

## Forzamiento climático y retroefectos climáticos

Este texto se basa en mayor parte en el trabajo de Hansen et al. (2008, en adelante **JH08**)<sup>1</sup>, el cuál sirvió de base científica al movimiento *350.org*.

La temperatura de equilibrio de la Tierra es dada por la condición que el planeta irradia hacia el espacio la misma cantidad de energía que la que absorbe del sol, es decir del orden de  $240\text{W/m}^2$ . Este flujo corresponde al flujo de un cuerpo negro a  $255^\circ\text{K}$ . Este flujo de energía es el valor promedio que la Tierra emite y que uno pudiera medir si se observaría la Tierra desde el espacio.

El *forzamiento climático* se define como una perturbación en el equilibrio de energía del planeta. Tal desequilibrio es la causa directa de que la temperatura de la Tierra empieza a cambiarse lo suficiente como para restaurar el equilibrio. Por ejemplo, el *duplicar* la concentración de  $\text{CO}_2$  (desde el valor preindustrial de 280 ppm hasta 560 ppm) introduciría un desequilibrio de  $4\text{W/m}^2$ , el cuál implica que más energía estaría absorbida en la superficie de la Tierra (es decir,  $244\text{W/m}^2$ ) respecto a la energía que se sigue emitiendo hacia el espacio ( $240\text{W/m}^2$ ). Aplicando la ley de Boltzmann,  $F=\sigma T^4$ , la temperatura del suelo tendría que aumentar por  $\Delta T_o \approx 1.2^\circ\text{C}$  para restaurar el equilibrio de energía, suponiendo que este aumento fuera uniforme en la atmósfera y que sólo la temperatura del aire cambiara. Resulta que la temperatura de equilibrio puede variar más que este incremento debido a los efectos de retroalimentación, es decir, debido a los *retroefectos*.

<sup>1</sup> Hansen et al. (2008) "Target Atmospheric CO2: Where Should Humanity Aim?", Open Atmos. Sci. J., 2, 217-231.

*fectos*. Cada uno de estos contribuye a amplificar o a disminuir la respuesta del clima. Definiendo  $T_{eq}$  como la temperatura al equilibrio, antes del inicio de la perturbación, podemos definir el *cambio promedio* de temperatura,  $\Delta T_{eq}$ , a la superficie de la Tierra, que es requerido para restablecer el equilibrio de energía de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}\Delta T_{eq} &= f \times \Delta T_o \\ &= \Delta T_o + \Delta T_{retroefectos} \\ &= \Delta T_o + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots\end{aligned}$$

Donde  $f$  es el factor de retroalimentación neta, siendo unitario en ausencia de retroefectos. Los  $\Delta T_i$  corresponden a los incrementos de temperatura debido a retroefectos específicos. El papel de los diferentes retroefectos es más claro si usamos el concepto de ganancia  $g$ :

$$\begin{aligned}g_{neto} &= \Delta T_{retroefectos} / \Delta T_{eq} \\ &= (\Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots) / \Delta T_{eq} \\ &= g_1 + g_2 + \dots\end{aligned}$$

donde las ganancias  $g_i$  son positivas cuando se trata de retroefectos positivos (que aumentan la respuesta del clima), y negativos cuando se trata de retroefectos que disminuyen dicha respuesta. Obviamente, se puede relacionar el factor  $f$  y la ganancia total  $g_{neto}$  de la manera siguiente:

$$g_{neto} = 1 - 1/f ; f = 1 / (1 - g_{neto}) .$$

Es importante tener claro cuál es la perturbación que está considerando uno al definir las cantidades  $g_{neto}$  o  $f$ . Uno podría por ejemplo considerar un forzamiento debido al cambio de irradiación solar en vez de un cambio en el  $\text{CO}_2$ . Hay dos aspectos más que valen la pena subrayar aquí. Nótese primero que, en la definición de ganancia, no está presente de manera explícita el forzamiento debido a la perturbación responsable del cambio ( $\Delta T_o$ ). Segundo,  $g_{neto}$  no puede exceder 1 y, por otra parte,  $f$  tiende al infinito cuando  $g_{neto} \rightarrow 1$ .

La propiedad aditiva de las ganancias  $g_i$  es una característica muy útil

que nos va a servir para clarificar el proceso de retroefecto. El valor de  $g_{neto}$  (o de  $f$ ) depende del estado climático, en particular de su temperatura  $T_{eq}$  (antes del inicio de la perturbación). En efecto, el valor de  $T_{eq}$  o el estado climático pueden afectar la eficiencia de una o mas ganancias  $g_i$ . Por ejemplo, si consideramos un estado climático inicial muy caliente donde no existen casquetes de hielo, el retroefecto tierra-hielo sería cero.

Es relativamente sencillo cuantificar el desequilibrio en la energía que se absorbe en la Tierra a resulta de un aumento o una disminución de la concentración de  $\text{CO}_2$  (usando, por ejemplo, el algoritmo MODTRAN). Lo que es más complicado y queda todavía un tema de investigación, es determinar la respuesta completa del clima, tomando en cuenta todos los retroefectos. Entra en esta cuestión el concepto de *sensibilidad climática al equilibrio*, que vamos a definir como  $\Sigma$ . Si no hubieran retroefectos, y  $\Delta T_{eq}$  fuera tan sólo de  $+1^\circ\text{C}$  al duplicar el  $\text{CO}_2$ , esto resultaría en una sensibilidad climática de  $\Sigma = 1^\circ\text{C} \div 4\text{W/m}^2 = 1/4^\circ\text{C m}^2/\text{W}$ . Tomando los retroefectos en cuenta, la sensibilidad climática es mucho mayor a este valor. El mejor estimado al que llegó el IPCC en su informe de 2007 es de  $3/4^\circ\text{C m}^2/\text{W}$ , pero con un error no despreciable<sup>2</sup>.

Adoptando este valor de sensibilidad climática y basándonos en las ecuaciones anteriores, tenemos que:

<sup>2</sup> Nótese que la sensibilidad climática tal como fue definida inicialmente por Jule Charney (1979) correspondía al aumento de  $T_{eq}$  que resulta de *duplicar* el  $\text{CO}_2$ . Con esta definición, el valor que propone el IPCC es  $\Delta T_{eq} = 3^\circ\text{C}$ , pero corresponde a un forzamiento de  $-4\text{W/m}^2$  (y no de  $1\text{W/m}^2$  como lo supone nuestra definición de  $\Sigma$ ). El IPCC determinó que era muy poco probable  $\Delta T_{eq}$  fuera menor a  $1.5^\circ\text{C}$  o mayor a  $4.5^\circ\text{C}$  (es decir,  $0.38 < \Sigma < 1.1$ )

$$f = \Delta T_{eq} / \Delta T_o \approx 3/1.2 = 2.5$$

Por lo tanto la ganancia neta que uno puede inferir de los retroefectos rápidos es  $g_{neto} = 0.6$ .

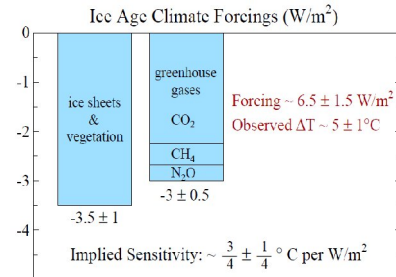
Voy a abrir un paréntesis acerca de los actores sociales que niegan que nuestra civilización esté incurriendo un grave peligro a no reducir sus emisiones de gas a efecto invernadero. Los negacionistas se dividen en dos grupos: los que niegan que haya calentamiento. Se basan en que a veces la temperatura promedio baja y no está monotonamente subiendo. Esto resulta de que uno no puede (o no quiere) distinguir entre lo que es el *tiempo* de lo que es el *clima*. El primero, por definición, es muy variable, mientras que el segundo corresponde a un promedio sobre una base temporal suficientemente larga<sup>3</sup>. El segundo grupo de negacionistas es más sofisticado. Proponen un modelo alternativo del clima cuya propiedad esencial es de reducir la sensibilidad  $\Sigma$  a su valor mínimo de  $1/4^\circ\text{C m}^2/\text{W}$  (¡o todavía menor aún!). Es un derecho inalienable de cualquier científico poder buscar la validez de hipótesis alternas, que nos parezcan plausibles o no. Por otra parte, la realidad es que los pocos que se aferran en esa dirección no lograron hasta la fecha convencer a sus pares de la comunidad científica de la validez de sus modelos alternos. Esto es lo que consta la literatura científica que tiene como base de autenticación el mecanismo de *referee* por pares de la misma especialidad (generalmente anónimos). El Internet, desafortunadamente no tiene ningún mecanismo acordado para evaluar las pretensiones que allí aparecen<sup>4</sup>,

<sup>3</sup> El océano tiene una inercia mucho mayor a la de la atmósfera, así que puede influir la temperatura del aire con escalas de tiempo que exceden de mucho el año. Por ejemplo, los fenómenos del Niño y de la Niña.

<sup>4</sup> Como ejemplo, consideren nada más la propuesta de que el fin del

algunas muy tendenciosas, y a menudo basadas en una agenda escondida.

Un valor de  $\Sigma$  de  $3/4^\circ\text{C m}^2/\text{W}$  es sustentado no sólo por los modelos hidrodinámicos más completos del clima que tenemos hoy en día, sino también de manera empírica, basándose en datos paleoclimáticos, como lo ilustran JH08. Voy a resumir aquí su argumentación.



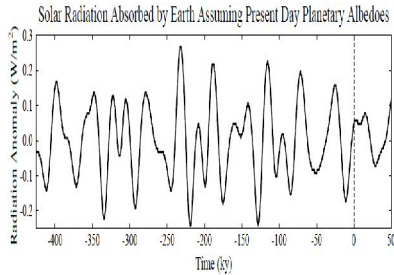
**Figure 1 Forzamientos que caracterizaron el máximo glaciar de hace 20,000 años relativo al periodo interglaciar presente (preindustrial).**

Un aspecto que primero debemos considerar es que los retroefectos operan con escalas de tiempo que pueden ser muy distintas. Se suele diferenciar entre los retroefectos *rápidos* y los *lentos*. Entre los rápidos, tenemos a los retroefectos siguientes: el vapor de agua, las nubes, los aerosoles (incluyendo el polvo) y el hielo del mar (por ejemplo, el hielo del Ártico). Entre los retroefectos lentos, tenemos a los casquetes continentales de hielo y a la concentración de gases de efecto invernadero. JH08 determinaron la sensibilidad climática debido a los retroefectos rápidos, usando datos paleoclimáticos del último máximo glaciar, de hace 20,000 años y los compararon con el clima del periodo actual, el Holoceno (los últimos 10,000 años, el interglaciar actual). Basándose en la temperatura y en las concentraciones de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub> que se midieron con el experi-

mundo tiene que ocurrir en el año 2012.

mento de forraje del hielo del Antártico (ver Fig. 1), se determinó que los forzamientos debido al retroefecto del albedo y de los gases invernaderos eran de  $3.5\text{W/m}^2$  y de  $3.0\text{W/m}^2$ , respectivamente, mientras que la diferencia de temperatura entre las dos épocas era de  $\Delta T_{eq} = 5^\circ\text{C}$ . Nótese que lo que hacen JH08 es considerar los dos retroefectos lentos: el retroefecto de albedo y el de efecto invernadero, como uno solo proceso perturbador. De allí sale que el valor que uno determina para  $\Sigma$ , debido a los retroefectos rápidos es dado por  $5 \div 6.5 \approx 3/4^\circ\text{C m}^2/\text{W}$ , un valor igualito al de los modelos numéricos del clima, pero sin otro cálculo más complicado que la simple división de 2 números. De allí, uno puede inferir que la ganancia de los *retroefectos rápidos* es el mismo que determinado anteriormente, es decir  $g_{rapidos} \approx 0.6$ .

Ahora bien, ¿que pasa si consideramos de manera conjunta todos los retroefectos, lentos y rápidos? La hipótesis de que los periodos glaciares y interglaciares corresponden a dos estados climáticos semi-estables y que el detonador para pasar de uno al otro es el efecto de presesión del eje terrestre acoplado con la elipticidad de su órbita, los cuáles resultan en un cambio no despreciable de la irradiación solar promedio que reciben las regiones a altas latitudes geográficas durante la primavera. Sin ir en más detalle, lo que es cierto es que el forzamiento global para todo el planeta debido a las perturbaciones de este tipo son muy pequeñas, unas pocas decenas de  $\text{W/m}^2$ . Esto se puede apreciar en la Fig. 2. Es tan pequeño que JH08 no descartan que el ruido climático fuera el verdadero detonador (es decir, el clima tendría una componente caótica significativa).



**Figure 2 Promedio anual y global de las perturbaciones generadas por las variaciones de irradiación solar absorbida por la Tierra. Este cálculo fue hecho suponiendo las distribuciones geográficas actuales del albedo y de sus variaciones con las temporadas.**

El punto aquí es que la verdadera sensibilidad climática en la época geológica actual es mucho mayor cuando se agrupan los retroefectos rápidos y lentos frente a una perturbación original pequeña (Fig. 2). En efecto, adoptando las estimaciones de JH08 de  $\sim 0.2$  para ambas ganancias correspondiendo a los retroefectos lentos, obtenemos que:

$$g_{neto} = g_{rápidos} + g_{albedo} + g_{gases} \\ = 0.6 + \sim 0.2 + \sim 0.2 \lesssim 1$$

es decir, la ganancia de los retroefectos lentos y rápidos es cerca a uno. Entonces, el clima que caracteriza la época geológica actual es inestable y posiblemente por esto se describe como una sucesión de épocas glaciares y interglaciares. Cuando mucho hielo está presente en el planeta, concluyen JH08,  $g_{neto}$  es cerca a uno y el clima resulta muy sensible a perturbaciones pequeñas. Por lo tanto, no hay que sorprenderse que en todo el Pleistoceno (los últimos 1.8 millones de años) están ocurriendo estas fuertes oscilaciones de temperatura, cada  $\sim 100,000$  años. JH08 argumentan que la sensibilidad climática actual es  $\Sigma_{tot} = 1.5^\circ C \text{ m}^2/\text{W}$ , incluyendo los retroefectos lentos, es decir, el doble del valor que infiere uno de los retroefectos rápidos, y que además, este valor caracteriza el clima terrestre desde los últimos 35 millones de años.

Ahora bien, volvemos a la cuestión de las emisiones antropogénicas de gases a efecto invernadero, las cuales consideramos en lo que sigue como una *perturbación*. Podemos determinar la ganancia neta, pero esta vez incluyendo el retroefecto lento del albedo,  $g_{albedo}$ . Obviamente, el albedo disminuirá al calentarse la Tierra (a través del derretimiento del hielo). Tenemos que

$$g_{neto} = g_{rápidos} + g_{albedo} + g_{gases} \\ = 0.6 + \sim 0.2 \approx 0.8$$

Usando la relación  $f = 1/(1 - g_{neto})$  obtenemos que  $f = 5$  y por lo tanto si duplicamos la concentración de  $\text{CO}_2$ , obtenemos que

$$\Delta T_{eq} \approx f \times \Delta T_o = 5 \times 1.2^\circ C = 6^\circ C$$

Este valor de  $\Delta T_{2x}$  (el aumento de  $T_{eq}$  al duplicar el  $\text{CO}_2$ ) es un valor sumamente preocupante, considerando que los gobiernos del planeta están negociando este año maneras de evitar un aumento<sup>5</sup> mayor a  $2^\circ C$  y se basan en una sensibilidad climática que corresponde nada más a la mitad de esta sensibilidad. Consideren el dato adicional que, hasta la fecha, la temperatura promedio del planeta sólo aumentó un  $0.7^\circ C$  y ya se está derritiendo el hielo del Ártico. Además, sabemos que este aumento de  $0.7^\circ C$  no es el valor asintótico, sino un valor transitorio y que el valor final va a ser mayor, aún si a partir de mañana reluciéramos nuestras emisiones a cero.

Vamos a adoptar este valor de  $\Delta T_{2x} = 6^\circ C$  que considera el retroefecto lento del albedo debido al hielo, y estimar cuál sería la temperatura promedio si logremos reducir la concentración de  $\text{CO}_2$  a 350ppm, como lo proponen JH08. Para ello, usaremos la ecuación 4.1 de Archer

<sup>5</sup> No está tan claro que tan deseable es este límite de  $2^\circ C$  propuesto por varios gobiernos y el IPCC, pero bueno.

(p. 36) donde se puede especificar la concentración que uno quiere:

$$\Delta T_{eq} = \Delta T_{2x} \times \frac{\ln(\text{nueva } p\text{CO}_2 / 280 \text{ ppm})}{\ln(2)} \\ = 6^\circ C \times \frac{\ln(1.25)}{10.693} = 6 \times 0.32 \approx 1.9^\circ C$$

donde 280ppm es el valor preindustrial. La conclusión final es que si estamos realmente serios con nuestra meta declarada de no exceder el  $2^\circ C$ , el valor meta de concentración de la humanidad debe de ser cercano a 350ppm, y no a 450ppm, como lo proponen (sin decirlo claramente) varios gobiernos desarrollados y que equivale a despreciar totalmente el retroefecto del albedo (debido al derretimiento del hielo). Espero que este artículo aclare por qué, según los resultados de JH08, esta meta de 350ppm es la que se debe de perseguir. Ya hemos pasado por delante de esta meta, pero dado que el océano todavía absorbe la mitad de nuestras emisiones, es todavía factible bajar a este nivel de concentración si bajamos suficientemente nuestras emisiones de  $\text{CO}_2$ . ¿Con qué velocidad debemos bajar nuestras emisiones? Éste es el punto ágil de esta (nueva) cuestión.

.....  
**→Tarea:** en media cuartilla, resumir como se deriva el resultado numérico de 350ppm y cuál es la argumentación básica detrás de este valor meta. Proponer correcciones y o mejoras al texto. ¿Qué preguntas nacen de su lectura?