

EL CAMBIO CLIMÁTICO 2

Muchos de los cambios climáticos importantes se dan por pequeños desencadenantes causados por los factores que se han citado, ya sean forzamientos sistemáticos o sucesos imprevistos. Dichos desencadenantes pueden formar un mecanismo que se refuerza a sí mismo (retroalimentación o «*feedback* positivo») amplificando el efecto. Asimismo, la Tierra puede responder con mecanismos moderadores («*feedbacks* negativos») o con los dos fenómenos a la vez. Del balance de todos los efectos saldrá algún tipo de cambio más o menos brusco pero siempre impredecible a largo plazo, ya que el sistema climático es un sistema caótico y complejo.

Un ejemplo de *feedback* positivo es el efecto albedo, un aumento de la masa helada que incrementa la reflexión de la radiación directa y, por consiguiente, amplifica el enfriamiento. También puede actuar a la inversa, amplificando el calentamiento cuando hay una desaparición de masa helada. También es una retroalimentación la fusión de los casquetes polares, ya que crean un efecto de estancamiento por el cual las corrientes oceánicas no pueden cruzar esa región. En el momento en que empieza a abrirse el paso a las corrientes se contribuye a homogeneizar las temperaturas y favorece la fusión completa de todo el casquete y a suavizar las temperaturas polares, llevando el planeta a un mayor calentamiento al reducir el albedo.

La Tierra ha tenido períodos cálidos sin casquetes polares y recientemente se ha visto que hay una laguna en el Polo Norte durante el verano boreal, por lo que los científicos noruegos predicen que en 50 años el Ártico será navegable en esa estación. Un planeta sin casquetes polares permite una mejor circulación de las corrientes marinas, sobre todo en el hemisferio norte, y disminuye la diferencia de temperatura entre el ecuador y los Polos.

También hay factores moderadores del cambio. Uno es el efecto de la biosfera y, más concretamente, de los organismos fotosintéticos (fitoplancton, algas y plantas) sobre el aumento del dióxido de carbono en la atmósfera. Se estima que el incremento de dicho gas conllevará un aumento en el crecimiento de los organismos que hagan uso de él, fenómeno que se ha comprobado experimentalmente en laboratorio. Los científicos creen, sin embargo, que los organismos serán capaces de absorber solo una parte y que el aumento global de CO₂ proseguirá.

Hay también mecanismos retroalimentadores para los cuales es difícil aclarar en que sentido actuarán. Es el caso de las nubes. El climatólogo Roy Spencer (escéptico del cambio climático vinculado a grupos evangélicos conservadores⁹) ha llegado a la conclusión, mediante observaciones desde el espacio, de que el efecto total que producen las nubes es de enfriamiento.¹⁰ Pero este estudio solo se refiere a las nubes actuales. El efecto neto futuro y pasado es difícil de saber ya que depende de la composición y formación de las nubes.

Se debe destacar la existencia de incertidumbre (errores) en la predicción de los modelos. La razón fundamental para la mayoría de estos errores es que muchos procesos importantes a pequeña escala no pueden representarse de manera explícita en los modelos, pero deben incluirse de manera aproximada cuando interactúan a mayor escala. Ello se debe en parte a las limitaciones de la capacidad de procesamiento, pero también es el resultado de limitaciones en cuanto al conocimiento

científico o la disponibilidad de observaciones detalladas de algunos procesos físicos.^{11 12} En particular, existen niveles de incertidumbre considerables, asociados con la representación de las nubes y con las correspondientes respuestas de las nubes al cambio climático.¹³

Edward N. Lorenz, un investigador del clima, ha encontrado una teoría revolucionaria de caos¹⁴ que hoy en día se aplica en las áreas de economía, biología y finanzas (y otros sistemas complejos). En el modelo numérico se calcula el estado del futuro con insumos de observaciones meteorológicas (temperatura, precipitación, viento, presión) de hoy y usando el sistema de ecuaciones diferenciales. Según Lorenz, si hay pequeñas tolerancias en la observación meteorológica (datos de insumo), en el proceso del cálculo de predicción crece la tolerancia drásticamente. Se dice que la predictibilidad (duración confiable de predicción) es máximo siete días para discutir cuantitativamente in situ (a escala local). Cuánto más aumenta el largo de las integraciones (7 días, 1 año, 30 años, 100 años) entonces el resultado de la predicción tiene mayor incertidumbre. Sin embargo, la técnica de “ensamble” (cálculo del promedio de varias salidas del modelo con insumos diferentes) disminuye la incertidumbre y según la comunidad científica, a través de esta técnica se puede discutir el estado del promedio mensual cualitativamente. Cuando se discute sobre la cantidad de precipitación, temperatura y otros, hay que tener la idea de la existencia de incertidumbre y la propiedad caótica del clima. Al mismo tiempo, para la toma de decisiones políticas relacionadas con la temática del cambio climático es importante considerar un criterio de multimodelo (promedio de las salidas de varios modelos: un tipo de ensamble).

Los estudios del clima pasado (paleoclima) se realizan estudiando los registros fósiles, las acumulaciones de sedimentos en los lechos marinos, las burbujas de aire capturadas en los glaciares, las marcas erosivas en las rocas y las marcas de crecimiento de los árboles. Con base en todos estos datos se ha podido confeccionar una historia climática reciente relativamente precisa, y una historia climática prehistórica con no tan buena precisión. A medida que se retrocede en el tiempo los datos se reducen y llegado un punto la climatología se sirve solo de modelos de predicción futura y pasada.

A partir de los modelos de evolución estelar se puede calcular con relativa precisión la variación del brillo solar a largo plazo, por lo cual se sabe que, en los primeros momentos de la existencia de la Tierra, el Sol emitía el 70 % de la energía actual y la temperatura de equilibrio era de $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, hay constancia de la existencia de océanos y de vida desde hace 3800 millones de años, por lo que la paradoja del Sol débil solo puede explicarse por una atmósfera con mucha mayor concentración de CO_2 que la actual y con un efecto invernadero más grande.

La atmósfera influye fundamentalmente en el clima; si no existiese, la temperatura en la Tierra sería de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero la atmósfera se comporta de manera diferente según la longitud de onda de la radiación. El Sol por su alta temperatura emite radiación a un máximo de 0,48 micrómetros (Ley de Wien) y la atmósfera deja pasar la radiación. La Tierra tiene una temperatura mucho menor, y reemite la radiación absorbida a una longitud mucho más larga, infrarroja de unos 10 a 15 micrómetros, a la que la atmósfera ya no es transparente. El CO_2 , que en marzo de 2015 superó en la atmósfera las 400 ppm, absorbe dicha radiación.¹⁵ También lo hace y en mayor medida el vapor de agua. El resultado es que la atmósfera se calienta y devuelve a la Tierra parte de esa

energía por lo que la temperatura superficial es de unos 15 °C, y dista mucho del valor de equilibrio sin atmósfera. A este fenómeno se le llama el efecto invernadero y el CO₂ y el H₂O son los gases responsables de ello. Gracias al efecto invernadero podemos vivir.

Véase también: *Equilibrio térmico de la Tierra*

La concentración en el pasado de CO₂ y otros importantes gases invernadero como el metano se ha podido medir a partir de las burbujas atrapadas en el hielo y en muestras de sedimentos marinos observando que ha fluctuado a lo largo de las eras. Se desconocen las causas exactas por las cuales se producirían estas disminuciones y aumentos aunque hay varias hipótesis en estudio. El balance es complejo ya que si bien se conocen los fenómenos que capturan CO₂ y los que lo emiten la interacción entre estos y el balance final es difícilmente calculable.

Se conocen bastantes casos en los que el CO₂ ha jugado un papel importante en la historia del clima. Por ejemplo en el proterozoico una bajada importante en los niveles de CO₂ atmosférico condujo a los llamados episodios Tierra bola de nieve. Así mismo aumentos importantes en el CO₂ condujeron en el periodo de la extinción masiva del Pérmico-Triásico a un calentamiento excesivo del agua marina lo que llevó a la emisión del metano atrapado en los depósitos de hidratos de metano que se hallan en los fondos marinos lo que aceleró el proceso de calentamiento hasta el límite y condujo a la Tierra a la peor extinción en masa que ha padecido.

Es importante señalar que una estación meteorológica debe registrar datos de termometría del aire, a 150 cm del suelo (algo que se realizó a partir de 1881), sin acceso a la "isla de calor" urbana, clásica de otras estaciones invadidas por la burbuja de calor generado por las ciudades.

Durante las últimas décadas las mediciones en las diferentes estaciones meteorológicas indican que el planeta se ha ido calentando. Los últimos 10 años han sido los más calurosos desde que se llevan registros,^[cita requerida] y algunos científicos predicen que en el futuro serán aún más calientes. Algunos expertos están de acuerdo en que este proceso tiene un origen antropogénico, generalmente conocido como el efecto invernadero. A medida que el planeta se calienta, disminuye globalmente el hielo en las montañas y las regiones polares, por ejemplo lo hace el de la banquisa ártica o el casquete glaciar de Groenlandia, aunque el hielo antártico, según predicen los modelos, aumenta ligeramente.

Dado que la nieve tiene un elevado albedo devuelve al espacio la mayor parte de radiación que incide sobre ella. La disminución de dichos casquetes también afectará, pues, al albedo terrestre, lo que hará que la Tierra se caliente aún más. El calentamiento global también ocasionará que se evapore más agua de los océanos. El vapor de agua actúa como el mejor "gas invernadero", al menos en el muy corto plazo. Así pues, habrá un mayor calentamiento. Esto produce lo que se llama «efecto amplificador». De la misma manera, un aumento de la nubosidad debido a una mayor evaporación contribuirá a un aumento del albedo. La fusión de los hielos puede cortar también las corrientes marinas del Atlántico Norte provocando una bajada local de las temperaturas medias en esa región. El problema es de difícil predicción ya que, como se ve, hay retroalimentaciones positivas y negativas.

Naturalmente, hay efectos compensadores. El CO_2 juega un importante papel en el efecto invernadero: si la temperatura es alta, se favorece su intercambio con los océanos para formar carbonatos. Entonces el efecto invernadero decae y la temperatura también. Si la temperatura es baja, el CO_2 se acumula porque no se favorece su extracción con lo que aumenta la temperatura. Así pues el CO_2 desempeña también un papel regulador.

Con la aparición de las cianobacterias, en la Tierra se puso en marcha la fotosíntesis oxigénica. Las algas, y luego también las plantas, absorben y fijan CO_2 , y emiten O_2 . Su acumulación en la atmósfera favoreció la aparición de los organismos aerobios que lo usan para respirar y devuelven CO_2 . El O_2 en una atmósfera es el resultado de un proceso vivo y no al revés. Se dice frecuentemente que los bosques y selvas son los "pulmones de la Tierra", aunque esto recientemente se ha puesto en duda ya que varios estudios afirman que absorben la misma cantidad de gas que emiten por lo que quizá solo serían meros intercambiadores de esos gases. Sin embargo, estos estudios no tienen en cuenta que la absorción de CO_2 no se realiza solamente en el crecimiento y producción de la biomasa vegetal, sino también en la producción de energía que hace posible las funciones vitales de las plantas, energía que pasa a la atmósfera o al océano en forma de calor y que contribuye al proceso del ciclo hidrológico. En cualquier caso, en el proceso de creación de estos grandes ecosistemas forestales ocurre una abundante fijación del carbono que sí contribuye apreciablemente a la reducción de los niveles atmosféricos de CO_2 .

Actualmente los bosques tropicales ocupan la región ecuatorial del planeta y entre el Ecuador y el Polo hay una diferencia térmica de $50\text{ }^\circ\text{C}$. Hace 65 millones de años la temperatura era muy superior a la actual y la diferencia térmica entre el Ecuador y el Polo era de unos pocos grados. Todo el planeta tenía un clima tropical y apto para quienes formaban la cúspide de los ecosistemas entonces, los dinosaurios. Los geólogos creen que la Tierra experimentó un calentamiento global en esa época, durante el Jurásico inferior con elevaciones medias de temperatura que llegaron a $5\text{ }^\circ\text{C}$. Ciertas investigaciones^{16 17} indican que esto fue la causa de que se acelerase la erosión de las rocas hasta en un 400%, un proceso en el que tardaron 150 000 años en volver los valores de dióxido de carbono a niveles normales. Posteriormente se produjo también otro episodio de calentamiento global conocido como Máximo térmico del Paleoceno-Eoceno.

El hombre moderno apareció, probablemente, hace unos tres millones de años. Desde hace unos dos millones, la Tierra ha sufrido glaciaciones en las que gran parte de Norteamérica, Europa y el norte de Asia quedaron cubiertas bajo gruesas capas de hielo durante muchos años. Luego rápidamente los hielos desaparecieron y dieron lugar a un período interglaciar en el cual vivimos. El proceso se repite cada cien mil años aproximadamente. La última época glacial acabó hace unos quince mil años y dio lugar a un cambio fundamental en los hábitos del hombre, que desarrolló el conocimiento necesario para domesticar plantas (agricultura) y animales (ganadería) como el perro. La mejora de las condiciones térmicas facilitó el paso del Paleolítico al Neolítico hace unos diez mil años. Para entonces, el hombre ya era capaz de construir pequeñas aldeas dentro de un marco social bastante complejo.

No fue hasta 1941 que el matemático y astrónomo serbio Milutin Milanković propuso la teoría de que las variaciones orbitales de la Tierra causaron las glaciaciones del Pleistoceno.

Calculó la insolación en latitudes altas del hemisferio norte a lo largo de las estaciones. Su tesis afirma que es necesaria la existencia de veranos fríos, en vez de inviernos severos, para iniciarse una edad del hielo. Su teoría no fue admitida en su tiempo, hubo que esperar a principios de los años cincuenta, Cesare Emiliani que trabajaba en un laboratorio de la Universidad de Chicago, presentó la primera historia completa que mostraba el avance y retroceso de los hielos durante las últimas glaciaciones. La obtuvo de un lugar insólito: el fondo del océano, comparando el contenido del isótopo pesado oxígeno-18 (O_{-18}) y de oxígeno-16 (O_{-16}) en las conchas fosilizadas.

A finales del siglo XVII el hombre empezó a utilizar combustibles fósiles que la Tierra había acumulado en el subsuelo durante su historia geológica.¹⁸ La quema de petróleo, carbón y gas natural ha causado un aumento del CO_2 en la atmósfera que últimamente es de 1,4 ppm al año y produce el consiguiente aumento de la temperatura. Se estima que desde que el hombre mide la temperatura hace unos 150 años (siempre dentro de la época industrial) esta ha aumentado 0,5 °C y se prevé un aumento de 1 °C en el 2020 y de 2 °C en el 2050.

Además del dióxido de carbono (CO_2), existen otros gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global, tales como el gas metano (CH_4) óxido nitroso (N_2O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6), los cuales están contemplados en el Protocolo de Kioto.

Los últimos años del siglo XX se caracterizaron por poseer temperaturas medias que son siempre las más altas del siglo.^[cita requerida]

Rachel Kyte, vicepresidente para Desarrollo Sostenible del Banco Mundial anunció en el año 2013, que el costo económico por los desastres naturales aumentó cuatro veces desde 1980.¹⁹

Tal vez el mecanismo de compensación del CO_2 funcione en un plazo de cientos de años, cuando el Sol entre en un nuevo mínimo. En un plazo de miles de años, tal vez se reduzca la temperatura, desencadenándose la próxima glaciación, o puede que simplemente no llegue a producirse ese cambio.

En el Cretácico, sin intervención humana, el CO_2 era más elevado que ahora y la Tierra estaba 8 °C más cálida.