

Fundamentos científicos del calentamiento global

Guillermo Sánchez

Desde hace unos 35 años se está produciendo se viene incrementando sustancialmente la temperatura media del planeta. ¿Nos encontramos ante un cambio climático excepcional? ¿Son los gases invernadero emitidos por los seres humanos el causante? ¿Qué consecuencias puede tener? ¿Qué podemos hacer? A estas preguntas trata de responder el cuarto informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático. Hay indicios claros de un deshielo que afecta principalmente a Groenlandia y la Antártida, sin embargo persisten muchas incertidumbres de cuales serán las consecuencias en lo que resta de siglo. En cualquier caso, parece claro que si no se reducen en breve sustancialmente las emisiones de gases invernadero la tendencia en el incremento de temperatura, y sus consecuencias asociadas, persistirán más allá del siglo XXI

For the last 35 years, the average temperature of the planet has been steadily increasing. Are we witnessing an exceptional climate change? Are the greenhouse gases emitted by human beings the cause? What will the consequences be? What can we do? The fourth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change tries to answer these questions. There are clear signs of thawing that primarily affect Greenland and the Antarctic, but there are still many doubts about what the consequences will be throughout the century. In any case, it seems obvious that, if greenhouse gas emissions are not substantially reduced very soon, the rising temperature trend and its associated consequences will persist beyond the 21st century.

LA ATMÓSFERA DE LA TIERRA EN EL PASADO

El clima en la Tierra viene variando desde que hace más de 4000 millones de años la Tierra se rodeó de una atmósfera, en parte debido al impacto de cometas que la dotaron de casi toda el agua que ahora tiene. La atmósfera primigenia se parecería sustancialmente a la actual de Venus con un contenido altísimo en CO_2 . Así se mantuvo durante más de 2000 millones de años. Entonces apareció la fotosíntesis y el CO_2 fue siendo sustituido por oxígeno. La irradiación solar ha ido aumentando desde la formación del Sol como consecuencia de las reacciones termonucleares que ocurren en su núcleo. Al principio casi todas las reacciones de fusión procedían de interacciones hidrógeno y helio. Tal cual se van consumiendo los isótopos de estos elementos se generan otras reacciones más energéticas con isótopos más pesados que aumentan la irradiación. Por esta causa la irradiación solar que recibe la Tierra ahora es 25% veces mayor que cuando se formó. En esa primera época el efecto invernadero causado por la alta concentración de CO_2 hizo que la temperatura del planeta se

mantuviese sustancialmente por encima de la que le correspondía si no existiese ese CO_2 , permitiendo que existiese el agua líquida. Incluso hoy en día sin CO_2 la temperatura media del planeta sería de 18 °C bajo cero.

Normalmente las variaciones climáticas se han ido produciendo de forma suave, en comparación con la vida humana, aunque periódicamente ocurren episodios catastróficos (vulcanismo intenso, impactos de meteoritos, etc.) cuya principal consecuencia es provocar cambios climáticos que han dado origen a extinciones masivas. La extinción más conocida es la de los dinosaurios en el cretáceo (hace 65 millones de años). Con anterioridad habían tenido lugar al menos cuatro grandes extinciones, siendo la más destructiva la del pérmico que acabó con el 95% de las especies.

Otro factor fundamental en los cambios climáticos son las glaciaciones que se producen ciclicamente debido a las características de la órbita terrestre. La última glaciación alcanzó su momento álgido hace 18000 años en el que una parte importante del hemisferio norte quedó cubierta por gigantescas capas de hielo de 3 o 4 km de espesor, similares a la del actual Inlandis en Groenlandia. El



GUILLERMO SÁNCHEZ es Doctor en Matemáticas, Físico e Ingeniero Técnico de Minas. Trabaja en ENUSA Industrias Avanzadas S.A. desde 1983. Ha escrito más de 80 artículos y ponencias. Es profesor asociado de matemáticas en la Universidad de Salamanca.

posterior deshielo incrementó el nivel del mar en 130 m. En la actualidad deberíamos haber alcanzado el punto de inflexión de un periodo interglaciar encaminándonos hacia una nueva glaciación. Sin embargo los datos parecen indicar lo contrario, al menos por el momento.

¿ESTÁ REALMENTE CAMBIANDO EL CLIMA?

Desde 1850, que se tienen registros instrumentales, se ha producido un incremento de la temperatura media del planeta que ha sido mucho más evidente desde 1970 (figura 1). Se estima que de 1906 a 2005 el incremento medio fue 0.74 °C (0.56 a 0.92) °C, siendo más acusado en el hemisferio boreal. La casi totalidad del incremento observado se ha producido en los últimos 35 años.

Algo similar ha ocurrido con el nivel del mar que ha aumentado en los últimos años (1993-2003) a una tasa de 3.1 (2.4 a 3.8) mm/año (figura 1), casi el doble de la que se obtiene si consideramos un periodo más amplio. La mayor parte del aumento es atribuida a la expansión térmica del agua. También se observa una disminución en los hielos y en variaciones en

la pluviométrica que ha aumentado en algunas zonas (ej.: Norteamérica y Sudamérica) disminuyendo en otras, como es en el Mediterráneo y en el Sahel. Respecto a los glaciares parece claro que algunos de los más importantes están disminuyendo su superficie, en particular Groenlandia. La superficie cubierta del hielo del Ártico también está disminuyendo. Es curioso que otros casos, como el Kilimanjaro que se muestra, por su espectacularidad, como paradigma de efecto del cambio climático probablemente no sea así. Se sabe que perdió la mayor parte de su capa helada antes de 1960, en un periodo en el que no se observaron incrementos de temperatura. Su deshielo es atribuido a un efecto de sublimación asociado a su posición en el ecuador. No parece correcto, como ocurre en algunos documentales, mostrar una foto del Kilimanjaro de 1912 y otra de 2006 como ejemplo de efectos del cambio climático, sin indicar que en 1960 la situación ya era muy parecida a la actual.

El informe es menos concluyente en sus apreciaciones cuando se refiere a periodos más largos. Por ejemplo dice que probablemente (con un 66% de probabilidad) la segunda mitad del siglo XX es el periodo más cálido de los últimos 1300 años. Del año 950 al 1100 fue una época cálida, aunque de unas décimas de grado menos que la actual. Hace pocos años viajé a Groenlandia y visite el primer asentamiento en dicha isla que fue realizado por el vikingo Eric El Rojo en torno a 980, en plena época cálida. Los vikingos abandonaron Groenlandia alrededor del año 1400, coincidiendo con el inicio de un periodo frío, conocido como la Pequeña Edad del Hielo, que se prolongaría más de cuatro siglos.

Otro episodio climático pudo ser una de las causas que provocaron el fin de la civilización maya. Cuando se visita el corazón de la misma (Mesoamérica) sorprende que de forma repentina se colapsara dicha civilización con un abandono masivo de sus ciudades con imponentes construcciones. La composición isotópica del oxígeno encontrado en las conchas fósiles procedentes de sedimentos de los lagos de la península del Yucatán muestra que en dicha zona se produjo un periodo extraordinariamente seco, en torno a 1100-1300, que justamente coincide con el fin de la civilización maya (¿Coincidencia o causa?).

Por eso es fundamental dilucidar si el incremento de temperatura observado en los últimos años es realmente excepcional. Parece ser que es así, al menos para los últimos 1300 años en los que los datos de temperatura se conocen con una precisión alta. Así se ha podido deducir por varios caminos (las capas que

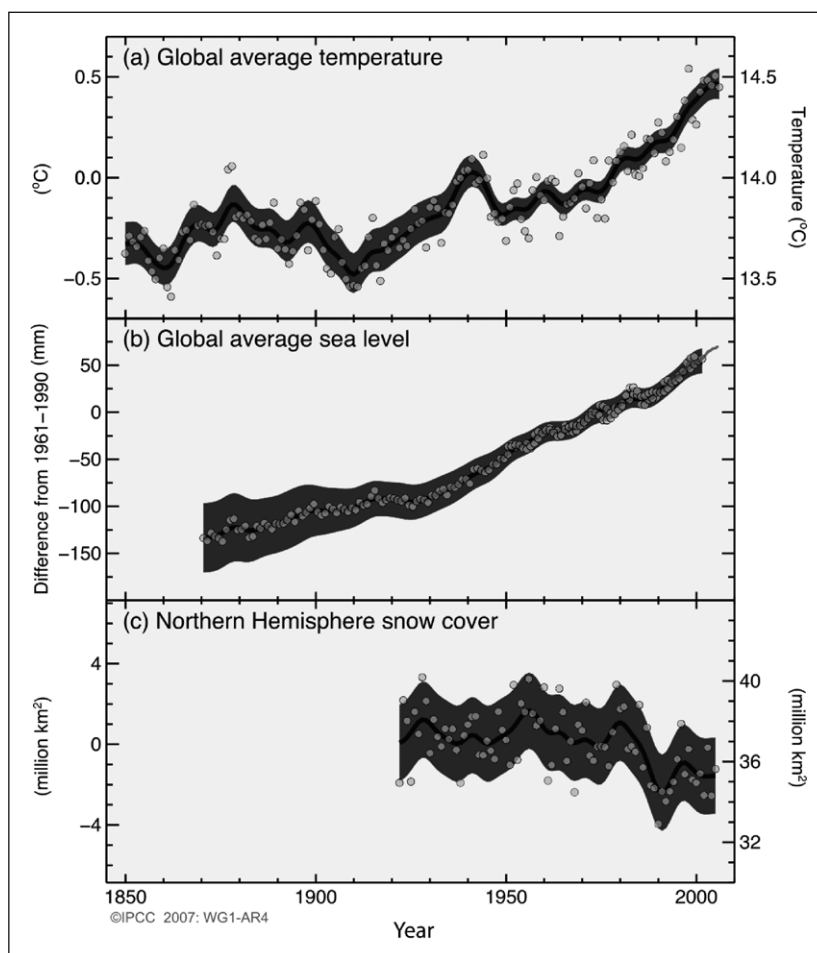


Figura 1. Evolución de los valores medios de temperatura, nivel del mar, y superficie cubierta de nieve (en el hemisferio norte). Se toma como valor de referencia la media del periodo 1961-1990. (Fuente: 4º Informe IPCC)

forman los troncos de árboles antiguos, composición de hielos permanentes, etc.). Para periodos de hasta 400000 años se utilizan como indicador de temperatura las composiciones isotópicas del oxígeno e hidrógeno obtenidas de muestras de hielos permanentes procedentes del Inlandis y de del continente antártico. El grado de precisión es insuficiente para asegurar categóricamente, como algunos hacen, que la temperatura actual es la más alta de ese periodo. También se utiliza como referencia el nivel del mar: menor temperatura provocaran más hielos sobre las superficies continentales y consiguientemente un nivel del mar bajo y viceversa. Así sabemos que en el actual periodo interglaciario (el Holoceno), el nivel del mar es más bajo en 2 o 3 metros que en el anterior periodo interglaciario (el Eemianense) que se produjo hace unos 70000 años. De ello se deduce que en ese periodo las temperaturas fueron probablemente más altas que las actuales. Con esto lo que pretendo poner de manifiesto es que las afirmaciones categóricas del tipo "la más alta de 200000 años" y

otras parecidas hay que tomarlas con mucho escepticismo. Lo importante no es saber si tenemos el récord temperatura del cuaternario. Lo importante es dilucidar si nuestra influencia sobre el clima es lo suficientemente importante como para que se vuelva contra nosotros mismos.

¿ES EL HOMBRE RESPONSABLE DEL CAMBIO CLIMÁTICO?

Entre 1995 y 2006 se han registrado los 11 años (sobre 12) más calurosos desde que se tienen registros instrumentales (1850). Desde un punto de vista estadístico es muy improbable que se produzca una racha continuada de incrementos de temperatura de forma aleatoria. De persistir la tendencia de los últimos 50 años estaríamos ante variaciones en las condiciones climáticas extraordinarias. Sabemos que deberíamos encaminarnos a un periodo glaciario, el suave enfriamiento esperado es compensado sobradamente por una tasa de incremento de temperatura

muy superior. No obstante a largo plazo (15000 años), sin la distorsión producida por el hombre, podemos asegurar que acabaremos en una nueva edad del hielo, donde gran parte de lo que ahora denominados Mundo Desarrollado quedará cubierta por el hielo. No cabe duda de que si la civilización que conocemos sigue hasta entonces deberá tomar medidas para evitar el enfriamiento global. Puede parecer paradójico pero de esta afirmación podemos estar mucho más seguros que de cual será el clima dentro de 300 años. Por ahora parece que lo más razonable es preocuparnos por el siglo en el que estamos.

El clima es algo verdaderamente complejo. Esquemáticamente podemos decir que los agentes que más contribuyen a su evolución global son: la irradiación solar y terrestre (la desintegración radiactiva de los isótopos naturales y el enfriamiento del manto son una fuente de irradiación interna), la composición de la atmósfera (incluido gases y aerosoles), el agua en su distintas formas (océanos, hielos, nubes), y el albedo superficial (reflectividad de la superficie terrestre. Por ej.: la nieve refleja más que los bosques). De los factores anteriores donde más puede actuar el hombre es en la composición atmosférica, reduciendo hasta casi eliminar la emisión de gases invernadero (CO_2 , metano, óxido nítrico y halocarburos). Pero también puede intervenir sobre los cultivos que modifican el albedo e influyen en la presencia de CO_2 y metano (las plantaciones de arroz son grandes emisoras de éste gas). Probablemente la extinción de especies que se está observando este más influida por la ocupación de espacios por la especie humana que por cualquier otra causa, incluido el cambio climático.

La composición de la atmósfera se conoce con bastante precisión para un periodo de 400000 años. Esto es posible pues la niebla al caer atrapa los gases de la época, cuando se hiela los gases quedan confinados en el hielo. En zonas de hielos permanentes como la Antártida y Groenlandia, las capas de hielo más profundas tienen una antigüedad de 400000 años, las muestras obtenidas de estas capas son un auténtico viaje al pasado. Ese periodo abarca las últimas cuatro glaciaciones. Los resultados muestran que en los periodos interglaciares la concentración de CO_2 es sustancialmente más alta que en plena glaciación. Esto sugiere que, dado que las glaciaciones tienen un origen astronómico, el cambio de la concentración de CO_2 podría producirse como consecuencia de variaciones en la temperatura y no a la inversa. El acuerdo general es que se trata de un efecto de retroalimentación en el que ambos factores inter-

vienen. Sin embargo desde el inicio de la época industrial, hace unos 200 años, la concentración de gases invernadero está experimentando un incremento drástico. Es razonable pensar que este incremento esté relacionado con la actividad humana. Los datos son mucho más concluyentes desde 1955, gracias al empeño de un científico, Keeling, que instaló un medidor de CO_2 en Hawai, donde se ha comprobado un incremento continuado de CO_2 registrándose en los últimos 10 años la concentración más alta del periodo. Pero aun así ¿podemos estar seguros que somos los humanos los responsables del incremento de estos gases? El IPCC entiende que así es. Argumenta que algunos gases invernadero (como los halocarburos) no se producen en la naturaleza. En el caso de otros gases se observa que las concentraciones más altas se dan en las zonas más densamente pobladas. Además, en el caso del CO_2 su composición isotópica muestra que en gran parte procede de la combustión de los combustibles fósiles. Esto se sabe pues los combustibles fósiles prácticamente carecen de carbono 14 ya que éste se ha desintegrado en su totalidad, el CO_2 de origen natural presenta una concentración relativamente constante de 14C debido a que se produce en la estratosfera continuamente por las interacciones con los rayos cósmicos.

Hay otros factores que refuerzan la hipótesis de que el cambio climático está influenciado sustancialmente por la intervención humana:

a) El calentamiento es mayor sobre el continente que sobre el océano y mayor en la superficie del mar que en las capas profundas. Esto se explica suponiendo que el calentamiento inducido por gases invernadero de origen antropogénico: primero calientan la troposfera (la atmósfera más próxima a la superficie), a continuación las aguas superficiales desde donde se va transmitiendo hacia aguas profundas.

b) La troposfera se ha calentado mientras que la estratosfera (que está inmediatamente encima) se ha enfriado. También se explica asumiendo que el origen son los gases invernadero antropogénicos que calientan la troposfera y a su vez disminuyen el ozono estratosférico (éste tiene un efecto de enfriamiento). Si la causa fuese cambios en la irradiación solar ambas capas se calentarían por igual.

¿En qué medida el incremento de estos gases afecta al clima? Para cuantificar estos procesos se recurre al concepto de forzamiento radiativo. Se entiende por tal al cambio causado en el equilibrio global de energía de la Tierra con respecto al que tenía en la época preindustrial, se expresa en vatios por me-

tro cuadrado. La figura 2 muestra el estado del conocimiento actual sobre los factores que más contribuyen el forzamiento radiativo. Se puede observar que además de los gases invernadero hay otros factores que también influyen de forma significativa. Algunos presentan un carácter fuertemente negativo, como los aerosoles que impiden el paso de la luz solar causando un efecto de enfriamiento. Se presenta una situación aparentemente paradójica: Las medias que se han tomado para reducir la emisión de partículas estarían contribuyendo a acelerar el efecto invernadero, esto explicaría parcialmente la aceleración en el incremento de temperatura producida en últimos años. El resultado global de la figura 2 es que el reforzamiento radiativo de origen antropogénico en media es de 1.6 W/m^2 pero el verdadero valor estará con un 90% de probabilidad en el intervalo ($0.6 - 2.4$) W/m^2 . Esta cifra corresponde al balance entre la energía que nos llega del Sol que en media es 340 W/m^2 , y la energía saliente que es 338.4 W/m^2 . En un sistema en equilibrio el balance es cero, pero vemos que es 1.6 W/m^2 (equivalente a una pequeña bombilla navideña cada metro cuadrado de superficie terrestre, incluidos océanos, brillando permanentemente). Puede parecer poco pero van alejando a la Tierra de las condiciones de equilibrio. Este calor es atrapado y su energía se disipa calentando los océanos y fundiendo las capas de hielo y nieve. El intervalo de incertidumbre es considerable ($0.6 - 2.4$) W/m^2 y las consecuencias variarán mucho dependiendo si el valor real está más cerca del límite superior o del inferior. Cuando se intentan hacer valoraciones sobre efectos locales las incertidumbres aumentan. La atmósfera es un ente global en la que los sucesos concretos no se pueden sustraer del conjunto pero establecer relaciones entre hechos locales, como el huracán Katrina, y el cambio climático cae dentro de la especulación, aunque se justifique citando al efecto mariposa, frecuentemente mal interpretado.

¿PODEMOS PREDECIR EL FUTURO?

La situación es aún más complicada cuando se intentan hacer predicciones a largo plazo. En algo tan complicado como es el comportamiento de la atmósfera no se dispone de modelos que, a semejanza de las leyes de Newton, puedan predecir con exactitud el futuro. Los modelos se contrastan con el pasado combinando la evolución sin efecto antropogénico más el reforzamiento radiativo producido por la intervención humana. El resultado se compara con la evolución que realmente se ha pro-

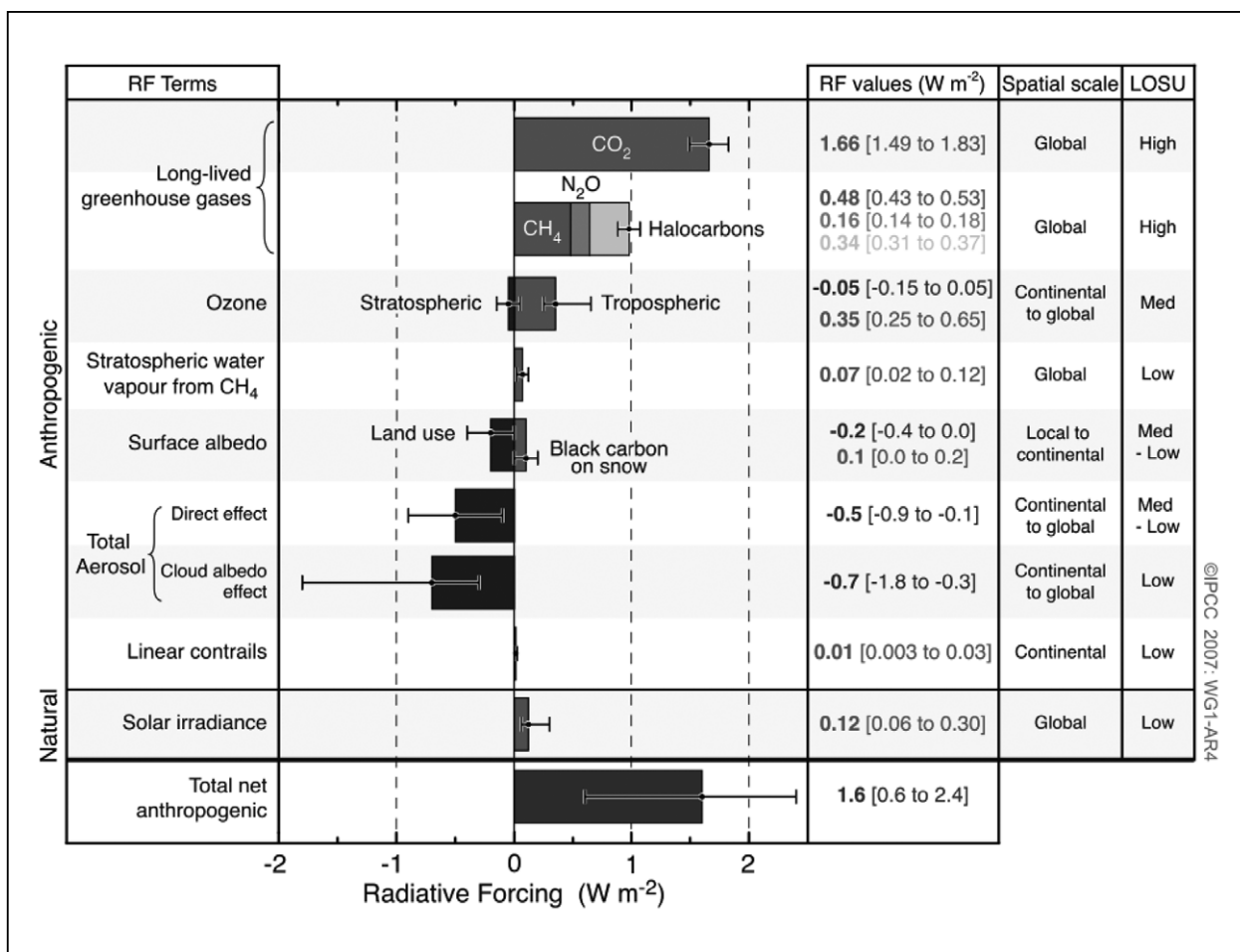


Figura 2. Reforzamiento radiativo (RF) actual para los factores más significativos que inciden en el balance energético. Se incluye los intervalos de confianza calculados con un 90% de incertidumbre. El balance neto promedio es 1.6 W/m², que corresponde al calor que queda atrapado en el planeta. (Fuente: 4º Informe IPCC)

ducido obteniéndose una concordancia aceptable. Aun así sigue persistiendo grandes incertidumbres en el tratamiento de algunos parámetros, especialmente en el tratamiento de las nubes. Los modelos deben ser alimentados con distintos supuestos de tasas de emisiones de gases invernadero, y esto es mucho más difícil de prever. Por ejemplo.: España emite casi un 35 % más de lo que se comprometió a emitir en el acuerdo de Kioto. Para tratar estos casos el panel ha estudiado distintos escenarios para varios supuestos de emisión. Con las reservas anteriores el panel da como estimación más probable un aumento de la temperatura media global para finales del siglo XXI de 1.8 a 4°C (figura 3). Este rango es suficientemente amplio como para que las consecuencias varíen sustancialmente según nos encontremos en el límite inferior o superior del rango.

El IPCC hace estimaciones sobre el incremento del nivel del mar, llega a la conclusión de que a finales de siglo se habrá producido un aumento de 30 a 40 cm, a la que habría que añadir el

deshielo que observa en Groenlandia y la Antártida que podrían contribuir con otros 20 cm. Aunque importantes 50 o 60 cm dentro de 100 años no parece alarmante. Sin embargo el informe del IPCC sostiene que debido a la inercia térmica los efectos del deshielo, aunque se eliminen sus causas, persistirían en el siglo XXII y más allá hasta alcanzar las condiciones de equilibrio. El incremento del nivel del mar en el equilibrio se estima que estaría en un rango 1.0 a 3.7 m sobre el actual, según las hipótesis de emisión consideradas.

Los modelos utilizados por el IPCC suelen realizar tratamientos lineales y sin embargo sabemos que cuando se está lejos del equilibrio los efectos no lineales cobran una importancia relevante pudiendo modificar sustancialmente las conclusiones. Un efecto no lineal es el generado por la saturación de los océanos en su capacidad de actuar como sumidero de CO₂. Se sabe que el mar absorbe gran parte del CO₂ que acaba convertido en carbonatos. A partir de cierto momento el mar no será capaz

de diluir el CO₂ que le llega o lo hará con una velocidad mucho menor. En esa situación aunque se mantuviese constante las emisiones de CO₂ la concentración se iría incrementando exponencialmente y en consecuencia se experimentaría una aceleración en el calentamiento. Tal vez este efecto ya se está produciendo. Otros efectos no lineales serían la mayor presencia de nubes como consecuencia de temperaturas más altas que en vez de calentar producirían enfriamiento. Respecto a esto el panel reconoce que son incógnitas abiertas que propone sean investigadas. En definitiva, no sabemos como estamos de alejados de la situación de equilibrio ni somos capaces de predecir los efectos no lineales.

Según las interpretaciones de James Lovelock estamos alejándonos peligrosamente del equilibrio y caminamos a una situación de no retorno. Su argumento es el siguiente: Sabemos que desde principios de siglo XX la concentración de CO₂ ha ido aumentando a razón de 1 ppm/año hasta alcanzar 379

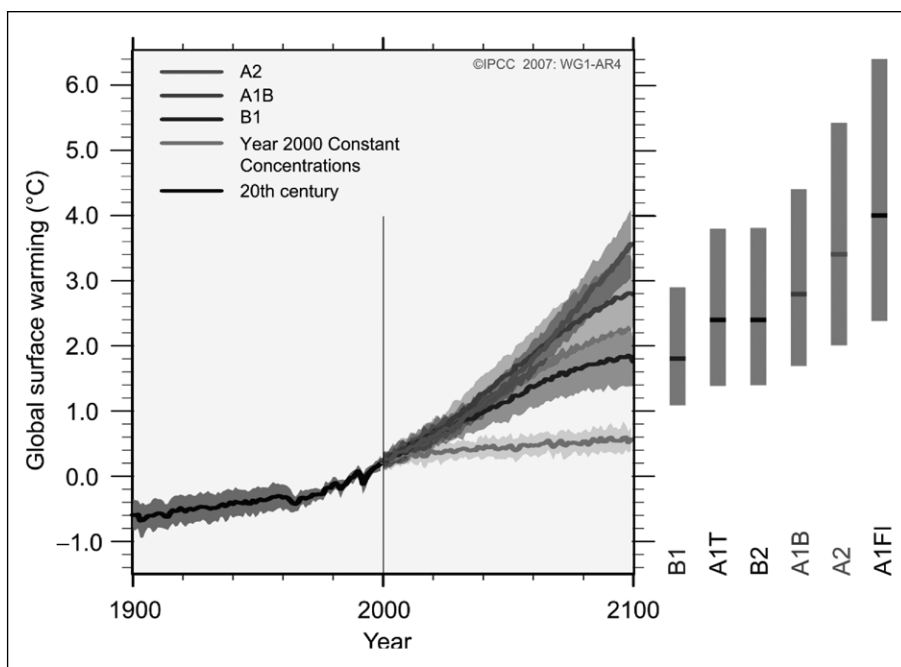


Figura 3. Las curvas representan la evolución futura de la temperatura estimada para los distintos escenarios estudiados por el IPCC. A la derecha de incluyen los intervalos de incertidumbre. Las mayores temperaturas se producen para las emisiones más altas de gases invernadero. En el escenario peor a finales del siglo XXI se producirían incrementos de temperatura de hasta 6 °C mayores que las actuales. Se da la circunstancia que la situación presente corresponde a los escenarios más pesimistas de informes pasados del IPCC. (Fuente: 4º Informe IPCC)

ppm en 2006. En estos momentos el ritmo de crecimiento es de 2 a 3 ppm/año. En 30 o 40 años llegaremos a 500 ppm y entonces el desequilibrio será tal que ya no se podrá tomar ninguna medida, el nivel del mar subirá en 8 o 9 m unos años después. Lo único que podrá hacerse es prepararse para los cambios inevitables que se avecinan. La hipótesis podría ser descartada sin más, sin embargo Lovelock es una prestigiosa autoridad (autor de la hipótesis Gaia) que ha visto confirmados muchos de los planteamientos que realizó en el pasado. Como solución para mitigar las consecuencias propone un recorte drástico de las emisiones de CO₂ mediante un plan muy ambicioso de construcción de centrales nucleares.

¿QUÉ PODEMOS HACER?

En el resumen para responsables políticos, aprobado en Valencia en noviembre 2007, en lo relativo a las medidas que sobre energía, se proponen las siguientes acciones para mitigar las consecuencias del cambio climático:

- Mejorar la eficiencia en los medios de suministro y transporte de la energía.
- Ir sustituyendo el uso del carbón por gas.
- Uso de la energía nuclear
- Empleo de energías renovables
- Aplicación de métodos de captura del CO₂ producido por las centrales de

combustibles fósiles, y almacenamiento en yacimientos de gas agotados.

Admitiendo que probablemente son las únicas medidas que pueden recomendarse, desde nuestro punto de vista, no está claro que en un plazo razonable puedan ser realmente efectivas.

i) El empleo del gas metano en lugar de carbón o petróleo aparentemente reduce el efecto invernadero pues para producir la misma energía se emite menos de la mitad de CO₂ que con el carbón. Sin embargo se sabe que el metano produce 20 veces más efecto invernadero que el CO₂, y existen serias sospechas sobre las fugas de metano en el transporte desde los pozos hasta su combustión. Si éstas son del orden del 1% (como en algunos informes se apunta) su efecto sería similar al carbón y al petróleo.

ii) El empleo de técnicas de captura de CO₂ está lejos de ser una técnica comercialmente operativa. Hay contadísimas instalaciones en operación. Cuando se calcula el volumen que se tendría que disponer para almacenar una parte significativa del CO₂ generado por centrales de combustibles fósiles se obtiene cifras impracticables, mucho más si este material hay que trasladarlo a pozos agotados de gas. Además no hay ninguna garantía que no acabe a la larga en la atmósfera (confinar miles de kilómetros cúbicos de gas es mucho menos seguro que uno miles de metros cúbicos de residuos radiactivos).

iii) Las energías renovables serán cada vez más importantes pero, aparte de su elevado coste, están estrechamente asociadas a condiciones meteorológicas y no permiten tener garantía de suministro. Desde luego por sí misma no puede ser un sustituto de los combustibles fósiles.

iv) El uso de la energía nuclear, en versiones borrador del documento final aparecía recomendada con reservas destacando algunas presuntas debilidades. En la versión final dichas reservas han desaparecido y se recomienda su empleo sin matizaciones, a pesar de que representantes del gobierno español intentaron que se mantuviesen reservas sobre su uso. Sin embargo todavía es contemplada por los políticos y por la población como una solución incómoda. Incluso en las previsiones más optimistas contemplan un porcentaje mundial de energía nuclear para 2030 parecido al actual (la energía nuclear es el 8% de la energía primaria mundial). Las existencias de uranio son limitadas (60 o 70 años de reservas conocidas a precios razonables),

sin embargo el uranio en los reactores actuales sólo se consume el 1,5% del total y hay tecnología disponible (reprocesado) que podría obtener 70 veces más energía del mismo material. Además el torio, más abundante que el uranio, también es utilizable para generar energía nuclear. Por tanto, potencialmente se podría producir energía nuclear de fisión para miles de años.

A la larga la tecnología va por caminos imprevisibles, y seguramente en algún momento del futuro, técnicas ahora impensables, probablemente basadas en reacciones nucleares, sustituirán favorablemente a las actuales. Aún en ese caso, en temas energéticos, los cambios requieren decenas de años y tal vez no dispongamos de ese tiempo. Debemos aprovechar lo que conocemos.

BIBLIOGRAFÍA

- Informes del IPCC: <http://www.ipcc.ch>
- Fundamentos físicos del cambio climático. W. Collins y otros. Investigación y Ciencia. Octubre 2007.
- El cambio climático. Colección de artículos de diversos autores. Tema 45. Investigación y Ciencia. Tercer trimestre 2006.
- El calentamiento global. S. Weart. Ed. Laetoli. 2007.
- La venganza de la Tierra. J. Lovelock. Ed. Planeta. 2007. ■