

## Argumentos científicos a favor del calentamiento global antropogénico moderno

John W. Farley

Aunque la mayoría de los estadounidenses creen hoy en día que la quema de combustibles fósiles está provocando el calentamiento global, no todos están de acuerdo con ello. Quienes se oponen a la idea del cambio climático proclaman que no se está produciendo en absoluto un calentamiento global, o que se está produciendo, pero es totalmente natural, es decir, que la contribución antropogénica (humana) es desdénable. En las filas de los oponentes figura el popular periodista radical Alexander Cockburn, quien proclamó contundentemente que el calentamiento global antropogénico era un mito en tres artículos publicados en 2007 en el sitio web *CounterPunch* y en *The Nation*.<sup>1</sup>

Hace tres décadas que leo los escritos políticos de Cockburn con placer y, normalmente, con connivencia, desde su estancia en *The Village Voice*. Sin embargo, como profesor de física que lleva enseñando sobre el calentamiento global desde 2001, estoy profundamente en desacuerdo con la perspectiva de Cockburn sobre el calentamiento global.<sup>2</sup> Tampoco me satisface la calidad de muchas de las respuestas que los artículos de Cockburn han suscitado, a juzgar por las cartas al director de *The Nation*.<sup>3</sup>

La mayoría de los climatólogos creen que la contribución humana al calentamiento global actual es importante y en ningún modo puede recha-

---

• Artículo publicado en *MR*, vol. 60, nº 3, julio-agosto de 2008, pp. 68-90. Traducción de Joan Quesada. John W. Farley es profesor del departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Nevada, Las Vegas, donde ha ganado diversos premios por sus méritos docentes. Entre sus intereses investigativos figuran la ciencia de los materiales y la corrosión. Sus escritos políticos han aparecido en el sitio web *CounterPunch*.

zarse como algo desdeñable. Las consecuencias del calentamiento global son en potencia muy peligrosas. A la vista de la importancia del tema, y a la vista del prominente papel de Cockburn (bien merecido) como intelectual de izquierdas y de su formidable poder de persuasión, vale la pena repasar los argumentos científicos a favor del moderno calentamiento global antropogénico.

El presente artículo consiste en (1) un resumen de los argumentos científicos a favor del calentamiento global antropogénico moderno, (2) un resumen de los argumentos contrarios presentados por Cockburn, (3) una evaluación del calentamiento global en mayor profundidad y (4) mi crítica detallada de los argumentos contrarios que expone Cockburn.

La argumentación científica no depende de la cita de autoridades, por muy distinguidas que estas puedan ser. La argumentación depende de las pruebas experimentales, de la lógica y de la razón. El presente artículo no se ocupa del impacto del calentamiento global, ni de cuestiones políticas: qué se puede hacer con respecto al calentamiento global, si el tratado de Kioto es una buena idea o no, etc.

### **Primera parte: Resumen de los argumentos a favor del calentamiento global antropogénico moderno**

Cuando la luz del Sol incide sobre la Tierra, esta emite radiación infrarroja. Los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera absorben esa radiación, lo que provoca el calentamiento de la Tierra. El efecto invernadero es un efecto muy vasto: sin gases de efecto invernadero, la superficie de la Tierra probablemente estaría por debajo de la temperatura de congelación del agua. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera ha aumentado desde que se inició la Revolución Industrial, debido primordialmente a la quema de combustibles fósiles y a la deforestación. Ese aumento de los gases de efecto invernadero provoca un incremento del efecto invernadero, lo que calienta la Tierra.

Un sencillo cálculo revela que, cuando el CO<sub>2</sub> de la atmósfera alcance el doble del nivel preindustrial, el aumento del efecto invernadero por sí solo (es decir, sin tener en cuenta ninguna de las respuestas de la Tierra a ese mayor efecto invernadero) calentará la Tierra en 1,2 o 1,3 °C. No existe ninguna controversia significativa entre los científicos sobre esta parte del calentamiento global.

De hecho, la Tierra responderá al aumento de temperatura. A eso se lo denomina «retroalimentación». Existe controversia sobre la magnitud de

esa retroalimentación. Los análisis que tienen en cuenta la retroalimentación predicen un calentamiento global que va de los 1,5 °C a los 4,5 °C (como señala el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC en sus siglas en inglés]). Las controversias entre los climatólogos tienen que ver con la magnitud del calentamiento, no con si este está teniendo lugar o no.

El clima está determinado por diversos factores, entre ellos los cambios en la órbita terrestre, la posible variación solar, los posibles volcanes y el efecto invernadero. Todos los factores menos el último son completamente naturales. Las actividades humanas no son la única contribución al efecto invernadero. Hasta los dos últimos siglos, la humanidad tenía un efecto desdeñable sobre el clima, y todos los cambios climáticos se producían naturalmente. Algunos cambios climáticos del pasado remoto fueron muy notables (por ejemplo, las eras glaciales) y no los causaron los humanos. Ninguna de esas afirmaciones refuta la idea de que las actividades humanas (sobre todo la quema de combustibles fósiles) son una importante contribución al calentamiento global que se está produciendo en la actualidad.

### **Segunda parte: Resumen de los argumentos en contra de Alexander Cockburn**

En sus artículos en *The Nation* y en el sitio web de *CounterPunch*, Alexander Cockburn presenta seis argumentos contra el calentamiento global antropogénico:

1. Durante la Gran Depresión de la década de 1930, la quema de combustibles fósiles disminuyó un 30%, pero la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera no disminuyó. Por lo tanto, argumenta, el aumento del CO<sub>2</sub> no procede de la quema de combustibles fósiles.
2. El vapor de agua, y no el CO<sub>2</sub>, es el principal gas de efecto invernadero, y la proporción del calentamiento global atribuible al CO<sub>2</sub> es, por lo tanto, minúscula.
3. Cuando la Tierra salió de la última era glacial, hace unos 10.000 años, la temperatura global y la concentración de CO<sub>2</sub> se elevaron ambas, pero el aumento de la temperatura precedió al aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico. Por lo tanto, fue el calentamiento lo que provocó el aumento de CO<sub>2</sub>, y no al revés. El calentamiento fue causado por un ciclo de Milankovitch, un pequeño cambio en el movimiento de la Tierra.

4. El incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera lo causa el CO<sub>2</sub> procedente de los océanos, no la quema de combustibles fósiles. Por eso el aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico es natural, no antropogénico.
5. El tiempo que permanece el CO<sub>2</sub> en la atmósfera es solo de un año o dos, antes de disolverse en los océanos. Este es un punto importante para respaldar el punto 4 anterior.
6. Las previsiones del calentamiento global andropogenético dependen enteramente de los resultados de modelos informáticos de gran escala, que pueden ser fácilmente manipulados por los creadores de dichos modelos informáticos para obtener el resultado deseado mediante ajustes en las variables de los modelos informáticos.

Basándose en todos esos argumentos científicos, Cockburn argumenta a continuación que los creadores de modelos informáticos proclaman sus apocalípticas e injustificadas previsiones para seguir recibiendo fondos. Argumenta también que la industria de la energía nuclear está respaldando la histeria sobre el calentamiento global para fomentar la energía nuclear.

### **Tercera parte: El calentamiento global en mayor profundidad**

El efecto invernadero calienta la Tierra. El poder del Sol para calentar tiene su origen mayormente en la parte visible y ultravioleta del espectro. La superficie de la Tierra re-irradia la energía solar hacia el espacio en forma de luz infrarroja. Como consecuencia de los gases de efecto invernadero que hay en ella, la atmósfera es transparente para la luz visible procedente del Sol, pero opaca para muchas longitudes de onda de la franja de infrarrojos, lo que provoca que atrape energía térmica y la Tierra se caliente. Eso es lo que se llama efecto invernadero, que hace dos siglos que se conoce.<sup>4</sup> El primer científico que se dio cuenta de que la atmósfera calienta la Tierra fue posiblemente el físico y matemático francés Joseph Fourier en la década de 1820 (a quien no hay que confundir con el periodista y socialista utópico Charles Fourier). Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el CO<sub>2</sub> y el metano (gas natural, CH<sub>4</sub>). No conozco ningún científico que dude de que el efecto invernadero sea un efecto real.

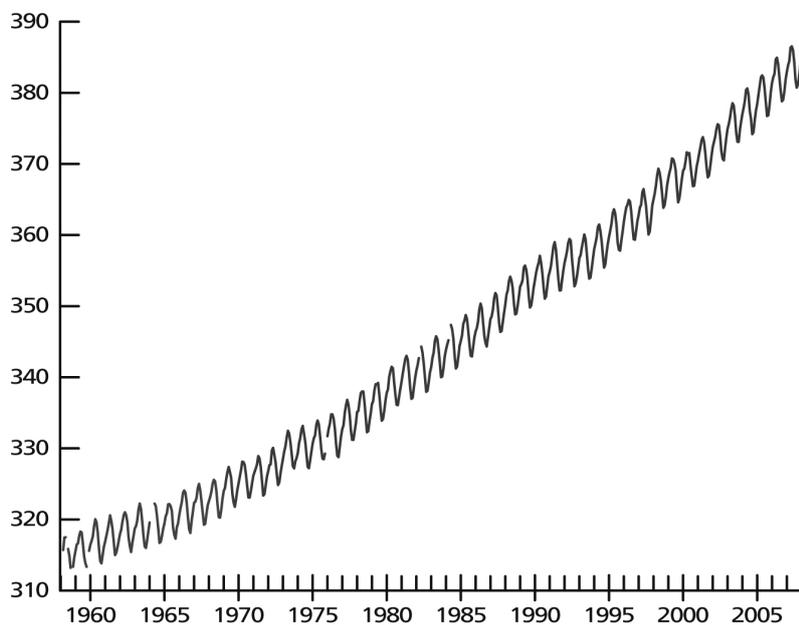
Demasiada gente no aprecia lo potente que es el efecto invernadero en realidad. Un simple cálculo basado en el ley de Stefan-Boltzmann muestra que, si no hubiera gases de efecto invernadero en la atmósfera (y si no cambiara nada más en la Tierra como consecuencia de la retirada de los gases de efecto invernadero), la temperatura media de la superficie terrestre sería

de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-1\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), lo que está por debajo del punto de congelación del agua.<sup>5</sup>

La temperatura media que en realidad se observa en la Tierra es de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $59\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). Así pues, el efecto invernadero eleva la temperatura de la superficie terrestre en  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $60\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). En este sentido, el calentamiento global es ya una realidad. El efecto invernadero no solo es un efecto real, sino que es un efecto de gran magnitud.

El efecto invernadero se está intensificando como consecuencia de los gases de efecto invernadero que se están acumulando en la atmósfera debido primordialmente a la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y a la deforestación. No se dispone de datos precisos fruto de mediciones experimentales directas hasta 1959, cuando el geoquímico C. D. Keeling comenzó a recoger datos en Mauna Loa, Hawái. El programa de medición ha continuado hasta el presente.<sup>6</sup> El gráfico 1 muestra los datos desde 1959 hasta el presente.

**Gráfico 1: Concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, mediciones del observatorio de Mauna Loa, que muestran el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico (ppm)**



Fuente: [ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2\\_mm\\_mlo.txt](ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt).

Los datos muestran un ciclo estacional que se corresponde con la estación de aumento en el hemisferio norte, con un máximo en mayo y un mínimo en octubre. Más significativa es la tendencia ascendente a largo plazo: de 315 ppm en 1958 hasta 387 ppm en 2008. Aunque otros aspectos del calentamiento global han provocado controversia, nadie ha dudado jamás de los datos de este programa de medición. Los datos son pruebas sólidas. Diversos equipos de investigación han medido las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y los datos de distintos investigadores concuerdan.

Aunque los primeros datos fruto de la medición directa del CO<sub>2</sub> en la atmósfera son de 1958, es posible extender esos datos hasta más atrás mediante el examen de las burbujas de aire atrapadas en el hielo de la Antártida y de Groenlandia. Los datos relativos a la tendencia a largo plazo del CO<sub>2</sub> muestran que el nivel de CO<sub>2</sub> ha permanecido estable en 280 ppm a lo largo de los últimos 10.000 años.<sup>8</sup> Después, el CO<sub>2</sub> empezó a aumentar aproximadamente en la época de la Revolución Industrial, y en la actualidad es un 38% superior a los niveles preindustriales. Los climatólogos atribuyen el nivel de CO<sub>2</sub> (280 ppm) preindustrial a causas naturales, y el aumento desde ese momento a la actividad humana, sobre todo a las causas ya mencionadas.

La cuestión surge naturalmente: ¿cuál será el efecto del aumento de los gases de efecto invernadero? Ya que el efecto invernadero es un efecto real, es difícil evitar la conclusión de que la acumulación de gases de efecto invernadero provocará la intensificación del efecto invernadero, lo que producirá un aumento del calentamiento global en una u otra medida. En otras palabras, la discusión versa sobre la cantidad de aumento del calentamiento global, y no sobre si este se está produciendo o no. La cantidad de incremento del calentamiento global puede ser grande o pequeña, pero su efecto es real. El interrogante científico importante es si el incremento del calentamiento global será lo suficientemente grande como para constituir un problema.

Para responder a esa pregunta, debemos comprender con mayor detalle cómo absorben los gases de efecto invernadero la luz de la franja de infrarrojos. Gases distintos absorben luz de diferentes longitudes de onda. Las mediciones efectuadas desde el exterior de la atmósfera terrestre por medio de satélites muestran que el CO<sub>2</sub> tiene una absorción particularmente fuerte de luz en longitudes de onda de alrededor de 15 micrometros.<sup>9</sup> Gavin Schmidt, en 2005, siguiendo los trabajos de 1978 de Ramanathan y Coakley, calcularon el efecto de los gases invernadero de la siguiente manera: si se retira un gas de la atmósfera y todos los demás gases se mantienen constantes, ¿cuál es la variación que obtenemos del porcentaje de energía

**Tabla 1: Contribución al efecto invernadero de distintos gases de efecto invernadero**

Gases retirados	Porcentaje de variación en la absorción de infrarrojos
Ninguno	0
Vapor de H <sub>2</sub> O	36
Todos excepto vapor de H <sub>2</sub> O	34
CO <sub>2</sub>	9
Todos excepto CO <sub>2</sub>	74
Vapor de H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub>	53
O <sub>3</sub>	3
Todos excepto O <sub>3</sub>	93
Otros gases invernadero	2
Nubes	16
Todos excepto vapor de H <sub>2</sub> O y nubes	15
Todos	100

Fuente: Gavin Schmidt, <http://www.realclimate.org/index.php?=142>.

infrarroja absorbida por la atmósfera?<sup>10</sup> Schmidt obtuvo las siguientes cifras, que mostramos en la tabla 1.

Los datos de la tabla 1 se computaron bajo el supuesto de que, cuando se retira un gas de la atmósfera, el resto permanece inalterado. Sin embargo, existen solapamientos en la absorción de infrarrojos: la absorción de un tipo de gas interactúa con la absorción de los demás. Algunas longitudes de onda de luz infrarroja son absorbidas tanto por el vapor del agua como por el CO<sub>2</sub>. En las franjas donde existe el solapamiento, si se retira únicamente el vapor de agua (y se deja el CO<sub>2</sub>), el CO<sub>2</sub> absorberá la luz infrarroja; mientras que, si se retira el CO<sub>2</sub> de la atmósfera (y se deja el vapor de agua), el vapor de agua absorberá la luz infrarroja. Así pues, la absorción por parte de un tipo de gas depende de la presencia en la atmósfera de otros tipos. Eso explica el hecho, de otro modo sorprendente, de que las cifras no sumen linealmente: si se retira todo el vapor de agua de la atmósfera, la absorción de infrarrojos disminuirá un 36%; si se retiran todos los gases de efecto invernadero (y las nubes) y se deja solo el vapor de agua, la absorción de infrarrojos disminuirá un 34%. Ambos no suman el 100%, debido a los solapamientos.

Todo esto representa una valiosa información para la pregunta crucial: ¿qué importancia tiene el CO<sub>2</sub> en el efecto invernadero? Si se retira todo el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, la absorción de infrarrojos disminuye un 9%. Si se

retiran de la atmósfera todos los gases de efecto invernadero (incluidas las nubes) menos el CO<sub>2</sub>, la absorción disminuye un 74%, lo que significa que el 26% (= 100% – 74%) de la absorción continúa estando presente cuando el CO<sub>2</sub> es el único gas de efecto invernadero en la atmósfera. Así pues, el efecto del CO<sub>2</sub> puede representar bien el 9% o bien el 26% del efecto invernadero, dependiendo de cómo se defina. No hay duda de que las distintas definiciones explican, en parte, los distintos valores que aparecen en la literatura con respecto a la importancia del CO<sub>2</sub> en el efecto invernadero. Aun así, tanto si se trata de un 9% como de un 26%, el efecto del CO<sub>2</sub> no es desdeñable.

Por lo que respecta al vapor de agua, la tabla nos da dos cifras: 36% y 66% (= 100 – 34), dependiendo de la definición. A partir de dicha tabla, la contribución del vapor de agua al efecto invernadero es de entre el 36% y el 66%, mientras que la del CO<sub>2</sub> es de entre el 9% y el 26%, dependiendo de la definición. Si tomamos la cifra inferior, el vapor de agua es más importante en una ratio de  $36/9 = 4,0$ , y si tomamos la cifra más elevada, el vapor de agua es más importante en una ratio de  $66/26 = 2,5$ . Hay que señalar que el vapor de agua es algo más importante que el CO<sub>2</sub>, pero el CO<sub>2</sub> no es en absoluto despreciable.

### **¿Cuánto calentamiento? Un cálculo erróneo ingenuo y aterrador**

Preguntémonos cuál sería el resultado si los gases de efecto invernadero que hay en la atmósfera se doblaran. Un cálculo ingenuo (e incorrecto) sería el siguiente: dado que el nivel existente de gases invernadero producía un aumento de la temperatura de 33 °C (60 °F) en comparación con la hipotética situación de una Tierra sin gases invernadero, entonces doblar todos los gases invernadero produciría un incremento adicional de 33 °C (60 °F), lo que daría una temperatura media en la superficie de la Tierra de 48 °C (119 °F). Afortunadamente, ese aterrador resultado deriva de una concepción errónea de cómo los gases de efecto invernadero retienen el calor. La predicción del IPCC es que, si se dobla en nivel de CO<sub>2</sub>, se producirá un aumento de la temperatura de unos pocos grados centígrados. A primera vista, es tanto sorprendente como bienvenido que los efectos previstos del calentamiento global sean menores de los que se derivan de ese cálculo ingenuo.

Ese cálculo ingenuo es incorrecto por dos razones. En primer lugar, el efecto de saturación. La atmósfera ya es opaca para partes del espectro de

infrarrojos. Aumentar el nivel de los gases de efecto invernadero no provocará ninguna diferencia en esas franjas del espectro. Si la absorción de una determinada longitud de onda es próxima al 100%, doblar el nivel de CO<sub>2</sub> no doblará el efecto invernadero. Por ejemplo, supongamos que en una cierta longitud de onda el 90% de la luz infrarroja de la Tierra es actualmente absorbido por el CO<sub>2</sub> atmosférico. Si la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se doblara, la absorción no puede aumentar hasta el 180%, lo que representa un hecho imposible, sino que se acercará más bien al 100%.

En segundo lugar, tenemos el efecto del solapamiento espectral. La absorción de luz infrarroja por el vapor de agua tiene zonas que se solapan con la absorción por el CO<sub>2</sub>. En las franjas en las que la luz infrarroja ya es fuertemente absorbida por el vapor de agua, la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> producirá escasa o ninguna diferencia. Esos dos efectos (saturación y solapamiento espectral) explican por qué no es correcto sumar ingenuamente los efectos de los gases invernadero y por qué se sobreestima el efecto del aumento de los gases invernadero sobre la transmisión de la atmósfera.

Un incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> tendrá poco efecto en el centro de un fuerte pico de absorción, ya que la atmósfera ya es opaca en esa zona. Por el contrario, un aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> tendrá su máximo efecto en las alas de un fuerte pico. La atmósfera es opaca en algunas franjas de infrarrojos, con «ventanas» en las que la atmósfera es transparente o parcialmente transparente. El efecto del aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> consiste en cerrar esas ventanas.

Aunque el cálculo ingenuo es erróneo, ilustra un punto importante. La gente suele sorprenderse con la idea de que el CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera en solo unos pocos cientos de partes por millón pueda provocar un cambio de tal magnitud en la temperatura de la Tierra como para marcar diferencias. Por el contrario, lo verdaderamente sorprendente es que el calentamiento global sea tan reducido como es.

### ¿Cuánto calentamiento?

Los climatólogos dividen el problema climático en dos partes: la presión sobre el clima y la respuesta del clima. La presión sobre el clima incluye las posibles variaciones en el brillo del Sol o los cambios en el efecto invernadero.<sup>11</sup> La respuesta climática es el cambio resultante en la temperatura de equilibrio. La sensibilidad del clima es el cambio de la temperatura dividido

por la presión sobre el clima. Un cálculo muy simple de libro de texto estándar muestra que (si presuponemos que nada más cambia en el sistema) doblar el CO<sub>2</sub> con respecto a los niveles preindustriales se estima<sup>12</sup> que provoca un aumento de temperatura de unos 1,2 o 1,3 °C (2,2 a 2,3 °F). El cálculo es lo bastante sencillo para que exista poca controversia en la comunidad científica con respecto a él. La lógica es difícil de rebatir: el efecto invernadero es un efecto real; la quema de combustibles fósiles provoca un aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> que produce una intensificación del efecto invernadero. El aumento de temperatura resultante, si asumimos que nada más cambia en el proceso, es solo de entre 1,2 y 1,3 °C.

### **Todo tiene que ver con la retroalimentación**

El verdadero reto de la climatología procede del hecho de asumir que, cuando se intensifica el efecto invernadero por el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>, nada más varía. Un aumento de 1,2 a 1,3 °C solo toma en consideración el calentamiento atmosférico directo asociado a la intensificación del efecto invernadero. No tiene en cuenta cualquier otro cambio que se produzca en el sistema. Esos cambios son la «retroalimentación».

Si la retroalimentación es positiva, entonces los cambios en la Tierra potenciarán el cambio de temperatura, y el calentamiento global derivado de doblar la concentración de CO<sub>2</sub> preindustrial será mayor de entre 1,2 y 1,3 °C. Si la retroalimentación es negativa, entonces los cambios en la Tierra contrarrestarán el cambio de temperatura y el calentamiento global provocado por doblar el CO<sub>2</sub> preindustrial será menor que el especificado. Si la retroalimentación es positiva, entonces el cambio de temperatura se retroalimenta a sí mismo. Si la retroalimentación es negativa, entonces el cambio de temperatura se limita a sí mismo.

Si la retroalimentación es positiva, eso no implica que el cambio de temperatura se retroalimente a sí mismo para siempre. La intensificación del efecto invernadero provoca un aumento de la temperatura media de la Tierra, que, a su vez, elevará la energía que irradia la Tierra, tal y como establece la ley de Stefan-Boltzmann. La temperatura media de la Tierra se incrementará desde su valor actual hasta una temperatura media más alta; la Tierra «brillará» más y re-irradiará más energía al espacio, hasta que alcance un nuevo equilibrio. El calentamiento global tiene que ver con la temperatura de equilibrio derivada de la intensificación del efecto invernadero.

Los cálculos del IPCC son que doblar la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera comportará un aumento de entre 1,5 y 4,5 °C (entre 2,7 y 8,1 °F).

Las temperaturas previstas consisten en 1,2 a 1,3 °C derivados de la intensificación del efecto invernadero, multiplicados por un «factor de amplificación» derivado de la retroalimentación positiva. El factor de amplificación estimado varía entre 1,2 y 3,75. Si el factor de amplificación es de 1,2, entonces la temperatura será un 20% más alta de lo que sería en ausencia de retroalimentación, mientras que si el factor de amplificación es de 3,75, el aumento de temperatura será de casi el cuádruple de lo que sería en ausencia de retroalimentación. La controversia es toda ella sobre la retroalimentación. Eso es lo que están discutiendo los climatólogos: ¿cuánta retroalimentación habrá?

Dos ejemplos importantes de retroalimentación positiva son el efecto albedo de los hielos y el vapor de agua.

El efecto albedo de los hielos es el siguiente. Si la temperatura aumenta, el hielo y la nieve próximos a los polos se fundirán, y la nieve blanca quedará sustituida por tierra oscura. Dado que la nieve refleja la luz del Sol, mientras que la tierra absorbe la luz solar, eso hace disminuir la reflectividad (albedo) de la Tierra. Que la reflectividad disminuya significa que una mayor proporción de la luz solar que incide sobre la Tierra es absorbida. Eso, a su vez, comporta un mayor calentamiento. Así pues, un pequeño calentamiento lleva a un mayor calentamiento.

El efecto albedo de los hielos también puede funcionar a la inversa: un pequeño descenso de la temperatura provocará un aumento de las capas de nieve, lo que comportará un mayor albedo, lo que significa que una mayor cantidad de la luz solar que incide sobre la Tierra se reflejará y será menos la que se absorba. Así pues, un pequeño enfriamiento lleva a un enfriamiento mayor.

El vapor de agua. El aire caliente puede contener más vapor de agua que el aire más frío. La llamada presión de saturación del vapor del agua aumenta con la temperatura. Así pues, un pequeño aumento de la temperatura puede provocar un aumento de la concentración de vapor de agua que, a su vez, produce una intensificación del efecto invernadero y más calentamiento.

Si una temperatura de 15 °C desciende en 1 °C, la presión de equilibrio del vapor del agua desciende un 6%, mientras que si la temperatura aumenta en 1 °C, la presión de equilibrio de vapor aumenta un 7%. Este es un hecho bastante significativo, dada la importancia del vapor de agua como gas de efecto invernadero.

Resultará útil clarificar un punto importante: los climatólogos consideran que el vapor de agua es una retroalimentación, no una presión. Si de algún modo se retirara todo el vapor de agua de la atmósfera, este se recuperaría en cuestión de semanas. Después de todo, la mayor parte de la

superficie terrestre está cubierta de agua. La variación del vapor de agua en el aire es una de las formas en que la Tierra responde a las presiones externas. Y es una retroalimentación positiva.

### **Posibles mecanismos de retroalimentación negativa**

Además de los mecanismos de retroalimentación positiva, existen también posibles mecanismos de retroalimentación negativa. Por ejemplo, si el aumento de la temperatura provocara más nubes, y si las nubes poseen un efecto neto de enfriamiento (lo cual es incierto), entonces eso representaría un mecanismo de retroalimentación negativa.

Otro mecanismo de retroalimentación negativa que se ha sugerido era el del «iris adaptativo», propuesto por el profesor del MIT Richard Lindzen a comienzos de la década de 1980. Lindzen proponía que el aumento de las temperaturas de la superficie del mar en los trópicos provocaba un descenso de la formación de cirros, lo que ocasionaba a su vez una mayor «filtración» de radiaciones infrarrojas, lo que significa un descenso del efecto invernadero. El resultado final es una retroalimentación negativa. Lindzen, que es escéptico con respecto al calentamiento global, está de acuerdo con que el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico produce una intensificación del efecto invernadero. Sin embargo, no cree que la retroalimentación sea positiva.

La gran complejidad de la climatología moderna deriva de los intentos de lidiar con la retroalimentación. El número de retroalimentaciones posibles es bastante complejo.<sup>13</sup> La cuestión clave es el signo y la magnitud de la retroalimentación. A la vista de la complejidad del sistema, tal vez no sea posible determinar a partir de primeros principios si la retroalimentación será positiva o negativa. Sin embargo, hay otras pruebas que respaldan la tesis de una retroalimentación positiva. Cuando se analizan los registros de temperaturas, las variaciones de temperatura son mayores de lo que se esperaría si no existiera retroalimentación alguna. Eso lo señalaremos en varios de los apartados que vienen a continuación.

### **El cambio climático en el pasado**

Si examinamos los registros de temperaturas de un periodo dilatado de tiempo, encontramos que ha habido cambios de temperatura en el pasado, incluso grandes cambios. En la era cretácea, hace 100 millones de años, la temperatura media global de la superficie tal vez fuera entre 6 y 8 °C (11-

14 °F) más alta que en la actualidad. Evidentemente, esos cambios de temperatura en el pasado remoto no tenían nada que ver con las actividades humanas, ya que entonces no había seres humanos. Los climatólogos no sostienen que los cambios climáticos del pasado fueran debidos a los humanos. Sí que afirman que el calentamiento global que estamos experimentando en la actualidad se debe, al menos en parte, a las actividades humanas.

### Las eras glaciales

En el último millón de años, la Tierra ha experimentado diez grandes episodios de glaciación y cuarenta episodios menos importantes. El desencadenante de dichos episodios se cree que fueron cambios en el movimiento de la Tierra, y el primero en investigarlos fue Milutin Milankovitch en la década de 1920. En particular, la inclinación del eje pasa de 22 grados a 24,5 grados, y viceversa, cada 41.000 años. El mes en que la Tierra está más próxima al Sol varía en ciclos de 19.000 años y 24.000 años. Se observan variaciones en la forma de la órbita, de elíptica a circular, en un periodo de 100.000 años. Esas lentas variaciones derivan de las fuerzas gravitatorias y de torsión que ejercen los demás planetas sobre la Tierra (sobre todo Júpiter y Saturno), el Sol y la Luna.

La comunidad de climatólogos cree casi unánimemente que los ciclos de Milankovitch son los desencadenantes del inicio y el final de las eras glaciales, dado que la temporización de los cambios climáticos coincide muy bien con los cambios observados en la órbita terrestre y de los planetas. (Sin embargo, existen algunos problemas sin resolver en la frecuencia de los cambios: los cambios de órbita predicen un ciclo de 400.000 años, pero no se observa ningún ciclo así en los registros climáticos del último millón de años.)

Aunque los ciclos de Milankovitch aciertan (bastante) bien el periodo de los ciclos, los problemas aparecen cuando se intenta calcular la intensidad del enfriamiento resultante a partir de los cambios en la luz solar. El «efecto» (cambio de temperatura) es mayor que la «causa» (la variación de la luz solar). Un libro de texto estándar resalta que «los cambios en la órbita por sí solos no parece que hayan sido la causa de las enormes variaciones climáticas asociadas a la glaciación y la desglaciación».<sup>14</sup> Eso significa que la respuesta de la Tierra a los cambios de la luz solar incrementan los efectos, o sea, que representa una prueba a favor de la retroalimentación positiva.<sup>15</sup>

**La variabilidad solar**

Además de los ciclos de Milankovitch y de la intensificación del efecto invernadero, otra causa posible de cambio climático es la variabilidad solar. Desde 1979, instrumentos transportados en naves espaciales han registrado variaciones en las emisiones solares, en escalas temporales que van desde minutos a décadas. Los mayores descensos a corto plazo son de un 0,3% y duran aproximadamente un mes, y se asocian a las manchas solares que se desplazan con la superficie solar. (La rotación del Sol dura unos veintisiete días). El ciclo de once años de las manchas solares se asocia a cambios en las emisiones solares de un 0,1% aproximadamente.

No existen mediciones precisas de las emisiones solares antes de 1979, y no existen mediciones directas de ninguna clase antes de 1900. En su lugar, los climatólogos se basan en indicadores indirectos de la actividad solar, los isótopos de los rayos cósmicos, el carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ) y el berilio-10 ( $^{10}\text{Be}$ ), que se encuentran en los anillos de los árboles y en los depósitos de hielo, respectivamente. Los registros se remontan a miles de años atrás.

El Sol es posible que haya contribuido al cambio climático, al menos en el periodo anterior a 1800. Lean y Rind creen que en el periodo de 1600 a 1800, la radiación solar reconstruida (a partir de los indicadores indirectos  $^{14}\text{C}$  y  $^{10}\text{Be}$ ) se correlaciona bien con la temperatura de la superficie del hemisferio norte. Si utilizamos ese periodo para hacer un cómputo de la sensibilidad climática, tenemos un aumento de la radiación solar de un 0,14%, que habría que multiplicar por 2 para explicar el aumento observado de la temperatura de 0,28 °C sin que exista una retroalimentación positiva. Si el modesto cambio climático del periodo 1600-1800 se atribuye a las variaciones solares, tenemos aquí entonces otro argumento a favor de la retroalimentación positiva.

Las fluctuaciones climatológicas del periodo 1600-1800 tal vez se puedan atribuir a la presión solar, si asumimos la existencia de una retroalimentación positiva. Sin embargo, el calentamiento del siglo XX es otra historia. En el último cuarto de siglo, los cambios en el Sol solo pueden explicar menos de un tercio del calentamiento observado.<sup>16</sup>

#### **Cuarta parte: refutación científica de los argumentos contrarios**

##### **Primera afirmación contraria: el argumento de la Gran Depresión**

Alexander Cockburn argumenta que durante la Gran Depresión de la década de 1930 la producción mundial antropogénica de CO<sub>2</sub> disminuyó un 30%, pero la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera no disminuyó ni siquiera en una parte por millón, en una época en que la concentración atmosférica estaba levemente por encima de 300 ppm. Los datos de Cockburn indican que la producción anual mundial de CO<sub>2</sub> a partir de combustibles fósiles cayó un 30%, de 1,17 gigatoneladas (Gt [1 gigatonelada = 10<sup>12</sup> kilogramos, es decir, 1.000 millones de toneladas métricas]) en 1929 a 0,88 Gt en 1932, pero la concentración de CO<sub>2</sub> no descendió ni siquiera en 1 ppm. Cockburn cita las cifras siguientes: 306 ppm en 1928 y 1929, y 307 en 1932.

Cockburn proclamaba que «un tremendo recorte de un 30% en las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por el hombre ni siquiera ocasionó un descenso de 1 ppm del CO<sub>2</sub> atmosférico. Así pues, es imposible afirmar que el aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera sea consecuencia de la quema humana de combustibles fósiles».<sup>17</sup> Cockburn no especifica cuál es la magnitud del efecto sobre la proporción de CO<sub>2</sub> en atmósfera que espera observar, pero piensa claramente que debería haberse producido una disminución de al menos 1 ppm si el CO<sub>2</sub> antropogénico contribuyera significativamente al CO<sub>2</sub> atmosférico.

Calculemos la magnitud del efecto que cabría esperar a partir de las cifras de Cockburn. En primer lugar, hay que distinguir entre una reserva de carbono y un flujo de carbono. La atmósfera es una reserva que contiene una cierta cantidad de carbono, mientras que la producción anual de CO<sub>2</sub> es un flujo, que transfiere una cierta cantidad de carbono a la atmósfera cada año. La reserva de carbono (en forma de CO<sub>2</sub>) en la atmósfera es proporcional a la concentración (expresada en partes por millón), medida por el observatorio de Mauna Loa. El flujo ocasionado por la quema de combustibles fósiles (y otras fuentes antropogénicas) es una cierta cantidad de CO<sub>2</sub> que se inyecta a la atmósfera cada año.

El nivel preindustrial de CO<sub>2</sub> en la atmósfera era de unas 280 ppm. Como consecuencia de la Revolución Industrial, el nivel ascendió lentamente hasta algo más de 300 ppm al inicio de la Gran Depresión. Ese aumento de 20 ppm (= 300 – 280) se debió primordialmente a la acumulación de emisiones provocadas por los combustibles fósiles desde los inicios de la Revolución Industrial. Si la Gran Depresión hubiera reducido a

cero la quema de combustibles fósiles, la consecuencia habría sido un descenso gradual (a lo largo de un periodo prolongado) desde las 300 ppm hasta el nivel preindustrial de 280 ppm.

Nadie debería esperar un descenso de un 30% a partir de un nivel de concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> de 300 ppm, ya el nivel de 280 ppm es el nivel natural. Lo que, por el contrario, deberíamos esperar es un 30% de disminución en la tasa de incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Más detalladamente: aun después del recorte en la quema de combustibles fósiles que tuvo lugar durante la Gran Depresión, los flujos seguían estando desequilibrados, y el CO<sub>2</sub> atmosférico siguió aumentando. En el informe del IPCC de 1995, que se ocupa de la década de 1980, las cifras siguientes ponen de manifiesto los flujos hacia y desde la atmósfera.

La reserva de carbono en la atmósfera era de 750 Gt en la década de 1980. Esa era la masa total de carbono presente en la atmósfera. La concentración atmosférica era de 340 ppm. A partir de esas cifras, podemos calcular las correspondientes a comienzos de la década de 1930, cuando la concentración atmosférica era de 300 ppm, es decir, de un 88% ( $300/340 \times 100$ ) del valor de la década de 1980. La reserva atmosférica era de unas 662 Gt, o sea, de un 88% el valor de la década de 1980 ( $662 = 750 \times 300/340$ ), ya que la concentración es proporcional a la cantidad total (reserva) de carbono.

La estimación de Cockburn de la tasa de emisiones de carbono anterior a la Depresión (el flujo) es de 1,17 Gt/año. Para simplificar, supongamos que todo el CO<sub>2</sub> emitido es retenido por la atmósfera y que todos los demás flujos estaban equilibrados. Eso conllevaría un aumento anual de un 0,18% ( $1,17/662 \times 100$ ) de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Eso representa un aumento esperado de 0,54 ppm (0,18% de 300 ppm) de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Para el año 1932, la tasa de consumo de combustibles fósiles había descendido de 1,17 Gt/año a 0,88 Gt/año. Tenemos un descenso de un 30% en la tasa de incremento de los niveles de CO<sub>2</sub>. No obstante, eso solo significa que cabe esperar que el aumento anual del CO<sub>2</sub> atmosférico sea de un 0,13% ( $0,88/662 \times 100$ ) en lugar de un 0,18% ( $1,17/662 \times 100$ ), o de 0,39 ppm (0,13% de 300 ppm) en lugar de 0,54 ppm. Es la tasa de incremento lo que ha disminuido, de un 0,18% a un 0,13%, o de 0,54 ppm a 0,39 ppm. Así pues, la tasa de incremento ha descendido en 0,15 ppm ( $= 0,54 - 0,39$ ).

Resumiendo: si la Gran Depresión no hubiera tenido lugar, sería de esperar que se produjera un aumento anual de 0,54 ppm. Pero, como se produjo la Gran Depresión, es de esperar un aumento de 0,39 ppm. La diferencia es de 0,15 ppm.

¿Es realista esperar que seamos capaces de detectar una variación en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera provocado por un cambio tan pequeño de la tasa de flujo en tan solo unos pocos años? Deberíamos comparar esa «señal» de 0,15 ppm con el «ruido» año a año presente en los datos. A partir de los datos para la década de 1980, cuando disponemos de información de alta calidad procedente de Mauna Loa, he examinado las fluctuaciones año a año. Hay diez años en la serie de 1980 a 1989. Para cada año, he calculado la concentración de CO<sub>2</sub> en ppm. Restándole a cada año la concentración del año anterior, he calculado el aumento a partir del año previo. Este iba desde las 1,2 ppm hasta las 2,55 ppm. Después, he calculado la variación de dicho aumento de un año al año siguiente. Tenía nueve datos distintos (= 10 - 1) de variación interanual del aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>. Seis de esos nueve datos reflejaban una fluctuación interanual superior a 0,15 ppm, y tres de ellos arrojaban una fluctuación interanual de menos de 0,15 ppm. Así pues, aun en ese caso más favorable, en el que el observatorio de Manua Loa nos suministra datos más fiables que los que Cockburn citaba a partir de las burbujas de aire de los registros de los hielos, no deberíamos esperar ser capaces de detectar una variación de 0,15 ppm.

Además, he simplificado el cálculo al asumir que todo el CO<sub>2</sub> procedente de la quema de combustibles fósiles es retenido por la atmósfera. Los climatólogos de hoy en día creen que es aproximadamente la mitad del CO<sub>2</sub> que se inyecta a la atmósfera el que es retenido por esta, y la otra mitad se disuelve en el mar (en un periodo de entre varias décadas y uno o dos siglos). Mi cálculo simplificado es, por lo tanto, una sobreestimación, de aproximadamente el doble, del aumento esperado de la tasa de mezcla de CO<sub>2</sub>.

En conclusión, el argumento de la Gran Depresión no es válido. El impacto que cabe esperar del recorte de las emisiones de CO<sub>2</sub> que tuvo lugar entre 1929 y 1932 es demasiado pequeño en relación con la acumulación histórica de CO<sub>2</sub> en la atmósfera como para reflejarse en las cifras que baraja Cockburn.

**Segunda afirmación contraria: el vapor de agua es enormemente más importante que el CO<sub>2</sub> como gas de efecto invernadero**

Cockburn cree<sup>18</sup> que el vapor de agua es veinte veces más importante que el CO<sub>2</sub> como gas de efecto invernadero. Cockburn no cita ninguna fuente para respaldar esa cifra. Es cierto que el efecto invernadero del CO<sub>2</sub> es

menor que el del vapor de agua, pero solo entre 2,5 y 4 veces más (como muestra la tabla anterior), y es la concentración de CO<sub>2</sub> la que ha cambiado rápidamente como consecuencia de fuerzas antropogénicas. El efecto del CO<sub>2</sub> es apreciable. Las cifras que expone Cockburn, en las que afirma que el CO<sub>2</sub> es desdeñable, son erróneas. Son las cifras que circulan entre los opositores. La fuerte absorción en la franja de infrarrojos que provoca el CO<sub>2</sub> es en y por sí misma una clara prueba de la importancia del CO<sub>2</sub>.

**Tercera afirmación contraria: el aumento del CO<sub>2</sub> que tuvo lugar hace unos 10.000 años se produjo después del inicio del fin de la última era glacial, no antes. Por lo tanto, el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico es consecuencia del calentamiento global, no causa de este**

Cockburn tiene toda la razón cuando dice que, al iniciarse el fin de la última era glacial hace entre 10,000 y 12.000 años, el desencadenante no fue el CO<sub>2</sub>. Por el contrario, parece que el desencadenante fue un ciclo de Milankovitch. El tema aparece en los libros de texto estándares.<sup>19</sup>

Cockburn piensa que eso es un argumento aplastante contra la tesis del calentamiento global antropogénico. Cree que es un factor determinante del clima, así que, si puede probar que el aumento de la temperatura es la causa del aumento del CO<sub>2</sub> y no al revés en una ocasión (hace 10.000 años), entonces queda probado para siempre.

Hace muchas décadas, numerosos científicos creían también que había un único factor superior que determinaba el clima. Ya no lo creen. Por el contrario, la idea actual es que existen diversos factores que inciden sobre el clima, entre ellos: los gases de efecto invernadero en la atmósfera, el reflejo de la luz por la superficie de la Tierra, la posición exacta de la órbita terrestre (que varía según el ciclo de Milankovitch) y las variaciones en la intensidad del Sol.

¿Qué factor es el más importante? Eso cambia de una era a otra. (a) El acontecimiento que puso en marcha el final de la última era glacial fue un ciclo de Milankovitch. Una vez desencadenado el proceso, el aumento de los niveles de CO<sub>2</sub> provocó un calentamiento aún mayor. (b) Durante el periodo 1600-1800, es posible argumentar de manera plausible que las variaciones solares provocaron cambios apreciables de temperatura. (c) El aumento de temperatura de la segunda mitad del siglo xx ha sido provocado por la intensificación del efecto invernadero, consecuencia de la quema de combustibles fósiles.

Cockburn pone gran énfasis en la cuestión de la sucesión de acontecimientos: hace 10.000 millones de años, el aumento de la temperatura precedió al aumento de los niveles de CO<sub>2</sub>. Eso prueba (y estoy de acuerdo) que el CO<sub>2</sub> no fue la causa del inicio de la desglaciación (el final de la era glacial).

Sin embargo, en los dos últimos siglos, el aumento del CO<sub>2</sub> ha precedido al aumento de las temperaturas. Eso sugiere poderosamente que el aumento del CO<sub>2</sub> ha causado el incremento de las temperaturas. El CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha aumentado desde 1800 y, sobre todo, desde 1950, mientras que permaneció estable durante siglos hasta 1800 aproximadamente. En la era moderna, el aumento de CO<sub>2</sub> se produjo antes, y después tuvo lugar el aumento de la temperatura.

**Cuarta afirmación contraria: el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico procede de los océanos, no de la quema de combustibles fósiles. Así pues, el aumento es natural y no antropogénico**

Los climatólogos creen que el CO<sub>2</sub> procedente de la quema de combustibles fósiles y la deforestación elevan el CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Cockburn cree, por el contrario, que el aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera procede de los océanos. Así pues, ¿de dónde procede el CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera, de la quema de combustibles fósiles o de los océanos?

La naturaleza ha realizado un experimento para resolver esta cuestión, al marcar las moléculas de CO<sub>2</sub> y utilizar un tipo de marca para el CO<sub>2</sub> procedente de los combustibles fósiles y la deforestación y otro tipo de marca para el CO<sub>2</sub> procedente de los océanos. Podemos examinar las moléculas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y las marcas nos dirán si el CO<sub>2</sub> procede de la quema de combustibles fósiles o de los océanos.

Las marcas son isótopos de carbono. La mayoría de los átomos de carbono tienen una masa atómica de 12, pero un 1% aproximadamente de estos tiene una masa atómica de 13. Los átomos de carbono-12 se pueden distinguir de los de carbono-13 en el laboratorio, y ambos tipos de carbono pueden formar moléculas de CO<sub>2</sub>. Así pues, un 1% aproximadamente del CO<sub>2</sub> que exhalamos es <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>.

Los dos tipos de CO<sub>2</sub>, el <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> y el <sup>13</sup>CO<sub>2</sub>, se comportan casi de la misma forma en la mayoría de reacciones químicas. Sin embargo, algunos procesos biológicos muestran un «fraccionamiento isotópico», en el que un isótopo se utiliza con mayor probabilidad que otro. Por ejemplo, en la fotosíntesis, las plantas absorben CO<sub>2</sub> del aire para formar su biomasa. Las plantas terrestres muestran una predilección por la absorción de <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> en

Tabla 2:  $\delta^{13}\text{C}$  según la fuente.

Fuente	$\delta^{13}\text{C}$	Comentario
Combustibles fósiles y biomasa	-27	
Atmósfera	-8	
Aguas de la superficie de los océanos	+1,4 a +2,4	Depende de la latitud

Fuente: P. D. Quay, B. Tilbrook y C. S. Wong, «Ocean Uptakes of Fossil Fuel  $\text{CO}_2$ : Carbon-13 Evidence» [Absorción marina de  $\text{CO}_2$  procedente de combustibles fósiles: pruebas basadas en el carbono-13], *Science* 256, 1992, pp. 74-79.

lugar de  $^{13}\text{CO}_2$ , de forma que el  $\text{CO}_2$  de las plantas es más rico en  $^{12}\text{C}$  y más pobre en  $^{13}\text{C}$  que la atmósfera que las envuelve.

En otras palabras, aunque el  $^{13}\text{C}$  existente es aproximadamente un 1% del  $^{12}\text{C}$  existente, no es exactamente un 1%. La ratio de presencia de  $^{13}\text{C}$  con respecto a la de  $^{12}\text{C}$  es mayor o menor dependiendo de la fuente.

Los científicos comparan la presencia de  $^{13}\text{C}$  en relación con el  $^{12}\text{C}$  mediante la denominada escala  $^{13}\text{C}$ . La ratio de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  en una muestra se compara con la ratio en un material estándar. Si la ratio  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de la muestra es exactamente la misma que la ratio del estándar, entonces  $^{13}\text{C} = 0$ . Si la muestra es más rica en  $^{13}\text{C}$  que el estándar, a la muestra se le asigna un valor  $^{13}\text{C}$  positivo, mientras que, si la muestra es pobre en  $^{13}\text{C}$  en relación con el estándar, a la muestra se le asigna un valor  $^{13}\text{C}$  negativo. Si la ratio  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de una muestra es mayor que la del estándar en un 0,1%, entonces el  $^{13}\text{C}$  de la muestra es de +1. Si la ratio  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de una muestra es menor que la del estándar en un 0,2%, el  $^{13}\text{C}$  de la muestra es de -2.

En la tabla 2 aparecen los valores  $^{13}\text{C}$  de los combustibles fósiles/biomasa, de la atmósfera y de los mares. Nótese que el valor  $^{13}\text{C}$  de la atmósfera está entre el valor de los combustibles fósiles/biomasa y el valor de las aguas de la superficie de los mares.

Si el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera (cuyo  $^{13}\text{C}$  es de -8) procede la superficie de los mares (cuyo  $^{13}\text{C}$  es positivo), entonces el  $^{13}\text{C}$  de la atmósfera aumentará con el tiempo. Sin embargo, si el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera procede de la quema de combustibles fósiles (cuyo  $^{13}\text{C}$  es de -27), entonces el  $^{13}\text{C}$  de la atmósfera disminuirá.

Los resultados, obtenidos por el observatorio de Mauna Loa, muestran que la ratio  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  está descendiendo con el paso del tiempo.<sup>20</sup> Esos datos demuestran de modo concluyente que el aumento del  $\text{CO}_2$  de la atmósfera procede de la quema de combustibles fósiles y de la deforestación, y no del  $\text{CO}_2$  liberado por los mares en la atmósfera. Y esta conclusión no depende de la validez de modelos informáticos.

En respuesta a los críticos que planteaban exactamente la cuestión de los ratios de presencia isotópica en el CO<sub>2</sub>, Cockburn replicaba que la quema de combustibles fósiles no es la única forma de introducir materia pobre en <sup>13</sup>C en la atmósfera. Cockburn creía que «las aguas frías de los océanos absorben preferentemente <sup>12</sup>C ligero, lo que provoca la presencia de una gran cantidad de carbono pobre en <sup>13</sup>C en los mares. Ese carbono bajo en <sup>13</sup>C sería con toda certidumbre el que se habría liberado masivamente en la atmósfera en el curso de la tendencia hacia el calentamiento del mundo a partir de 1850 [...]».<sup>21</sup>

Cockburn tendría un argumento válido si las aguas de la superficie marina fueran en realidad pobres en <sup>13</sup>C. Desafortunadamente para su argumentación, las aguas de la superficie marine son ricas en <sup>13</sup>C, mientras que la aguas profundas son pobres en <sup>13</sup>C. Claramente, Cockburn está equivocado en este punto.

#### **Quinta afirmación contraria: breve tiempo de permanencia del CO<sub>2</sub> en la atmósfera**

¿Cuánto tiempo permanece el CO<sub>2</sub> en la atmósfera antes de disolverse permanentemente en los mares? Puede parecer un detalle sin importancia, pero resulta que es una cuestión importante. Si el CO<sub>2</sub> atmosférico se disolviera en los mares en un corto periodo (uno o dos años), entonces el recorte de las emisiones haría disminuir rápidamente la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Sin embargo, el tiempo de permanencia es prolongado (décadas o siglos), por lo que la raza humana sufrirá durante mucho tiempo las consecuencias del calentamiento global.

Esta cuestión provocó hace algún tiempo una enorme controversia. Hace tan poco como en la década de 1950, muchos científicos creían que el CO<sub>2</sub> de la atmósfera se disolvería casi inmediatamente en los océanos. Esa era una razón importante por la que muchos científicos prestaban poca atención al calentamiento global: creían que era imposible. Las estimaciones del tiempo de permanencia del CO<sub>2</sub> en la atmósfera variaban desde 6 meses hasta 10.000 años.

Poco después de que C. D. Keeling iniciara la medición del CO<sub>2</sub> atmosférico en 1958, quedó claro que se estaba acumulando CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Eso descartaba los tiempos breves de permanencia: si el CO<sub>2</sub> atmosférico pudiera disolverse en el mar en uno o dos años, no estaría acumulándose en la atmósfera.

Los científicos modernos entienden que la disolución del  $\text{CO}_2$  de la atmósfera en los océanos es un proceso en tres fases: (1) la transferencia del  $\text{CO}_2$  a través de la interfaz aire-mar; (2) la interacción química del  $\text{CO}_2$  disuelto con los constituyentes del agua marina, y (3) el transporte del  $\text{CO}_2$  hacia las profundidades marinas por mezcla vertical.

Las fases 2 y 3 son las que limitan la tasa de absorción (es decir, son los procesos que se producen con considerable lentitud y hacen que la absorción de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera por los océanos tarde décadas o siglos, en lugar de años). La química de las aguas marinas es compleja. En el tratamiento del  $\text{CO}_2$  por las aguas marinas participan el ión bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), el ácido bórico ( $\text{B}[\text{OH}]_3$ ) y el ión borato ( $\text{B}[\text{OH}]_4^-$ ). La inclusión de esas dos últimas especies sorprende a muchos científicos sin formación en química marina. El tema es lo bastante complejo como para merecer una monografía de 356 páginas.<sup>22</sup>

Durante mucho tiempo, muchos científicos malinterpretaban el problema. Investigaban la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en el agua y parecía que no había nada que evitara que el  $\text{CO}_2$  se disolviera rápidamente en el mar. Sin embargo, la concepción del problema era errónea. La solubilidad nos dice si todo el  $\text{CO}_2$  atmosférico puede llegar a disolverse finalmente en el mar. Y todo el  $\text{CO}_2$  se puede disolver, pero tarda mucho tiempo en alcanzar el equilibrio.

Es un enfoque erróneo. No es un problema de equilibrio. Es más bien un problema de transición. La verdadera cuestión es: ¿cuánto tiempo tarda el sistema en alcanzar el equilibrio? Eso es lo que no comprendieron los científicos hasta mediados de la década de 1950.

Se ha calculado que, de 100 moléculas de  $\text{CO}_2$  inyectadas en la atmósfera, en 1 año se habrán disuelto 6 moléculas en el mar; en 10 años se habrán disuelto 29 moléculas; en 60 años se habrán disuelto 59 moléculas; en 360 años se habrán disuelto 84 moléculas, y las últimas 16 moléculas tardarán más de 1.000 años en disolverse.<sup>23</sup>

Eso es consecuencia de una cantidad de procesos distintos que se producen en escalas de tiempo diferentes. No existe una escala temporal única para la disolución del  $\text{CO}_2$  en el mar, sino que esta lleva mucho tiempo. Dado que hace un tiempo este fue un tema de controversia, circularon muchas ideas inocentes que ahora se sabe que eran erróneas. Esas ideas no acaban de morir totalmente. A partir de la década de 1960, muchas personas se introdujeron en el campo de la climatología, y personas con preparación técnica pero poca experiencia en climatología han investigado la cuestión. La gente nueva en el área es fácil que repita los mismos errores que cometían los climatólogos en la década de 1950 y con anterioridad.

Cockground halló un doctor, un ingeniero aeroespacial retirado, el Dr. Jeffrey Glassman, que calculaba un tiempo de permanencia de entre 1,5 y 2 años.<sup>24</sup> A juzgar por su página web, la idea de Glassman se basa en la solubilidad. Tal y como acabamos de decir, el problema es de transición, no de solubilidad. Y, por supuesto, si el tiempo de permanencia fuera tan breve, el CO<sub>2</sub> no se estaría acumulando en la atmósfera, como claramente está sucediendo.

**Sexta afirmación contraria: quienes creen en el calentamiento global antropogénico dependen completamente de modelos informáticos de gran escala, cuya validez resulta sospechosa**

Si la única prueba del calentamiento global fueran los modelos informáticos, entonces el escepticismo o, al menos, el agnosticismo estarían completamente justificados. De hecho, hay muchas pruebas además de los modelos informáticos que apoyan la idea del calentamiento global. Algunas de esas pruebas las hemos discutidos en este artículo.<sup>25</sup>

Después de todo, el efecto invernadero es un efecto real, y de gran magnitud. El aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera provoca la intensificación del efecto invernadero, que será de algo más de 1 °C cuando los niveles de CO<sub>2</sub> lleguen al doble de los niveles preindustriales.

La controversia es mayor en relación con la retroalimentación, pero el cálculo de la retroalimentación a partir de la recuperación desde la última era glacial (véase el apartado anterior sobre «La era glacial», incluida la nota 15) arroja una predicción según la cual doblar la cantidad de CO<sub>2</sub> con respecto a la época preindustrial producirá un aumento de temperatura de 3 °C, lo que concuerda correctamente con los cálculos del IPCC de un aumento de entre 1,5 °C y 4,5 °C.

Así pues, los cálculos del IPCC parecen bastante razonables. Sus resultados, basados en modelos informáticos, cuentan con el respaldo de argumentos que son independientes de dichos modelos. Eso, por supuesto, debería aumentar la confianza en la validez de los modelos informáticos.

**Conclusión**

El calentamiento global antropogénico se apoya en una ciencia muy sólida. La discusión en el seno de la comunidad científica que se dedica al cambio

climático es sobre cuál es la magnitud del calentamiento global antropogénico, y no sobre si este está teniendo lugar o no. Los argumentos opuestos expuestos por Alexander Cockburn carecen de validez científica.

Eso no significa que Cockburn y otros escépticos no deberían haber planteado algunas de las cuestiones que han planteado. La ciencia exige un constante escrutinio y el uso incorrecto de la ciencia, cuando tiene lugar, debe preocupar a todo el mundo. Aun así, es importante reconocer una verdad cuando esta está bien establecida. El veredicto ha sido dictado. El calentamiento global moderno provocado en notable medida por causas antropogénicas es un hecho real y representa una grave amenaza para la vida sobre el planeta tal y como ahora la conocemos. Ha llegado la hora de dejar de debatir sobre su realidad y hacer algo al respecto, mientras aún estemos a tiempo.

### Notas

1. Alexander Cockburn, «Is Global Warming a Sin?», sitio web *CounterPunch*, 28/29 de abril de 2007, <http://www.counterpunch.org/cockburn04282007.html>. Edición impresa de *The Nation*, 14 de mayo de 2007, <http://www.thenation.com/doc/20070514/cockburn>; Alexander Cockburn, «Who Are the Merchants of Fear?», sitio web *CounterPunch*, 12 de mayo de 2007, <http://www.counterpunch.org/cockburn05122007.html>, edición impresa de *The Nation*, 28 de mayo de 2007, <http://thenation.com/doc/20070528/cockburn>; Alexander Cockburn, «Dissidents Against Dogma: Sources and Authorities», sitio web *CounterPunch*, 9 de junio de 2007, <http://www.counterpunch.org/cockburn06092007.html>, publicado en *The Nation*, 25 de junio de 2007, <http://thenation.com/doc/20070625/cockburn>.
2. John Farley, «The Ozone Hole, the Greenhouse Effect, and Global Warming», Conferencia en el Foro Universitario, Universidad de Nevada, Las Vegas, 26 de enero de 2001.
3. Alexander Cockburn, «The Greenhousers Strike Back, and Strike Out», cartas de los lectores a *The Nation*; Cockburns responde, edición impresa de *The Nation*, 11 de junio de 2007, <http://thenation.com/doc/20070611/cockburn>. Véase también las cartas en el sitio web de *The Nation*, <http://thenation.com/bletters/20070528/cockburn>, <http://thenation.com/bletters/20070625/cockburn>, <http://thenation.com/bletters/20070611/cockburn>.
4. Ese efecto se denominó en origen efecto invernadero porque se creía que explicaba la temperatura más alta que existe en el interior de los invernaderos, en comparación con la temperatura media en su exterior. Las ventanas de un invernadero son transparentes para el espectro visible, y opacas para parte de los infrarrojos. De hecho, el principal efecto que calienta los verdaderos invernaderos es que las ventanas evitan el intercambio de aire entre el exterior y el interior de estos.
5. La ley de Stefan-Boltzmann muestra la conexión entre la energía que irradia un cuerpo y el área y la temperatura, y se expresa mediante la fórmula  $P/A = e T^4$ , donde P es la energía de Watts,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ ),  $e$  es la emisividad ( $e$  es aproximadamente 1 para la Tierra), A es el área en  $\text{m}^2$  y T es la temperatura en grados Kelvin. La ley de Stefan-Boltzmann, hallada experimentalmente por Stefan en 1879 y deri-

vada teóricamente por Boltzmann en 1884, aparece en cualquier texto introductorio universitario de termodinámica. El cálculo que exponemos de la temperatura que tendría la Tierra en ausencia del efecto invernadero se puede encontrar en los libros de física. La intensidad de la radiación solar recibida es la llamada constante solar  $S_0 = 1.370 \text{ W/m}^2$ , que nos dice la máxima energía solar que incide sobre un metro cuadrado de área cuando el Sol está directamente encima. Si hacemos el promedio de toda la Tierra, teniendo en cuenta que la mitad de la tierra está a oscuras, y que el Sol no siempre está directamente encima, resulta que la energía solar media por metro cuadrado de la superficie terrestre es  $S_0/4$ , o  $343 \text{ W/m}^2$ , de la cual una fracción  $R_p$  es reflejada y una fracción  $(1-R_p)$  es absorbida. En el caso de la Tierra,  $R_p$  es un 0,3. De ahí obtenemos la expresión de la energía solar neta media que entra,  $343 (1-0,3) = 240 \text{ W/m}^2$ . La Tierra irradia calor en longitud de onda larga, con una energía por metro cuadrado determinada por la ley de Stefan-Boltzmann. Si equiparamos la energía solar que nos llega con la energía que irradia la Tierra, obtenemos una temperatura de equilibrio de  $255 \text{ }^\circ\text{K}$ , o  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $-1 \text{ }^\circ\text{F}$ ).

6. [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2\\_data\\_mlo.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html).
7. Dado que la mayoría de las tierras del planeta están en el hemisferio norte, el grueso de la vegetación y, por lo tanto, de la fotosíntesis y de la absorción de carbono se produce en el hemisferio norte entre los meses de primavera y de verano.
8. D. A. Peel, «Antarctic Ice», *New Scientist* 98, 1983, p. 477, citado en Richard P. Wayne, *Chemistry of Atmospheres*, Clarendon Press, Oxford, 1985, p. 342.
9. R. E. Dickinson, en W. C. Clark (ed.), *Carbon Dioxide Review*, Oxford University Press, Oxford, 1982, citado en Wayne, *Chemistry of Atmospheres*, p. 39.
10. V. Ramanathan y J. A. Coakley jr., «Climate Modeling Through Radiative-Convective Models», *Review of Geophysics and Space Physics* 16, n° 4, 1978, p. 465; Gavin Schmidt, <http://www.realclimate.org/index.php?p=142>. Gavin Schmidt es creador de modelos climáticos del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA. Schmidt presenta una relación de la absorción de infrarrojos, mientras que en este artículo presentamos la relación de la variación en la absorción de infrarrojos al retirar el gas indicado.
11. La presión se expresa en  $\text{W/m}^2$ .
12. La sensibilidad climática se puede expresar aproximadamente como  $1/(4 T^3)$ , donde es la constante de Stefan-Boltzmann y  $T$  es la temperatura de equilibrio en grados Kelvin. Véase John Seinfeld y Spyros Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Wiley, Nueva York, 1998, pp. 35-36. En cifras, dicha sensibilidad climática es de  $0,3 \text{ K(W/m}^2)^{-1}$ , lo que significa que si la presión aumenta en  $1 \text{ W/m}^2$ , la temperatura global de equilibrio aumentará en  $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se calcula que doblar el  $\text{CO}_2$  con respecto a los niveles preindustriales produce una presión de unos  $4 \text{ W/m}^2$ . Si multiplicamos  $0,3 \times 4$ , obtenemos un incremento de temperatura de unos  $1,2$  o  $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .
13. Véase A. Robock, «An Updated Climate Feedback Diagram», *Bulletin American Meteorological Society* 66, 1985, pp. 786-787, citado en Seinfeld y Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 1.095.
14. Seinfeld y Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 37.
15. Quien desconfía de todos los modelos, puede examinar la variación de la temperatura y de la presión solar entre eras glaciales (edad de hielo) e interglaciales (no edad de hielo). El cambio de temperatura que revelan las muestras de núcleos de hielo es de  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que el cambio de la presión solar es de  $7,1 \text{ W/m}^2$ . La sensibilidad climática calculada es, por lo tanto, de  $5/7,1 = 0,7 \text{ K(W/m}^2)$ . Se puede utilizar esa sensibilidad climática empíricamente calculada para predecir el aumento de temperatura derivado de una presión de  $4 \text{ W/m}^2$  como consecuencia de doblar el  $\text{CO}_2$  atmosférico en relación con los niveles preindustriales. El resultado es un aumento previsto de la temperatura de  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

- que es perfectamente coherente con las predicciones del IPCC de entre 1,5 y 3,5 °C (Seinfeld y Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 1.102).
16. J. Lean y D. Rind, «The Sun and the Climate», *Consequences* 2, nº 1, 1996, pp. 27-36, citado en Seinfeld y Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, p. 1.085.
  17. Cockburn, «Is Global Warming a Sin?».
  18. Cockburn, «Dissidents Against Dogma».
  19. Wayne, *Chemistry of Atmospheres*; Seinfeld y Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*.
  20. IPCC 2004 Report, capítulo 2, p. 138.
  21. Cockburn, «The Greenhousers Strike Back».
  22. Richard E. Zeebe y Dieter Wolf-Gladrow, *CO<sub>2</sub> in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*, Elsevier, 2001.
  23. Seinfeld y Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, pp. 1.089-1.090.
  24. Cockburn, «Dissidents Against Dogma»; Jeffrey Glassman, «The Acquittal of Carbon Dioxide», <http://www.rocketscientistsjournal.com/>. El doctor Glassman tiene formación en electrónica, satélites y misiles, pero no en química marina.
  25. Cualquiera que esté interesado en la historia de la ciencia que hay detrás del calentamiento global se beneficiará extraordinariamente de la lectura de Spencer Weart, *The Discovery of Global Warming*, Harvard University Press, Cambridge, 2003, y de su extenso trabajo disponible en <http://www.aip.org/history/climate/index.html>.