la mitad de su superficie al Sol, el valor efectivo de energía solar que llega a toda la Tierra de media resulta ser la cuarta parte, 342 W/m².

Si fuese absorbiendo continuamente esta energía y no tuviese algún mecanismo digamos de enfriamiento, la Tierra se iría calentando. Pero la Tierra no absorbe toda la energía solar que le llega. Una determinada fracción, cuantificada con el llamado albedo planetario, es reflejada de nuevo hacia el espacio. Esta energía reflejada no calienta la Tierra, y por tanto, el albedo terrestre es un factor muy importante. Por otra parte, la ley de Planck nos dice que todo cuerpo que se encuentra a una temperatura por encima del cero absoluto emite radiación. Así, la Tierra emite radiación, y dadas las temperaturas habituales la radiación emitida corresponde al infrarrojo térmico, que en el contexto climático se llama radiación terrestre, para distinguirla de la solar.

«LA TIERRA INTERCAMBIA ENERGÍA CON EL RESTO DEL UNIVERSO, ASÍ QUE TIENDE A ALCANZAR UN EQUILIBRIO ENTRE LA ENERGÍA QUE RECIBE Y LA QUE EMITE»

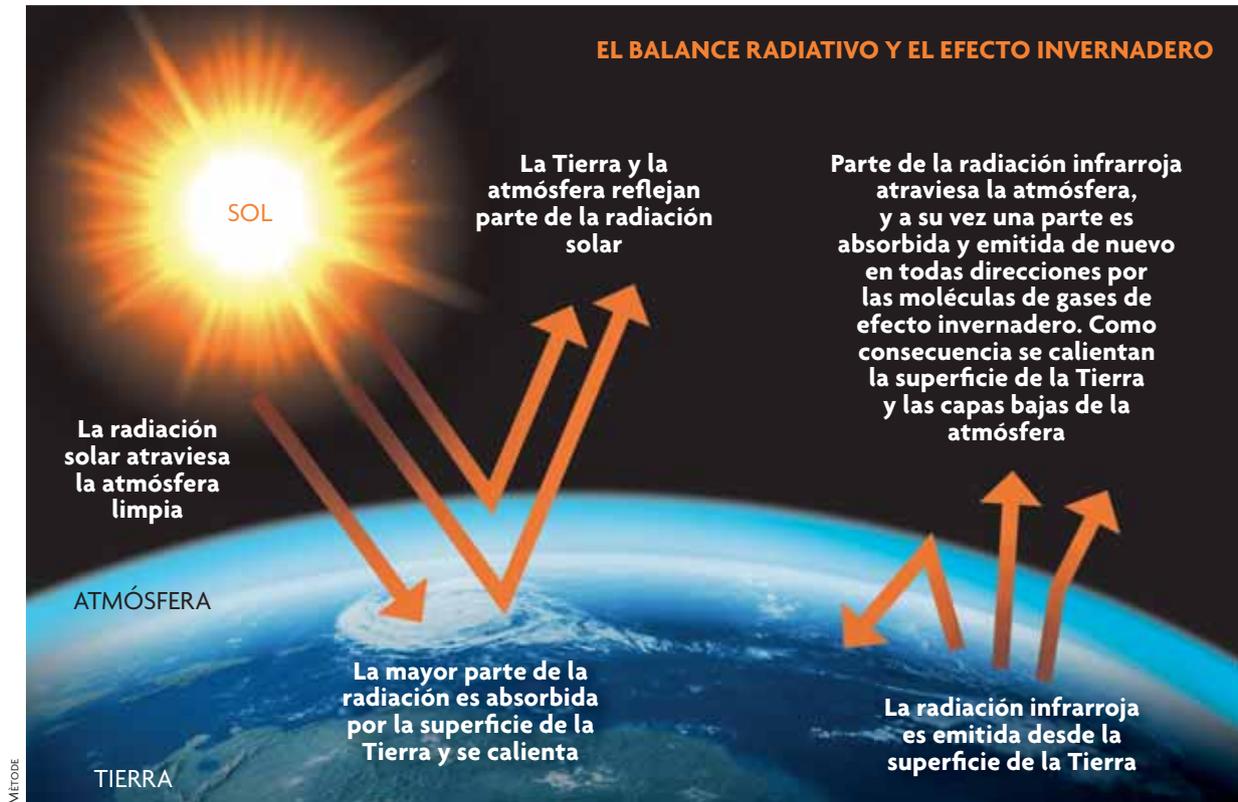


Figura 1. Esquema simplificado del balance energético en el planeta Tierra, considerando el efecto invernadero causado por la atmósfera.

Pues bien, si el clima de la Tierra dependiese solo del balance entre la radiación solar neta absorbida (es decir, la diferencia entre la que procede del Sol y la que es reflejada) y la radiación terrestre emitida, la temperatura estaría muy por debajo de la que actualmente observamos. Por tanto, para explicar el clima de la Tierra necesitamos un segundo elemento: la atmósfera. La atmósfera es la capa formada básicamente por una mezcla de gases, el aire, que rodea la Tierra. Además de gases, la atmósfera contiene partículas, que si son de agua o de hielo y se presentan en bastante abundancia en un determinado lugar y momento constituyen las nubes, mientras que si son de otras composiciones se llaman en general aerosoles. Las nubes afectan sensiblemente al balance radiativo. Principalmente porque las nubes reflejan radiación solar hacia el espacio de manera muy eficiente, como sabe cualquier persona que haya volado en avión por encima de una capa de nubes: vistas desde arriba, las nubes son muy blancas. Con las nubes, el albedo del

planeta pasa a ser del 30%. Lógicamente, si la cantidad de radiación solar reflejada es más grande, la que es absorbida es más pequeña, es decir que, si tenemos en cuenta este efecto de las nubes, la temperatura de la Tierra sería aún más baja, unos 18°C bajo cero.

**«LA TIERRA NO ABSORBE
TODA LA ENERGÍA SOLAR
QUE LE LLEGA. UNA
DETERMINADA FRACCIÓN,
CUANTIFICADA CON
EL LLAMADO ALBEDO
PLANETARIO, ES REFLEJADA
DE NUEVO HACIA EL
ESPACIO»**

Afortunadamente, la atmósfera tiene otro papel en el balance radiativo. Se trata de que algunos gases que forman parte del aire tienen la propiedad de absorber radiación de determinadas longitudes de onda. Estos gases no son en absoluto los más abundantes en la atmósfera (el nitrógeno y el oxígeno) sino otros que se encuentran en concentraciones mucho más bajas: el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano, el óxido nitroso, el ozono y otros gases aún más raros.

Estos gases presentan bandas de absorción en la región del infrarrojo térmico, es decir, que absorben radiación terrestre. Por tanto, la atmósfera absorbe radiación terrestre, lo que impide que parte de esta energía escape hacia el espacio; es decir, reduciendo el enfriamiento. Este fenómeno se conoce

como *efecto invernadero* y depende, lógicamente, de la cantidad de gases con esta propiedad que exista en la atmósfera, y también de sus características concretas (hay gases que, por unidad de masa, presentan un efecto invernadero mucho mayor que otros). Además, las nubes no solo reflejan radiación solar hacia el espacio, sino que también son eficientes absorbedoras de radiación terrestre y por tanto contribuyen al efecto invernadero. También los aerosoles representan un papel: los hay que tienen un efecto dominante de reflexión de la radiación (solar) mientras que otros son eficientes absorbedores de todo el espectro de radiación (solar y terrestre).

Ahora bien, si determinamos la temperatura que tiene que tener la superficie de la Tierra para que, con una emisividad reducida por el efecto invernadero, compense la radiación solar absorbida, esta resulta ser de unos 15°C. Los

flujos de energía, en forma de radiación, que configuran el balance energético que da lugar a esta temperatura se representan, esquemáticamente, en la figura 1.

**«CUALQUIER MODIFICACIÓN
DE LA RADIACIÓN SOLAR
INCIDENTE SOBRE LA
TIERRA O DEL EFECTO
INVERNADERO NATURAL DE
LA ATMÓSFERA MODIFICA EL
BALANCE ENERGÉTICO
Y PROVOCA CAMBIOS
EN EL CLIMA»**

■ **LOS CAMBIOS DEL CLIMA**

Si analizamos la evolución del clima de la Tierra a lo largo de toda su existencia, encontraremos que a escalas de miles de millones de años, el clima ha variado muy sustancialmente. Estos cambios están relacionados directamente con los cambios en la energía emitida por el Sol (como todas las estrellas, el Sol evoluciona, y ha ido –y aún va– aumentando su luminosidad), y los cambios en la composición de la atmósfera terrestre (por ejemplo, desde la

aparición de la vida sobre la Tierra se han extraído de la atmósfera grandes cantidades de CO₂ gracias a la fotosíntesis, que a su vez ha liberado el oxígeno que ac-





Figura 2. Concentraciones de CO_2 , metano (CH_4) y óxido nítrico (N_2O) (de arriba abajo) en la atmósfera durante la era industrial (derecha) y desde el año 0 hasta el 1750 (izquierda). Los puntos provienen de determinaciones indirectas (aire retenido en el hielo) mientras que las líneas continuas indican medidas directas de las concentraciones en el observatorio de Cape Grim, en Tasmania. Se muestra claramente el crecimiento, exponencial, de las concentraciones de los tres gases desde la Revolución Industrial. Reproducción de la figura 6.11 del quinto informe del IPCC (Ciais et al., 2013).

tualmente es el segundo gas más abundante) (Uriarte, 2003). Pero situémonos en escalas temporales mucho más cortas y próximas, por ejemplo el último millón de años, es decir en períodos en que el Sol básicamente no ha cambiado de luminosidad, en que los continentes y océanos presentan una distribución igual a la actual, y en que la composición atmosférica puede considerarse invariable en lo referente a los gases más abundantes.

Los cambios en el clima más destacados en este período «reciente» son los ciclos de glaciación-interglaciación. Se trata de períodos más fríos que el presente (con temperaturas 6-10°C por debajo de la actual), de unos 100.000 años de duración, en que los casquetes polares se extienden hasta latitudes medias y el nivel del mar se encuentra muy por debajo del actual; seguidos de períodos de unos 20.000 años de duración con un clima similar al presente. Estos ciclos se relacionan

causalmente con los ciclos de los parámetros orbitales de la órbita terrestre alrededor del Sol (Milankovitch, 1920). En efecto, la órbita modifica la excentricidad (es decir, es más o menos circular o elíptica), la oblicuidad (la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto del plan de la eclíptica) y la precesión de los equinoccios (en qué fecha la Tierra se encuentra más próxima al Sol) en varios ciclos superpuestos de decenas de miles de años. La combinación de estos ciclos no modifica de forma muy importante la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra, pero sí que hace variar notablemente el reparto de la radiación entre los hemisferios y a lo largo del año. Dada la presencia de más tierras emergidas en el hemisferio norte, parece que una disminución de la radiación incidente los meses de verano en este hemisferio es el origen del enfriamiento global que acaba provocando una glaciación. Pero para

explicarlo hay que recurrir a varias retroacciones positivas, es decir, que refuerzan la causa original.

La primera de las retroacciones es la del hielo y el albedo. Si en verano llega menos radiación, se funde una fracción menor de la nieve caída en invierno. La presencia de más nieve aumenta el albedo planetario, lo que quiere decir que se absorbe menos radiación solar, hecho que incrementa el enfriamiento. Dos retroacciones más tienen que ver con gases con efecto invernadero. Por una parte, un inicio de enfriamiento disminuye el contenido de vapor de agua en la atmósfera (ya que se reduce la evaporación y también el nivel saturante del vapor de agua en el aire). Por otra parte, el CO₂ es absorbido más eficientemente por los océanos, tanto por el cambio de la solubilidad como por el aumento de actividad fotosintética de cierto fitoplancton. Obviamente, menos vapor de agua y CO₂ significa menor efecto invernadero y por tanto, más enfriamiento. Tampoco hay que olvidar el papel de la circulación oceánica global, que es muy sensible a la temperatura del Atlántico Norte. En realidad, los cambios en la circulación oceánica son fundamentales para explicar la globalización de un enfriamiento que inicialmente es hemisférico. La secuencia de causas y retroacciones se invierte al final del período glacial, y da pie a los períodos interglaciares, como el que disfrutamos actualmente.

De todas formas, incluso dentro de los períodos interglaciares, el clima no se mantiene constante. Por ejemplo, hacia el final de la última glaciación (cuando la temperatura media había aumentado hasta niveles similares al actual) la Tierra se volvió a enfriar de forma bastante súbita, en el período conocido como *younger Dryas* (Dryas reciente). Aunque la explicación de este enfriamiento no está clara, parece que la circulación oceánica, debilitada por la aportación de agua dulce y fría procedente de la fusión del hielo, en el Atlántico Norte, representó un papel muy importante. Ya en el último milenio, se habla del «óptimo climático medieval» y de la «pequeña edad de hielo», terminología que es bastante autoexplicativa. En esta última época, que corresponde al período entre los si-

glos XIV y XIX, con un mínimo de temperatura hacia finales del siglo XVIII, el enfriamiento (temperaturas 1-2°C inferiores a las actuales) fue global, aunque se encuentra documentado sobre todo en Europa. De nuevo, las causas tienen que ver con la radiación solar (y en particular con el llamado mínimo de Maunder, unos decenios en los que no se detectaron manchas solares, lo que indica una disminución de la actividad del Sol) y con la composición atmosférica (se considera que fue un período de gran actividad volcánica durante el cual

había más aerosoles en la atmósfera, que reflejaban más radiación solar hacia el espacio).



MÉTODE

**«LA CUESTIÓN ABIERTA
AHORA ES, PUES,
CUÁL ES EL CAMBIO
CLIMÁTICO FUTURO AL
QUE LA HUMANIDAD
SERÁ CAPAZ DE ADAPTAR
SUS ESTRUCTURAS
SOCIOECONÓMICAS»**

■ EL CAMBIO CLIMÁTICO ANTROPOGÉNICO CONTEMPORÁNEO

En los últimos decenios, el clima de la Tierra también ha ido cambiando. Este cambio contemporáneo, que además es muy rápido, es lo que ha provocado la constitución del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, de las siglas en inglés), el cual periódicamente emite los informes que integran todo el conocimiento que se va generando sobre el tema (Pachauri et al., 2014).

Concretamente, las observaciones de la temperatura, disponibles de manera global, indican que en el período 1880-2012 la temperatura media ha subido 0,85°C, aumento que en buena parte se ha concentrado en los últimos cuarenta años. Cada uno de los últimos tres decenios ha sido más cálido que el anterior, y se considera que todos ellos han sido los más cálidos del último milenio. En este caso, la causa no

ha sido un cambio en la radiación solar incidente, sino la composición atmosférica: el aumento de la concentración de los gases con efecto invernadero, y en particular del CO₂. En efecto, el CO₂ en la atmósfera ha ido aumentando de manera continua desde la revolución industrial, como resultado del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) y como demuestran las medidas directas (figura 2). Así, los datos nos dicen que recientemente la concentración de este gas ha alcanzado las 400 ppm (partes por millón), valor que

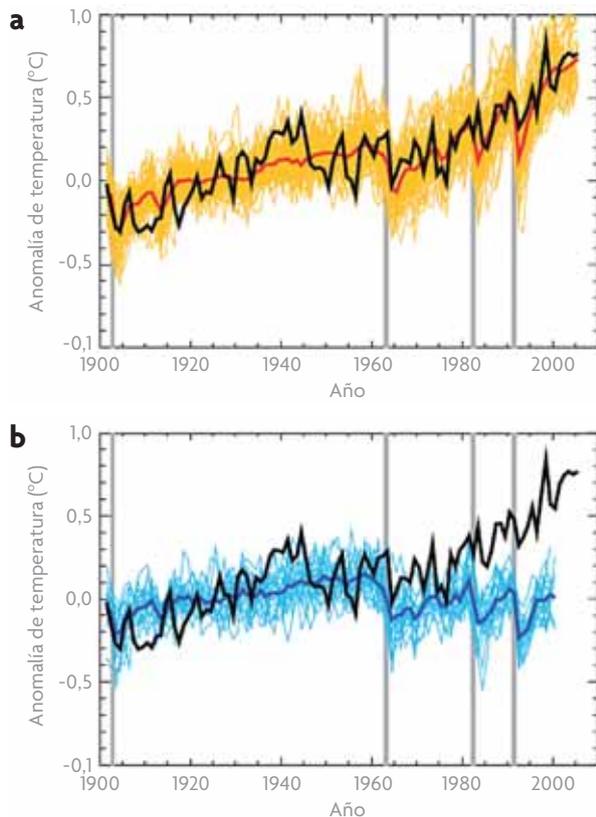


Figura 3. Comparación entre las anomalías de la temperatura global media observadas (líneas negras) y las simulaciones con modelos climáticos forzadas con (a) los factores naturales y antropogénicos (58 simulaciones de 14 modelos diferentes, líneas amarillas, y la media de todos ellos, línea roja); y (b) solo los factores naturales (19 simulaciones de 5 modelos diferentes, líneas azul claro, y la media de todas ellas, línea azul gruesa). Queda claro que para que los modelos reproduzcan la evolución del clima, hay que incluir los factores antropogénicos. Reproducción de la figura 9.5 del cuarto informe del IPCC (Hegerl et al., 2007).

supera con mucho las 280 ppm del año 1800, y que de hecho es un nivel que no se había alcanzado nunca en el último millón de años.

En realidad, el CO₂ no es el único gas con efecto invernadero emitido por la actividad de la especie humana. Hay otros que, aunque en menor magnitud, también se suman al forzamiento radiativo positivo (es decir, en desequilibrar los flujos energéticos en el sentido de que el sistema climático absorbe más energía de la que libera): el metano, los halocarburos, el óxido nítrico (figura 2). Además, al iniciarse un aumento de temperatura, se ponen en marcha varios mecanismos de retroacción positiva: aumenta la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, y disminuye la cubierta de hielo y por tanto el albedo terrestre, entre otros. La propia actividad humana, sin embargo, provoca otras emisiones, en este caso en forma de partículas (aerosoles), las cuales mayoritariamente tienden a causar un forzamiento negativo, es decir que reflejan más luz

solar que la radiación terrestre que absorben. También es cierto que existen otros mecanismos de retroacción, especialmente vinculados a los cambios en la cantidad y tipo de nubes, que podrían estar moderando el calentamiento. Sea como sea, no hay dudas sobre la causa antrópica del cambio climático actual, ya que la única manera que tienen los modelos climáticos de reproducir certeramente el clima de los últimos años es incluyendo las emisiones de gases con efecto invernadero y de aerosoles; si solo se consideran las causas naturales (evolución solar y erupciones volcánicas), los modelos no son capaces de simular el calentamiento reciente (figura 3).

En resumen, cualquier modificación de la radiación solar incidente sobre la Tierra, o cualquier modificación del efecto invernadero natural de la atmósfera, modifica el balance energético del sistema climático y por tanto provoca cambios en el clima, tanto de manera directa como mediante la contribución de varios mecanismos de retroacción. Así, la emisión de CO₂, otros gases con efecto invernadero, aerosoles, y también los cambios de uso del suelo (que modifican el albedo), provocados por la actividad humana, han estado influyendo sobre el clima en los últimos decenios, y lo continuarán haciendo en el futuro, según indican todas las proyecciones climáticas. La cuestión abierta ahora es, pues, cuál es el cambio climático futuro al que la humanidad será capaz de adaptar sus estructuras socioeconómicas, y cuáles deben ser las medidas de mitigación de las emisiones que se tendrán que poner en práctica para no superar un calentamiento intolerable. ☺

REFERENCIAS

- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., ... Thornton, P. (2013). Carbon and other biogeochemical cycles. En T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (465–570). Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press.
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Marengo Orsini, J. A., ... Stott, P. A. (2007). Understanding and attributing climate change. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, ... H. L. Miller (Eds.). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 663–745). Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press.
- Martín Vide, J. (2002). *El temps i el clima*. Barcelona: Rubes - Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya.
- Milankovitch, M. (1920). *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*. Paris: Gauthier-Villars.
- Pachauri, R. K., Meyer, L. A. and the IPCC Core Writing (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Ginebra: IPCC.
- Uriarte, A. (2003). *Historia del clima de la Tierra*. Vitoria-Gasteiz: Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco.

Josep Calbó. Profesor titular del Departamento de Física. Universitat de Girona.