

CAMBIO CLIMÁTICO: PROLEGÓMENOS, CONSECUENCIAS PREVISIBLES Y POSIBLES MITIGACIONES

LUIS GUTIÉRREZ JODRA *

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22. 28004 Madrid. correo@foronuclear.org

La preocupación por el cambio climático y sus efectos está presente en la mente de todos los humanos. Los medios de comunicación se ocupan continuamente de todos los aspectos de la situación actual y futura desde todos los puntos de vista. Se suceden las entrevistas con expertos de todas las especialidades relacionadas con el clima. E incluso, el cine se ocupa de ello con las más extremas hipótesis. El caso más reciente es el de la película "The day after tomorrow".

Se intenta con esta presentación dar un punto de vista objetivo y científico del problema.

La primera sugerencia sobre el efecto invernadero, posible origen del cambio climático, procede del famoso matemático Barón Jean Baptiste Fourier que en 1824 publicó en los Annales de Chimie et de Physique un trabajo con el título "Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires" en la que define el problema de la forma siguiente: "la temperatura (de la Tierra) puede aumentar por la interposición de la atmósfera, porque el calor en forma de luz encuentra menos resistencia al penetrar en el aire que al ser devuelto convertido en calor no luminoso".

El siguiente intento de explicar cuantitativamente este hecho se hizo por el químico sueco Svante Arrhenius que lo publicó en el Philosophical Magazine el año 1866, con el título "Sobre la influencia del Ácido Carbónico del aire en la temperatura del suelo". Arrhenius conocía ya que la composición del aire y la presencia de gases como el dióxido de carbono y el

agua producen el efecto previsto por Fourier que provocaban un aumento de la temperatura. Arrhenius estimó, por medio de sencillos razonamientos, que un aumento de CO₂ de 2,5 veces de su concentración de entonces, originaría una elevación de 8 a 9° C

La primera confirmación experimental del incremento de CO₂ en la atmósfera se debe a Charles Keeling de la Universidad de California, que desde 1958 comenzó sistemáticamente a medir el CO₂ en el Observatorio de Mauna Loa en Hawai y dio a conocer la curva descrita en la *figura 1*, en que puede observarse la variación estacional debida al desarrollo de los vegetales.

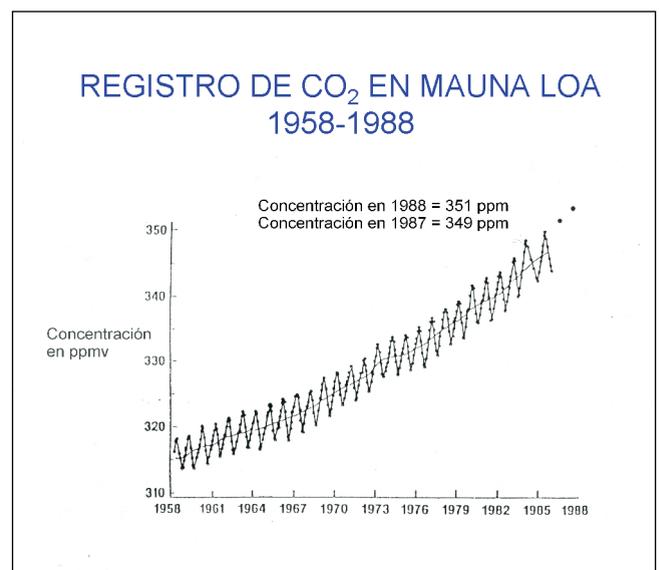


Figura 1.

COMPARATIVA DE LAS TEMPERATURAS EN VENUS, LA TIERRA Y MARTE

	Temperatura superficial sin efecto invernadero	Temperatura superficial observada	Calentamiento debido al efecto invernadero
Venus	- 46° C	477° C	523° C
Tierra	- 18° C	15° C	33° C
Marte	- 57° C	- 47° C	10° C

Figura 2.

Hay suficiente evidencia de que gracias al efecto invernadero, y evidentemente de la presencia masiva del agua, la Tierra tiene la temperatura apropiada para el desarrollo de la vida basada en el carbono. Baste para ello la comparación entre temperaturas superficiales observadas entre la Tierra y los planetas más próximos a la Tierra, que son Venus y Marte y las temperaturas sin y con efecto invernadero (véase la figura 2). Solamente Marte ofrece perspectivas semejantes a las de la Tierra. Únicamente la ausencia o la pérdida del agua podrían explicar la falta de vida animada en Marte.

En la actualidad se han identificado los componentes (en la figura 3) de la atmósfera que son productores del efecto invernadero. Están listados, excepto el agua que, a pesar de ser una molécula semejante al

GASES DE EFECTO INVERNADERO

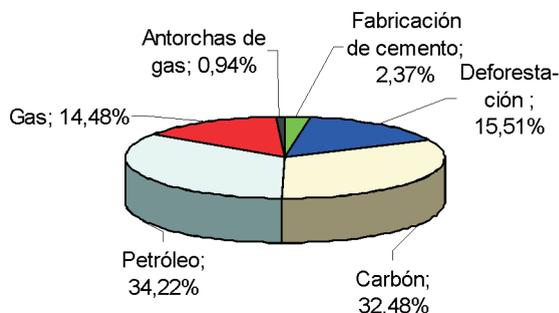
Gases productores de efecto invernadero	Vida en años	Potencial de calentamiento (100 años) ¹	Contribución total (%)
Dióxido de carbono (CO ₂)	50 a 200	1	64
Metano (CH ₄)	12+/-3	21	19
Óxido nitroso (N ₂ O)	120	310	5,7
Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	3.200	23.900	0,08
CFCs	50 a 1.700	4.000 a 11.700	10
Hidrofluorocarburos (HFCs)	1,5 a 264	140 a 11.700	n/a
Perfluorocarburos (PFCs)			
HCFs	2.600 a 50.000	6.500 a 9.200	n/a
	1,4 a 19,5	110 a 2.000	n/a

Fuente: Panel Intergubernamental del Cambio Climático, 1996

¹ Gases diferentes tienen efectos diferentes sobre el balance energético de la atmósfera. El potencial de calentamiento es un índice que describe el efecto de otros gases con el efecto del CO₂ tomado como unidad.

Figura 3.

Fuentes del dióxido de carbono



Fuentes del metano

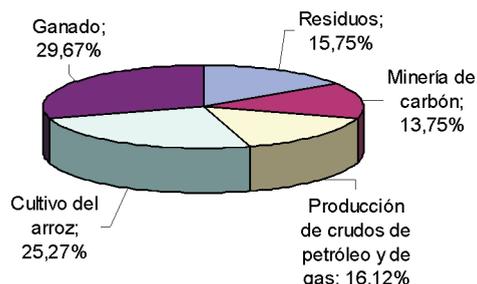


Figura 4.

CO₂, está en la atmósfera en diversas formas físicas y además en cantidades variables según el lugar de la Tierra, la estación del año y el tiempo atmosférico. Estos componentes, además de su concentración o abundancia, influyen en cuanto al efecto global, de su vida o tiempo de residencia en la atmósfera y de sus potenciales por moléculas. Las contribuciones totales están dadas en la columna final de la figura 3.

En el caso del SO₂, su oxidación por la acción combinada del oxígeno y del ozono, aparte de otras consideraciones, hace que no se le considere como gas de invernadero.

En la misma figura 3 se destaca el elevado tiempo de residencia de los compuestos con átomos de fluor, así como su alto potencial específico. Ambos aspectos les hacen muy importantes a pesar de su baja concentración. Todos ellos proceden de actividades humanas, al igual que el óxido nitroso.

Tanto el CO₂ como el metano se encuentran en la Naturaleza, pero también tienen origen antropogénico. La fabricación y empleo de los compuestos de fluor han sido interrumpidos por acuerdo internacional.

Sólo quedan como compuestos a considerar el CO₂ y el metano, cuyas fuentes están dadas en la *figura 4*. El dióxido de carbono ha estado siempre presente en la Naturaleza como resultado de la vida animal y vegetal, pero desde la Revolución Industrial, la combustión del carbón y petróleo para generar calor y electricidad y su empleo en transportes, locomoción, actividades industriales diversas (refinerías, producción de cemento, industria química, etc.) han aumentado la concentración de CO₂ en la atmósfera desde las 260-280 partes por millón (ppm) a finales del siglo XIX hasta las actuales 375 ppm.

Para el metano las fuentes naturales más importantes se derivan de la transformación anaerobia de los vegetales y sus residuos, de los rumiantes y recientemente se ha hallado que también de los bosques tropicales. En su mayor parte, no obstante, se forma en los arrozales, en las minas de carbón y en las explotaciones de petróleo y de gas natural.

El aumento de concentración de los gases de efecto invernadero es el principal causante del rápido incremento de temperatura de los últimos años, (*véase la figura 5*). Esto significa la aparición de un calentamiento global que se presenta en la superficie de tierras y mares y confirma de numerosos fenómenos que pueden observarse en todo el mundo. La evidencia

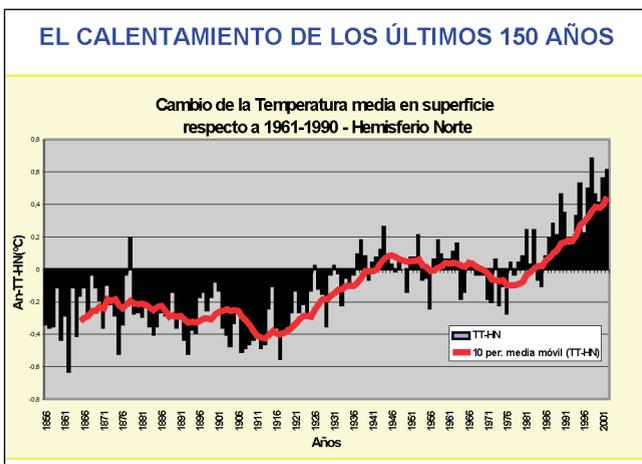


Figura 5.

INDICIOS SOBRE EL CALENTAMIENTO GLOBAL

- Retraimiento de glaciares.
- Disminución de los casquetes polares.
- Mayor verdor de la tundra siberiana.
- Progresión hacia el Norte de la línea de heladas en Canadá y Estados Unidos.
- Desprendimiento de bloques de hielo de la Antártida.
- Acentuación de El Niño. Inundaciones en Asia y Sudamérica.
- Aumento en temperaturas nocturnas superior a las diurnas.
- Elevación de nivel medio de mares (10-25 cm) en los últimos 100 años.
- Aumento de temperatura media global en superficie de la Tierra entre 1840 y 1998 en casi de 0,6° C.
- En la superficie de los mares la temperatura también ha aumentado en los últimos 50 años.
- Variaciones continentales en precipitaciones y tormentas.

Figura 6.

del cambio climático tiene múltiples facetas que dependen de los aspectos que se consideren (*véase figura 6*). De ellos destacan los que, por sus repercusiones sobre el clima en cuanto a iniciadores de fenómenos como la fusión de los casquetes polares y la elevación del nivel de los mares y océanos y, sobre todo, que crean variaciones de la circulación de las corrientes termohalinas que transportan el calor de las zonas cálidas de la Tierra a las frías, lo que se tratará más adelante.

Todos estos fenómenos son alarmantes porque pueden ocurrir en todo el planeta y porque pueden ser iniciadores de un posible cambio climático. Como es bien conocido, el clima constituye un sistema muy complejo y que depende de múltiples variables. Cualquiera de ellas, pero con diferente influencia puede desencadenar variaciones, aunque en su mayoría reversibles, que pueden, por su magnitud, llegar a ser irreversibles. Este es el riesgo que presenta el calentamiento global.

Por otra parte, dados los tiempos de residencia en la atmósfera de los distintos gases de efecto invernadero, la inercia del sistema hará que el sistema continúe siendo sometido a las variaciones tanto naturales como humanas hasta su estabilización. En el caso del CO₂ lo que ocurrirá aunque se reduzcan sus emisiones está dado en la *figura 7* en que se representa las variaciones de los mares, la concentración del CO₂ en la atmósfera producidos por las emisiones de CO₂. Si se quiere reducir las emisiones para que las concentraciones de

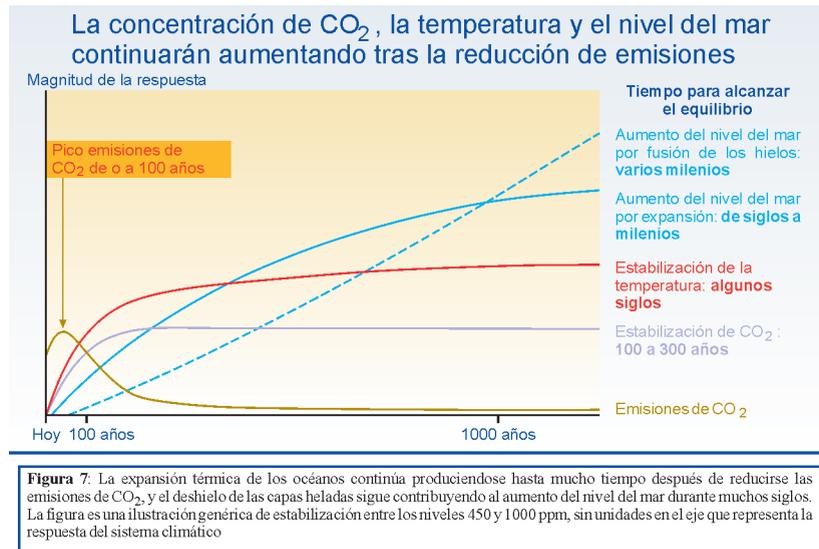


Figura 7.

CO₂ entre 450 y 1000, esto sólo se conseguirá entre 100 y 200 años. Los fenómenos derivados requerirán mucho más tiempo. La temperatura, algunos siglos. La dilatación de los mares, entre siglos y milenios y el nivel de los mares por fusión de los hielos, algunos milenios.

El aumento de temperatura está todavía dentro de las variaciones históricas del clima según los datos obtenidos de las investigaciones paleontológicas de hasta los 600.000 años pasados, pero no hay explicación plausible de las pasadas glaciaciones y de la salida de ellas sin tener en cuenta variables que no dependen de la voluntad humana, ya que el hombre como especie no había hecho su presencia en el planeta.

En la figura 8 se da cuenta de las causas externas e internas del clima de la Tierra. Entre las causas externas figuran los movimientos del Sol, de los que dependen de las posiciones, situaciones y movimientos relativos del Sol y de la Tierra y de lo que llega a la Tierra desde el espacio exterior. Entre las causas internas se incluyen los cambios de concentración de los gases de efecto invernadero, tanto por causas naturales como de las procedentes de fuentes de actividades humanas. Entran también los cambios en la superficie terrestre que producen efectos físicos en el albedo y otros como el vulcanismo, cuyas emisiones pueden bloquear la llegada de la radiación solar y

alterar la composición de la atmósfera y también los aerosoles que se generan por fenómenos diversos.

El Sol tiene, por tanto, una gran influencia en el clima, tanto por las variaciones de su núcleo y de su corona donde radican las reacciones nucleares de fusión que dan lugar a las emisiones de radiación que son la fuente de la vida en la Tierra, como de su posición relativa, que condiciona el flujo de radiación que llega a nuestro planeta. Los cambios de la órbita de

LAS CAUSAS DE LOS CAMBIOS DEL CLIMA

- **Causas externas:**
 - Variaciones en los parámetros orbitales (ciclos de Milankovitch)
 - Variaciones en la irradiancia solar (ciclos solares)
 - Meteoritos (presencia de aerosoles)
- **Causas internas:**
 - Vulcanismo
 - Aerosoles de origen diverso:
 - Naturales no volcánicos
 - Producidos por la actividad humana
 - Cambios en la concentración de gases de efecto invernadero:
 - Origen natural
 - Producidos por la actividad humana
 - Cambios en la superficie terrestre:
 - Desertización/desertificación
 - Deforestación
 - Cambios de albedo
 - Origen natural
 - Cambios en usos del suelo

Figura 8.

CAMBIOS EN LA ÓRBITA (MILANKOVITCH)

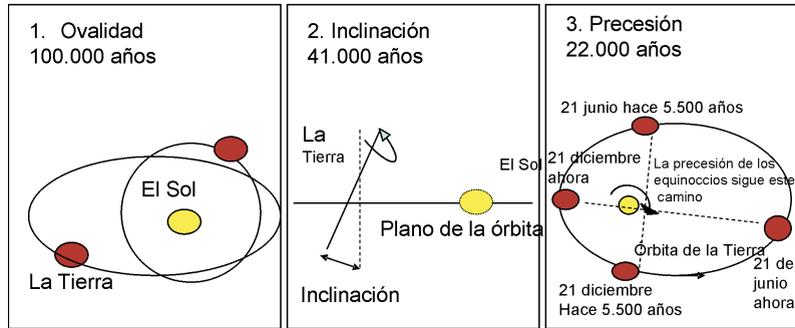


Figura 9.

nuestro planeta fueron definidos por el yugoslavo Milankovich, según se describe en la *figura 9*. El primer movimiento relativo, la ovalidad de la órbita alrededor del Sol es una medida de la distancia que nos separa en cada momento y se hace máxima cada 100.000 años. El segundo es la inclinación respecto al plano de la órbita, que conjuntamente con la ovalidad define las estaciones del año. La vuelta completa respecto a un eje imaginario situado en el plano de la órbita dura 41.000 años. El tercero, llamando de precesión de los equinoccios, se debe a un ligero retraso de éstos a lo largo de la eclíptica de 50 segundos por año, de tal manera que los dos equinoccios intercambian sus posiciones cada 11.000 años, repitiendo, en consecuencia su posición inicial cada 22.000 años.

Las causas internas son más preocupantes en cuanto a que condicionan que el balance de energía que recibe la Tierra sea o no superior al que pierde. Para ello es preciso cuantificar la aportación de cada uno de los factores involucrados al efecto invernadero. Esto se ha hecho mediante la definición de lo que se llama el forzamiento climático para cada uno de ellos como la energía aportada o quitada por unidad de tiempo y área en vatios por metro cuadrado. Se tienen en cuenta para el balance global los gases de efecto invernadero y los aerosoles troposféricos y algunos otros como se detalla en la *figura 10*, que presenta los valores positivos y negativos de los forzamientos en el período 1850-2000. La suma algebraica de los forzamientos es positiva cuando la Tierra recibe energía

FORZAMIENTOS CLIMÁTICOS (W/m²): 1850-2000

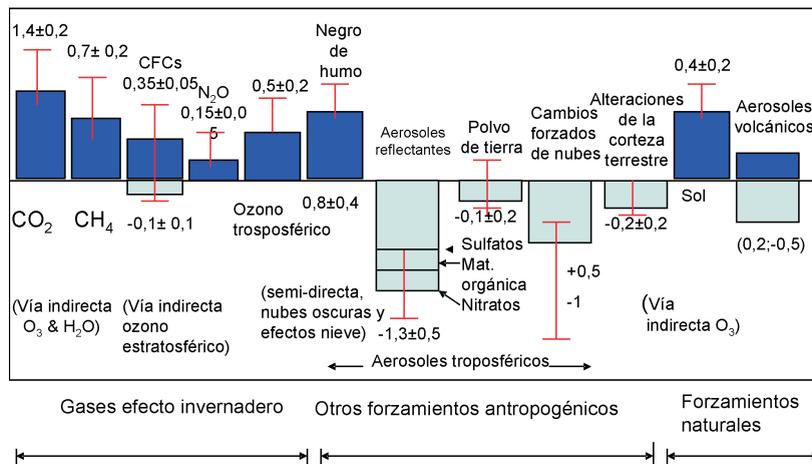


Figura 10.

neta del exterior como ocurre, por ejemplo, en el período 2000-20050 en que el calor del forzamiento es de $0,85 \text{ w/m}^2$ (figura 11).

Las dataciones con isótopos estables (oxígeno 16 y 18, carbono 12 y 13, y series del uranio y del torio) realizadas en burbujas de aire ocluidas en el hielo de la Antártica, así como en nuestras de corales y de diversos tipos de fósiles, especialmente de foraminíferos, han permitido seguir las temperaturas y la composición de la atmósfera en épocas pasadas hasta 600.000 años atrás. Así, se han constatado hasta cuatro glaciaciones en los últimos 400.000 años, de los cuales la última tuvo lugar hace 16.000 años. Esto se ha podido demostrar con el análisis de diversas muestras de fósiles tanto terrestres como marinos, lo que ha dado lugar a comprobar que dichas glaciaciones coincidieron con cambios habidos en el mar, en especial de las corrientes marinas.

En la actualidad se conocen las corrientes marinas de todo el mundo tanto superficiales como profundas que constituyen el principal agente transportador de energía de las zonas calientes a la frías. En la cinta transportadora, como se conoce al sistema de corrientes marinas, el origen del movimiento está en la circulación termosalina que se establece por las diferencias de densidad, debidas al distinto contenido de cloruro sódico, y a las aguas calientes y frías. El origen de esta corriente está en el Atlántico Norte y más concretamente en la interacción entre la corriente cálida proce-

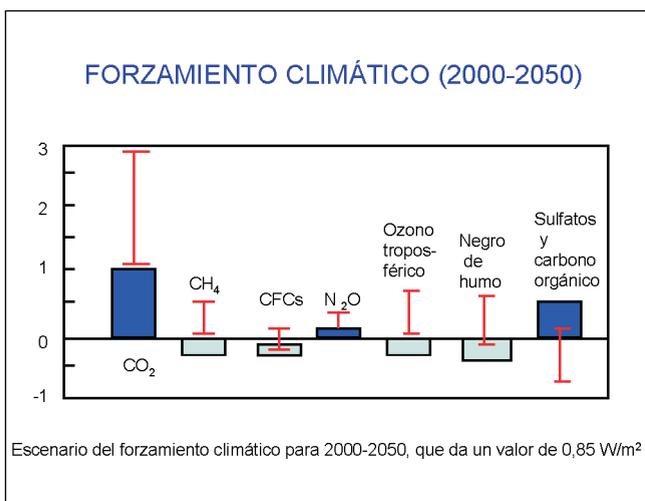


Figura 11.

CINTA TRANSPORTADORA

- Transporta grandes cantidades de calor desde los trópicos hasta los polos (ej. Corriente del Golfo)
- Se mueve por la formación de hielo en el Atlántico Norte, lo que deja agua salina, más densa, que desciende al fondo del océano.
- Puede pararse si:
 - el océano se calienta y no se forma el hielo.
 - Se diluye el agua salina por mezcla con agua dulce procedente de la fusión del hielo de Groenlandia.
- Opiniones sobre la parada: No en el siglo XXI,
 - si aumenta la temperatura de 2 a 2,5° C.
 - Probabilidad de 1 en 3 si aumenta en 3° C.
- Evidencia:
 - El Atlántico Norte es menos salino, quizá debido al glaciar Zacarias de Groenlandia, desde 1965 mayor flujo de agua.
 - Puede parar, por ello en unos 200 años.
 - Paró hace 12.000 años.
- Impacto:
 - Europa se enfriará rápidamente
 - Alaska y Siberia se calentarán
 - Pudieran no aparecer los monzones
 - Dudas sobre la reversibilidad

Figura 12.

dente del Golfo de Méjico y el agua fría de los glaciares de Groenlandia y de las aguas del casquete polar. La circulación puede interrumpirse si se dan algunas de las condiciones que se exponen en la figura 12, donde se dan además de los efectos posibles sobre ella en el caso del calentamiento global y los fenómenos o indicios que tienen lugar actualmente. A alteraciones de esta circulación, de carácter más o menos periódico, se achacan algunos fenómenos que tienen grandes impactos sobre las zonas regionales donde ocurren, como son los monzones en el sur de Asia y los fenómenos llamados el Niño y la Niña, en América del Sur.

La gran cantidad de calor que transportan estas corrientes tiene evidentemente un gran impacto sobre el tipo de microclimas existentes hoy y, por tanto de sus cambios. A esta circulación se deben las diferencias entre las zonas de climas moderados como los de las islas Británicas y la Península Ibérica en Europa, en comparación con el frío invernal de las costas orientales de América del Norte, excluidas las zonas del Golfo de Méjico.

Un esquema simplificado de la circulación termosalina se presenta en la figura 13.

Los mares y océanos también intervienen en el clima mediante la absorción del CO₂ de la atmósfera, que, de acuerdo con las reacciones de disociación con agua produciendo HCO₃⁻ y H⁺, acidifican el agua a medida que se forman carbonatos insolubles, principalmente cálcico. Mediante este proceso se fijan la mayor parte de las emisiones antropogénicas del CO₂.

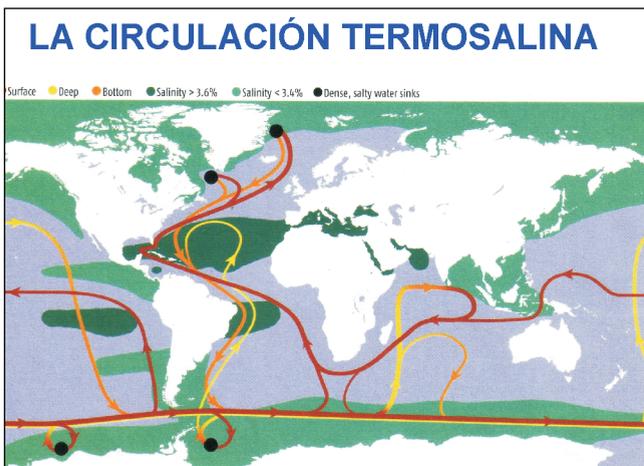


Figura 13.

Por otra parte, la acidificación puede alcanzar valores de acidez muy alta si continúan aumentando las emisiones de CO₂.

Así se demuestra en la *figura 14* en el supuesto de que las emisiones de CO₂ lleguen a un máximo de 30 gigatonnes al año hacia 2030. El contenido de CO₂ de la atmósfera llegaría a ser hasta cerca de 1000 pm., con una disminución moderada pero continua, como resultado de la reducción de las emisiones. Conforme a ello la disminución de pH en superficie pasa sucesivamente por valores de 0,1 hacia 2030, pasando a 0,4 en 2100 y a 0,8 en 2200, cuando hasta unos 4000 metros de profundidad tendrá una disminución de 0,4. Todo ello puede representar, sin tiempo para adaptarse, poner en peligro la vida de muchas especies marinas.

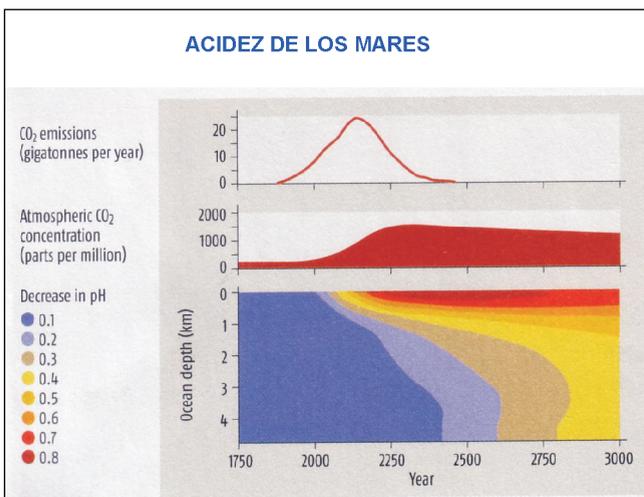


Figura 14.

LOS MARES, EL CO₂ Y EL METANO

- Mas de 1/3 del CO₂ antropogénico se ha disuelto en los mares.
- Si no se cortan las emisiones de CO₂ el pH de de los mares disminuirá en 2.100, en 0,4 unidades y en 2.250 en 0,77.
- La acidificación dañará a todos los ecosistemas marinos, hará más difícil la absorción de CO₂ y afectará negativamente a la formación del carbonato cálcico.
- No ha tenido lugar en los últimos 30 millones de años.
- Puede ser reversible.
- En los sedimentos de los mares y grandes lagos hay almacenado metano en forma de clatrato. Junto con el del permafrost se estima que hay 5 billones (10¹²) de toneladas de metano formadas a lo largo de millones de años.
- El calentamiento de la atmósfera y de los mares podría producir catástrofes del clima, dependiendo de la cantidad y del tiempo.
- Puede impedir una glaciación próxima. ¿Hizo posible salir de otra?

Figura 15.

Hay otros riesgos potenciales, del que hay ejemplos en menor escala sucedidos en el pasado, de descomposición de los clatratos, asociación de metano y agua que se forman a temperaturas bajas y grandes presiones, y están almacenados en los sedimentos de los mares y grandes lagos.

Si esta descomposición se produce de forma súbita irrumpirán e la atmósfera varios miles de millones de toneladas de metano y debe tenerse en cuenta que, molécula a molécula, el metano es 21 veces más efectivo que el CO₂ en producir el efecto invernadero. Otras características de estos procesos se presentan en la *figura 15*.

Los cambios globales observados en el siglo XX son extraordinariamente diversos abarcando muchos de los fenómenos normales de la Naturaleza. Se han recopilado aquellos con un mayor resalte en la *figura 16*, donde se presentan también las probabilidades que tienen actualmente y las que pueden tener a finales del siglo XXI.

Ya se ha destacado la importancia que tiene la fusión de los hielos de Groenlandia en la circulación termosalina y, en general, el clima global. Se dan detalles de ello en la *figura 17*.

Otras consecuencias globales previsibles se refieren a la elevación de temperaturas y al aumento de las precipitaciones. El calentamiento será más notable en los continentes que en los océanos y sus cotas más altas corresponderán a las mayores latitudes. El

CAMBIOS GLOBALES

Fenómenos	Hechos observados (Siglo XX)	Predicción según modelos (final del Siglo XXI)
Temperaturas máximas más altas	Muy Probable	Muy Probable
Veranos más cálidos	Probable	Muy probable
Temperaturas mínimas más altas	Virtualmente cierto	Virtualmente cierto
Menos días de heladas	Virtualmente cierto	Probable
Aumento de la intensidad de las precipitaciones	Probable	Muy probable
Más olas de calor	Posible	Muy probable
Menos olas de frío	Muy probable	Muy probable
Más sequías	Poco probable	Muy probable
Más precipitaciones en invierno	Probable	Probable
Más tormentas tropicales y más intensas	Muy poco probable	Posible
Más tormentas en latitudes medias	Posible	Posible
Sucesos "El Niño" más intensos	Posible	Posible
Sucesos "El Niño" más frecuentes	Probable	Probable

Probabilidad:
 -Virtualmente cierto > 99% -Posible 33-66%
 -Muy probable 90-99% -Poco probable 10-33%
 -Probable 67-90% -Muy poco probable 1-10%

Figura 16.

promedio en este siglo XXI será algo superior a 3° C (véase la figura 18), las precipitaciones aumentarán en el mundo, si bien en muchas zonas subtropicales disminuirán (véase la figura 19).

La importancia de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente del CO₂, ha movido a las naciones industrializadas a llegar a un acuerdo, el protocolo de Kioto, para reducir las emisiones de CO₂ en un 5% respecto a las emisiones de 1990. Las contribuciones de los diversos países a esta tarea se han asignado por acuerdo entre los países firmantes. Dentro de la Unión Europea, a España les ha correspondido un aumento de sus emisiones del 15%, que se han superado con creces ya que en 2001 era de 40% con tendencia a aumentar.

El protocolo tiene graves defectos inherentes. El primero, es que no afecta a todas las actividades humanas y sólo a ciertas industrias, como son la generación de electricidad y la fabricación de cemento. Otras, como el transporte de mercancías por carretera y de personas por avión se toman en consideración muy levemente.

FUSION DEL HIELO EN GROENLANDIA

La fusión de la capa de 2 km de hielo elevaría 7 m los niveles de océanos y mares.

Cuando la fusión sea igual a la caída de nieve, se acelerará la fusión porque el aire se enfriará cada vez menos. Ello ocurrirá probablemente cuando el aumento de temperatura sea de 2,7°C.

La fusión completa ocurrirá en un periodo entre 2.000 y 3.000 años, si continúa aumentando el caudal de agua de Zacarías, lo que se confirmará a finales de este siglo.

Los mares inundarán los principales centros de población del mundo.

Figura 17.

Lo mismo ocurre con las actividades domésticas. El segundo defecto es que no afecta a todos los países. No incluye a los países en desarrollo y de los industrializados, faltan los Estados Unidos y Rusia ha firmado a última hora y con reticencias. Los grandes países emergentes, China, India y Brasil, que, dentro de un decenio emitirán más que Estados Unidos, no han sido incluidos en el protocolo.

El protocolo, que sólo alcanza hasta 2012, ofrece soluciones para los países que no consigan su cuota de reducción de misiones. Se puede establecer una bolsa de intercambios entre los países. La intervención de los países en desarrollo de esta bolsa solamente debe ser en proyectos de energías renovables. De manera explícita no se cuenta para ello la energía nuclear a pesar de que ésta no emita gases de efecto invernadero.

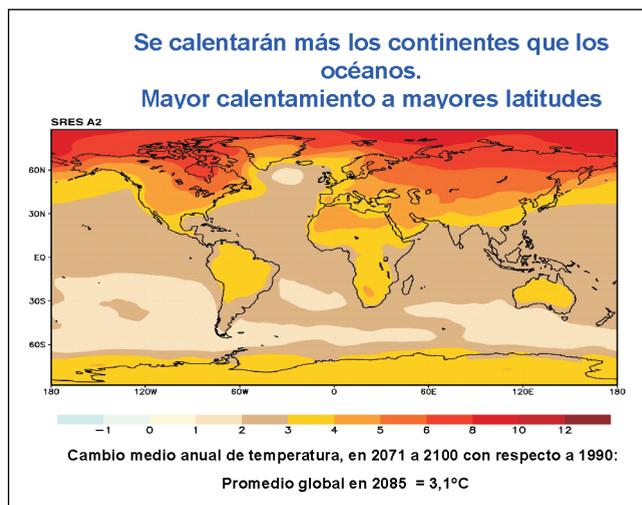


Figura 18.

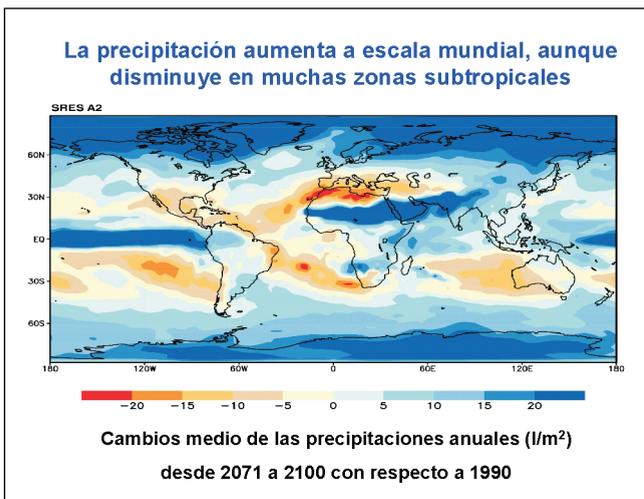


Figura 19.

El acuerdo, aunque sea limitado en el tiempo, va en contra de las tendencias hacia el futuro, que cambia el orden en las demandas de energía, que van, en primer lugar, hacia el incremento del transporte, sobre todo del avión incentivado por el desarrollo del turismo. Van después, en este orden, las actividades domésticas, centradas en la electricidad y las siguen las industriales. Un resumen, muy simplista, del protocolo se da en la *figura 20*.

Entre los principales promotores del protocolo ha destacado la Unión Europea, pero algunos países han tenido dudas sobre la conveniencia para ellos de las obligaciones que conlleva. Si se examinan las consecuencias de los esfuerzos a nivel global, como ha

ACUERDO DE KIOTO SOBRE LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

- Compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Afecta principalmente a los países desarrollados.
- No afecta a todos los países. Estados Unidos no lo ha firmado.
- No afecta a todas las actividades. Preferentemente a la industria y a la energía. Menos al transporte y a las actividades domésticas.
- Objetivo: rebajar en un 5% las emisiones de CO₂ en 1990.
- Mecanismo: bolsa de emisiones de CO₂ entre países. Sólo aportaciones de países en desarrollo en energías renovables. No en energía nuclear.
- La burbuja de la Unión Europea. España puede aumentar sus emisiones en un 15%.

Figura 20.

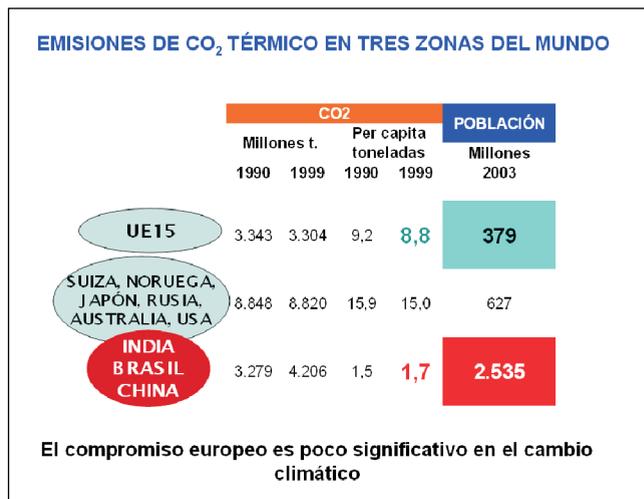


Figura 21.

hecho el Profesor y Académico Romero Salvador se pueden deducir algunas conclusiones interesantes. La Unión Europea representa con su población de 378 millones de habitantes y sus emisiones de CO₂ en reducción y los países industrializados (Suiza, Noruega, Japón, Rusia, Australia y Estados Unidos) con 627 millones y también en reducción, no pueden competir con los países emergentes (China, India, Brasil) con 2.535 millones con emisiones per capita en continuo ascenso. La conclusión es que “el compromiso europeo es poco significativo en el cambio climático” (*véase la figura 21*).

La opinión científica se base principalmente en el seguimiento de los conocimientos que van apareciendo como consecuencia de los estudios e investigaciones que se realizan en todo el mundo. Este seguimiento ha sido encargado por las Naciones Unidas al Panel Intergubernamental del Cambio Climático (PICC), compuesto de cerca del millar de científicos que emite estudios de la situación y en función de modelos y programas de cálculo cada vez más precisos emiten sus conclusiones y pronósticos más probables para el futuro.

A medida que el tiempo pasa, los pronósticos tienen una base más firme y sus afirmaciones más terminantes. Hasta ahora se han publicado tres estudios en los años 1990, 1995 y 2001 y el próximo lo será en 2007. El primero era un informe de la situación en general y de los problemas que involucra el cambio climático. En él no se menciona la influencia humana.

INFORMES DEL PANEL INTERGUBERNAMENTAL DEL CAMBIO CLIMATICO (IPCC)	
▪ Primero, 1990	Estudio genérico. Ninguna mención de influencia humana
▪ Segundo, 1995	Pronóstico de 3°C de aumento de la temperatura media en 2100, pero con dudas sobre su variabilidad "El balance de la evidencia sugiere una influencia humana discernible sobre el clima"
▪ Tercero, 2001	Subida de 1,4°C a 5,8°C en 2100 de la temperatura media de la superficie de la Tierra. Ver: Climate Change 2001: The Scientific Basis, Cambridge University Press, 2001

Figura 22.

En el segundo se predice que habrá en 2100 un aumento de 3° C de la temperatura media global dentro de un margen amplio de incertidumbre, y concluye con una sugerencia de la influencia humana sobre el clima.

En el tercero se afirma ya que la subida de temperatura media en superficie de la Tierra variará entre 1,4°C y 5,8°C. Más detalles se dan en el informe citado en la *figura 22*.

Hasta ahora, solamente hemos visto la problemática del cambio climático, referido principalmente al dióxido de carbono. Vamos a estudiar los métodos de reducir las emisiones: que, salvo su eliminación completa, es uno de los mejores procedimientos para combatir el riesgo que ofrecen las emisiones para el futuro. Se han definido los diversos métodos en la *figura 23*, donde se han agrupado en los siguientes apartados: Eficiencia y conservación, Decarbonización, Empleo del hidrógeno, Secuestro y Otros.

En el primero, Eficiencia y conservación, se incluyen las mejoras en el uso del combustible y las recomendaciones sobre la utilización de los vehículos privados desde todos los puntos de vista. Las viviendas ofrecen grandes posibilidades de ahorro energético en su construcción y en los servicios métricos, calefacción y aire acondicionado. En otra parte habrán de

MÉTODOS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE CO ₂	
• Eficiencia y conservación	<ul style="list-style-type: none"> - Transporte. <ul style="list-style-type: none"> • Mejora en el rendimiento del combustible • Menor uso de vehículos privados - Viviendas. <ul style="list-style-type: none"> • Edificios más eficientes en calefacción y aire acondicionado. - Mejora de rendimiento de las centrales generadoras de electricidad. - Cambios en la generación de electricidad.
• Decarbonización	<ul style="list-style-type: none"> • Gas natural en vez de carbón • Separación y almacenamiento de CO₂ en centrales • Separación y almacenamiento de CO₂ en fábricas de hidrógeno • Separación y almacenamiento de CO₂ en fábricas de singas • Energía nuclear • Energía eólica • Energía fotovoltaica } y otras renovables
• Empleo del hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrógeno de energías renovables - Hidrógeno de energía nuclear
• Secuestro	<ul style="list-style-type: none"> - Yacimientos de petróleo y carbón; cavernas, simas y minas subterráneas - Mares y Océanos
• Otros	<ul style="list-style-type: none"> - Plantas y bosques - Suelos

Figura 23.

discutirse las diversas formas de generar electricidad y su inclusión en un plan general del abastecimiento del país que puede ser una fuente de ahorro general, así como cumplir otros objetivos como son la seguridad de los suministros y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para conseguir buenos resultados en la decarbonización es recomendable la sustitución del carbón para la generación de electricidad realizando un método semejante a su sustitución por el petróleo en locomoción y en la obtención de materias primas para la industria química. Al mismo tiempo se conseguirá eliminar las emisiones de CO₂ empleando las energías renovables y nuclear y en ciertos casos reducir las emisiones por medio del gas natural que emite menos que el carbón. Un método que ya se utiliza es la separación y el almacenamiento de CO₂ en las centrales térmicas, de gas o carbón, o en las instalaciones de producción de gas de síntesis y en las fábricas de hidrógeno partiendo de naftas.

Es evidente, en consecuencia, que en un futuro en que pudiera estar extendido el empleo del hidrógeno,

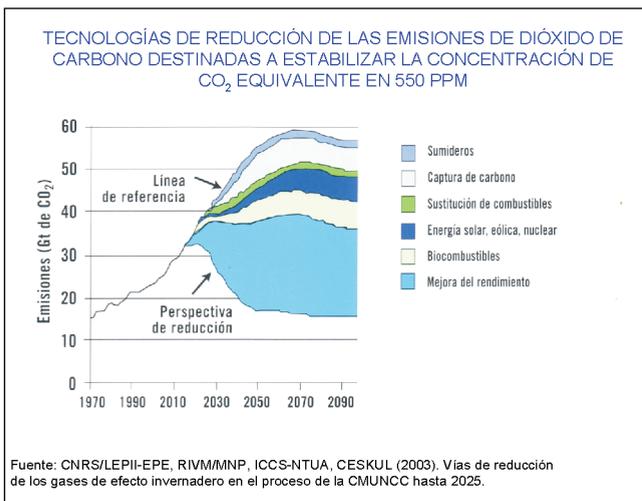


Figura 24.

éste debiera ser obtenido por medio de las energías renovables, de manera directa por la energía fotovoltaica o indirectamente pasando por la generación de electricidad por las energías eólica, biomasa o el resto, y por la energía nuclear, directamente en reactores de alta temperatura (con refrigeración por helio, o por metales líquidos).

El secuestro, previa separación, requiere un almacenamiento seguro y estanco, lo que se puede hacer en depósitos o en lugares geológicamente estables y que, a poder ser, hayan sido ocupados anteriormente para almacenar gases. Estas condiciones se cumplen en antiguas bolsas ya explotadas de gas natural, petróleo y carbón. Otras también consideradas útiles son simas o cavernas y minas de cualquier tipo. Asimismo, por su carácter de sumideros universales, los mares y océanos constituyen una posible solución, aunque limitada su utilización por las leyes sobre vertidos al mar.

Finalmente, los suelos y las plantas y bosques absorben grandes cantidades de CO₂, por lo que es aconsejable planes de extensión de los cultivos o de plantar árboles en terrenos que lo hagan posible y aconsejable.

La figura 24 muestra la participación de las diversas tecnologías de reducción de las emisiones de CO₂ en 550 ppm. de CO₂ equivalente incluyendo los gases de efecto invernadero, desde 1970 a 2090. Este caso, de origen francés, presenta las dificultades de conseguir la reducción de tan grandes cantidades de

CO₂ y la confianza en el ahorro provocado por la mejora de los rendimientos de todas las actividades que producen CO₂.

A continuación se tratará del secuestro del CO₂. Se han dispuesto en grupos con independencia de que se trate de métodos empleados aunque sólo sean en pruebas o en pequeña escala o métodos que rozan lo utópico. Están dados en la figura 25.

Los métodos directos de los vertidos y almacenados en tierra se han utilizado ya en varias instalaciones industriales. Entre ellas figuran yacimientos de crudos petrolíferos para aumentar la explotación en tiempos próximos al agotamiento, con objeto de aumentar la presión de los crudos para favorecer su extracción. Otros métodos se basan en la utilización de minas antiguas, acuíferos o en cavernas y minas de sal.

En los hipotéticos vertidos al mar existen dos cuestiones a resolver: la forma de hacer los vertidos de CO₂, gas o líquido, y el lugar más apropiado. Normalmente, debería llevarse en forma líquida para que en la profundidad permanezca el mayor tiempo posible. Para el sitio a elegir se han mencionado sitios

SECUESTRO DE DIÓXIDO DE CARBONO

- Métodos directos:
 - Vertido en tierra
 - Simas, minas antiguas, acuíferos
 - Vertido en el mar
 - Conducción por tubería (mezcla)
 - Gibraltar, sur de Noruega, mar de Weddell (Antártida)
 - Situación en fondos profundos (clatratos)
 - Simas, fondos marinos
- Métodos indirectos:
 - Sembrar con hierro el mar (plancton)
 - Plantar árboles y aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo
- Métodos auxiliares:
 - Emplear oxígeno en vez de aire
 - Absorber CO₂ del aire
- Soluciones ideales:
 - Emisión cero de CO₂
 - Empleo práctico de CO₂

Figura 25.

PROYECTOS DE SECUESTRO DE CO₂

Proyecto	Ubicación	CO ₂ a inyectar, (t)	Origen	Estado
Steipner	Mar del Norte	20 millones	Campo de gas natural	En operación
Weyburn	Canadá	20 millones	Yacimiento de petróleo	Completada la fase I
In Salah	Argelia	18 millones	Campo de gas natural	Funciona en 2004
Gorgon	Australia	125 millones	Acuífero salino	En preparación
Frio	Estados Unidos	3.000	Acuífero salino	Fase piloto
Recopol	Polonia	3.000	Vetas de carbón	En operación

Figura 26.

como el Estrecho de Gibraltar, el sur de Noruega y el Mar Weddell, en la Atlántida. Conviene depositar el CO₂ líquido en simas o en fondos marinos de gran profundidad para que se den las necesarias condiciones de presión y temperatura.

Los métodos indirectos comprenden el vertido de hierro al mar a fin de aumentar la vida vegetal y animal, como se ha demostrado por lo que tiene lugar en las plataformas petrolíferas hundidas en el mar. Este método aumenta la fijación del dióxido de carbono por aumento del plancton.

Un método más sencillo pero más lento consiste en plantar árboles con el fin de que aumente el contenido de materia orgánica en el suelo.

Otros procedimientos, más difíciles y menos económicos son el empleo de oxígeno en vez de aire en todas las reacciones de oxidación, como son las combustiones en centrales térmicas. Naturalmente, el aumento de temperatura que ello significa también debe ser compatible con los materiales de construcción de que está hecha la instalación y debe ofrecer ventajas sobre el ahorro que supone el menor volumen de gases generados. La observación del CO₂ contenido en el aire requiere un esfuerzo tal que no sea posible su empleo con la tecnología ahora existente.

Y para finalizar, el conseguir la anulación de las emisiones es un hecho ideal de baja probabilidad, en tanto que el empleo práctico del CO₂ en elevadas cantidades es más prometedor.

Como ya se ha citado anteriormente hay un cierto número de realizaciones de secuestro del CO₂. En la figura 26 se incluyen algunos de los más importantes por su magnitud o por el tipo geológico de almacenamiento. El uso de bolsas de crudo de petróleo y de gas natural, de acuíferos salinos y de vetas de carbón, se realiza ya en fase comercial o de pruebas.

Una de las formas más radicales para evitar el calentamiento global sería tratar de reducir la energía que la Tierra reciba del Sol. Hasta ahora todas las medidas que se han adoptado o al menos se han intentado o propuesto se centran en evitar la alteración de la atmósfera con el fin de que la radiación que se absorbe no aumente el flujo neto de calor que mantiene el estado estacionario en que se encuentra la temperatura terrestre.

Seguir un pensamiento opuesto, es decir, reducir el flujo de energía que se recibe del Sol sería también una solución, si bien demasiado simplista, para evitar el cambio climático posible producido por el calentamiento global. Las formas propuestas de conseguirlo están próximas a la ciencia-ficción. Algunas de ellas están dadas en la figura 27. Unas proponen interponer en el camino de la radiación solar una barrera física, como son espejos o globos metálicos. Otros lo hacen mediante sustancias que también ejercen la misma función de bloqueo en la atmósfera, como son partículas o gotas de sulfatos, agua salina y sustancias que juegan el mismo papel. Otro tipo de medidas tienden a actuar sobre los focos de calor que promueven el transporte de calor de zonas cálidas a zonas frías. A este tipo pertenece una propuesta para reducir

MITIGACIÓN DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

- Grandes espejos estacionados entre el Sol y la Tierra.
- Pequeños globos de aluminio flotando en la estratosfera.
- Dispersión de partículas de sulfato.
- Dispersión de agua salina en la atmósfera (blanqueo de las nubes).
- Pequeños objetos (pelotas de golf) en mares tropicales).

Figura 27.

el calor absorbido en los mares tropicales por la colocación en su superficie de pequeños objetos del tamaño de pelotas de golf.

Como ha podido observarse quedan todavía incertidumbres en el cambio climático, unas de su intensidad, otras de distribución de las diferentes zonas del mundo y de cuando ocurrirán sus efectos. Algunas de ellas podrán disiparse en el próximo informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático. Muchas solo se aclararán en años posteriores de este Siglo XXI.

Una pregunta que de hacen todos los habitantes del mundo es del momento en que deban aplicarse las medidas de mitigación y si llegarán a tiempo o demasiado tarde. La pregunta es pertinente porque algunas de las previsiones pesimistas significan una catástrofe para la Tierra. En el caso extremo, una de las hipótesis de la pérdida de agua del planeta Marte y, por tanto, de la ausencia de vida en él, se achaca al efecto invernadero cuando todavía ese planeta tenía atmósfera.

La duda sobre la influencia del calentamiento global en el clima estriba en que, a diferencia de los cambios drásticos del clima que han ocurrido en épocas pasadas, estos han tenido lugar lentamente. En el caso actual, el cambio en la concentración de CO₂ en la atmósfera y el aumento global de la temperatura se han iniciado en el siglo XX. El clima es un sistema con muchas variables, muchas no lineales, y es razonable pensar que el incremento de una de ellas, como la temperatura, que es una de las más importantes, pueda provocar que el estado estacionario del clima se haga inestable. Esta es una de las posibilidades que se han postulado ante la forma de la curva de variación de la temperatura global media con el tiempo. Esta forma ha recibido el nombre de “palo de hockey” para dar una imagen clara de esta variación en el breve espacio de tiempo de un siglo.

La amenaza posible, que afectaría toda la vida de la Tierra, debe hacer pensar a todos los dirigentes de los países en la necesidad de abordar de manera sensata y responsable la solución más correcta y adoptarla sin dilación.