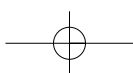
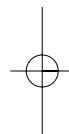
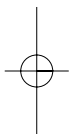


# Calidad y medio ambiente

---



# El calentamiento global y las emisiones de carbono

George Power Porto

Ingeniería Industrial nº 27, 2009, ISSN 1025-9929, pp. 101-122

RESUMEN: A medida que las consecuencias del cambio climático son más alarmantes y los científicos advierten que el “punto de no retorno” se alcanzará más pronto de lo estimado, se hace necesario difundir ampliamente el tema. El presente artículo intenta sintetizar la información disponible y enfocarse en las estrategias que contribuyan a aminorar o evitar los riesgos que ya está provocando el calentamiento global: inundaciones, sequías, deshielos, etcétera. La gran mayoría de la comunidad científica internacional coincide en que es el momento de aplicar las alternativas viables.

*Palabras clave: calentamiento global / gases de invernadero / emisiones de carbono / captura y almacenamiento de carbono*

## Global warning and carbon emissions

ABSTRACT: As the consequences of climatic change are more alarming and scientists warn about the “point of no return” being closer than previously estimated, it becomes necessary to divulge widely the subject. The present article tries to summarize abundant available information and to focus on solution strategies Which contribute to lessen or avoid the risks that global warming is already causing: flood drought, thaw, etc. The majority of the international scientific community agrees that now is the moment to apply viable alternatives..

*Keywords: global warming / greenhouse gases / carbon emissions / carbon capture and storage*

George Power Porto

## 1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global ha sido materia de investigación y discusión desde hace mucho tiempo. Se han buscado diversas explicaciones naturales del fenómeno pero el tema no pasaba del ámbito científico debido a que, salvo algunos casos aislados de años con clima excepcionalmente frío o cálido, jamás se había ligado el tema a causas antropogénicas.

En el pasado siempre ha existido una preocupación general por asuntos considerados como una potencial amenaza para nuestra civilización como la conocemos, y en más de un caso alentado por los medios de comunicación, hasta se llegó a situaciones de histeria colectiva. A temas como plagas, epidemias, invasiones extraterrestres, la Guerra Fría y el peligro de un holocausto nuclear, crisis del petróleo, terrorismo, contaminación ambiental, etcétera, se suman en tiempos recientes el calentamiento global, el cambio climático y sus consecuencias.

Si bien algunos de estos temas fueron una amenaza real y constante, sin embargo han tenido un desarrollo favorable. La Guerra Fría y el peligro de un holocausto nuclear ocasionado por las superpotencias llegaron a su fin. En el caso del medio ambiente, se ha creado gradualmente una sensibilidad y conciencia social y política sobre el tema, de modo que hoy sería impensable cometer muchos de los gruesos errores del pasado.

Pero, a medida que los avances tecnológicos permiten mayor profundidad de estudio de los fenómenos naturales y sus interacciones, esta misma tecnología hace posible medir y detectar causas nunca antes consideradas, que proponen nuevos retos al avance tecnológico. Para muestra basta considerar el ejemplo de la reacción de combustión. Inicialmente solo era de interés estudiar la reacción principal, la energía producida y los gases más importantes involucrados, como el oxígeno del aire y los productos como el dióxido y el monóxido de carbono, así como el vapor de agua. A medida que se desarrollaron instrumentos de medición más sensibles se detectó que el nitrógeno, antes considerado como inerte, en pequeñas cantidades forma diversos óxidos que pueden ser peligrosos; se pudo medir también la presencia de hidrocarburos no quemados, dióxido de azufre, hollín, nano partículas, etcétera. Hoy en día, los gases de combustión de un motor diésel deben ser depurados por varios procesos físicos y químicos antes de ser eliminados a la atmósfera.

En este sentido, el tema del calentamiento global ha ido igualmente evolucionando con los desarrollos tecnológicos y mayor capacidad de comprensión del fenómeno. Ya en 1979, la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima organizada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) expresó la preocupación de que “[...] la continua expansión de las actividades humanas en la tierra pueda causar cambios climáticos significantes en regiones extensas e incluso globalmente”.<sup>1</sup> A esta conferencia siguieron otras de mayor resonancia que finalmente derivaron en la creación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en 1988. Desde entonces, el interés y la preocupación fueron creciendo. Algunos hitos, como la Conferencia de Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED) realizada en Río de Janeiro en 1992, el Protocolo de Kioto en 1997, y la 13.<sup>a</sup> Conferencia de las Partes en la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) de Bali en 2007, son muestra de la importancia del tema en el quehacer político mundial.

Los cuatro *Assessment Reports* (reportes de evaluación) publicados por el IPCC en 1990, 1995, 2001 y 2007, cada uno más complejo y voluminoso que el anterior, demuestran el progreso en el conocimiento científico sobre el cambio climático y sus consecuencias. En el 2007 el IPCC fue galardonado con el Premio Nobel de la Paz por esta labor.<sup>2</sup>

El presente artículo intenta describir en forma sucinta el fenómeno del cambio climático, la controversia sobre las causas principales, los efectos que tendría para la población mundial, así como vislumbrar algunas opciones de solución.

## 2. CALENTAMIENTO GLOBAL

En la discusión sobre el calentamiento global y sus consecuencias en el cambio climático, cabe preguntarse primero si es verdad que la Tierra se está calentando, y de ser así, a qué ritmo. En cuanto a lo pri-

- 
- 1 Intergovernmental Panel on Climate Change. “16 Years of scientific assesment in support of the climate convention”, 2004.
  - 2 Pachauri, R. K. Discurso al recibir el Premio Nobel de la Paz 2007 otorgado al IPCC.

George Power Porto

mero debe aclararse que ya no se trata de ninguna teoría sino de las conclusiones basadas en la observación sistemática de la temperatura media del planeta (promedio de muchas mediciones de la temperatura del aire cerca de la superficie y de los océanos). Los resultados de los últimos cien años confirman, sin lugar a dudas, que la temperatura media se ha incrementado en un aproximado de 0,1°C por década. Normalmente, los registros indican la anomalía o desviación de la temperatura de un valor medio registrado entre los años 1951 y 1980 (este valor medio es muy cercano a 14°C).

En la figura 1 se muestra la temperatura media y la anomalía de temperatura para los datos disponibles desde 1880. La línea delgada con marcadores se refiere a la temperatura media anual y la línea gruesa a la media móvil de cinco años. Es evidente que el incremento de la temperatura se muestra más pronunciado en las décadas recientes y las predicciones sobre el aumento de la temperatura en el futuro varían enormemente, según los modelos aplicados.

La figura 2 muestra diversos modelos de proyecciones hasta el año 2100. Nótese que se prevén aumentos del orden de 2 hasta 5°C, en el caso más pesimista. Las proyecciones del calentamiento global son revisadas de manera continua y los escenarios previstos con cada grado adicional de aumento de temperatura muestran impactos cada vez más graves en el clima, el nivel de los mares y la biodiversidad, al punto de que podrían amenazar seriamente nuestra propia existencia sobre el planeta. Este tema ha sido tratado con bastante dramatismo pero con alentadoras propuestas de solución en documentales como *Una verdad incómoda*,<sup>3</sup> *La hora once*<sup>4</sup> y *Seis grados que podrían cambiar al mundo*.<sup>5</sup> En especial, después del devastador huracán Katrina, en el 2005, se ha tomado mayor conciencia del problema.

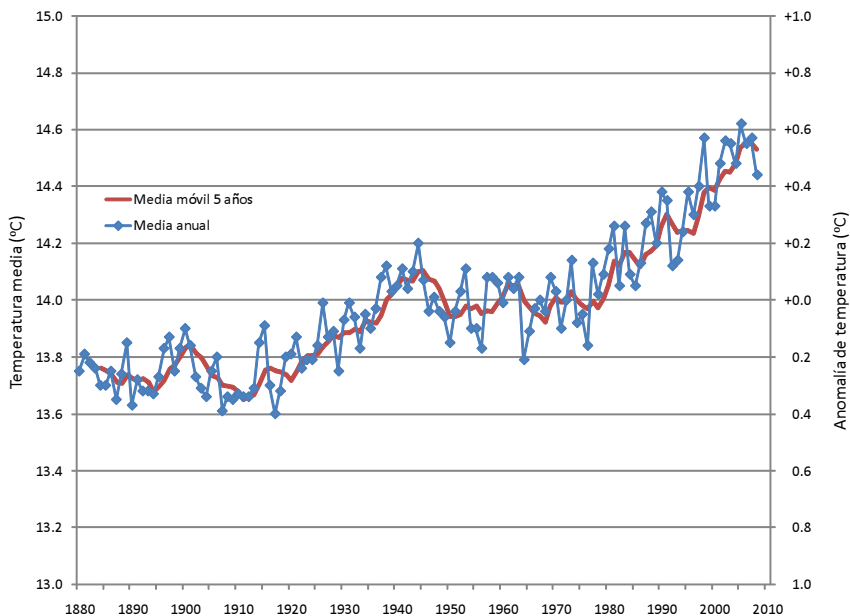
3 Guggenheim, Davis (dir.). *Una verdad incómoda*. Presentador: Al Gore. Paramount, 2006.

4 Conners, Nadia y Leila (dirs.). *La hora once*. Presentador: Leonardo DiCaprio. Warner, 2007.

5 Bowman, Ron. *Seis grados que podrían cambiar el mundo*. Presentador: Alec Baldwin. National Geographic, 2007.

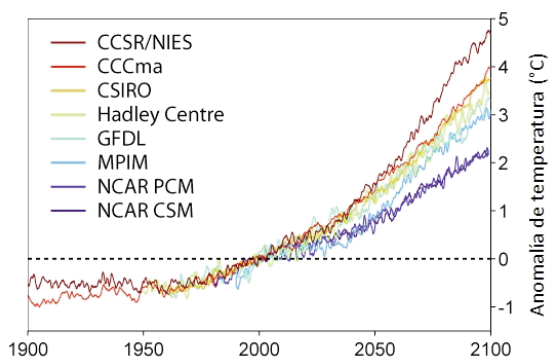
El calentamiento global y las emisiones de carbono

**Figura 1**  
**Variación de la temperatura media global desde 1880**



Fuente: NASA. Goddard Institute for Space Studies, 2008 [en línea]. <<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>>. Elaboración propia.

**Figura 2**  
**Distintas proyecciones del calentamiento global**



Fuente: <http://naturematters.files.wordpress.com>, 2006.

George Power Porto

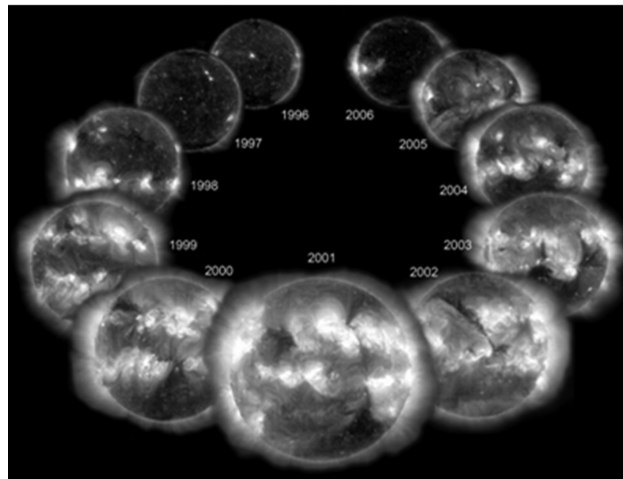
Si sobre el calentamiento global no queda ninguna duda, sobre sus causas existe solo un consenso mayoritario en la comunidad científica. El IPCC concluye que la mayor cuota del aumento de la temperatura global desde la segunda parte del siglo XX se debe “[...] muy probablemente al incremento antropogénico de la concentración de gases de efecto invernadero”.<sup>6</sup> Fenómenos naturales como la variación del ciclo solar (figura 3) y erupciones volcánicas mayores (figura 4) probablemente tuvieron un efecto pequeño de calentamiento desde tiempos preindustriales hasta 1950, y de enfriamiento a partir de 1950. Estas conclusiones básicas han sido apoyadas por lo menos por treinta sociedades científicas y academias de ciencias, incluso todas las academias científicas nacionales de los países industrializados importantes.

Por otro lado, una pequeña pero significativa minoría<sup>7, 8</sup> ha manifestado su desacuerdo con esta explicación sobre el calentamiento global, y urgió, en cartas abiertas al presidente norteamericano y al Secretario General de la ONU, a no ratificar los acuerdos sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivados del Protocolo de Kyoto.

- 
- 6 IPCC. “Summary for policymakers”, en Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. y H. L. Miller (eds.). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group i to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007.
  - 7 “Don’t fight, adapt. We should give up futile attempts to combat climate change”. Carta abierta al Secretario General de las Naciones Unidas. Publicada en *National Post*, el 12 de diciembre del 2007.
  - 8 Robinson, Arthur B.; Robinson, N. B. y Willie Soon. “Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide”. *Journal of American Physicians and Surgeons* 12, 2007. Oregon: Oregon Institute of Science and Medicine, Cave Junction [en línea]. <<http://www.oism.org/pproject/s33p36.htm>>.

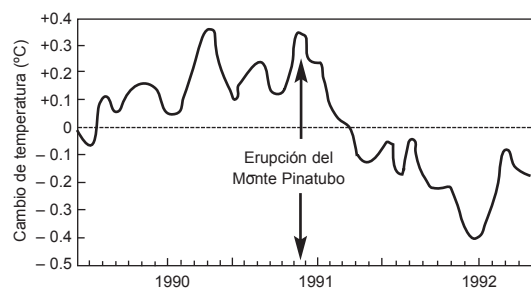
El calentamiento global y las emisiones de carbono

**Figura 3**  
**Variaciones en la actividad de las manchas solares, ciclo de 11 años.**



Fuente: Observatorio espacial SOHO [en línea]. <<http://apod.nasa.gov>>.

**Figura 4**  
**Erupción del monte Pinatubo en Filipinas, en 1991, y su efecto en la temperatura global.**



Fuente: <<http://apollo.lsc.vsc.edu>>.



George Power Porto

## 2.1 El efecto invernadero

Explicado en forma muy simple, este efecto, denominado así por su analogía con un invernadero donde se cultivan plantas, es la acumulación de la energía radiante proporcionada por el sol en un recinto cerrado que permite el ingreso de la radiación pero pocas pérdidas al exterior. De este modo, la temperatura en el interior del invernadero aumenta y las plantas pueden crecer en condiciones más favorables que a la intemperie.

La atmósfera de la Tierra está compuesta principalmente por gases diatómicos y monoatómicos, como el oxígeno ( $O_2$ ), el nitrógeno ( $N_2$ ) y el argón (Ar), los que —puede decirse— son transparentes a la radiación térmica infrarroja, es decir, permiten tanto el ingreso como la salida de energía. Los otros gases, presentes en menor cantidad, son en su mayoría poliatómicos, como el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ), el ozono ( $O_3$ ) y, naturalmente, el vapor de agua ( $H_2O$ ), en cantidades variables como humedad del aire y en las nubes. Estos gases poliatómicos pueden absorber y reemitir la radiación infrarroja produciendo el llamado efecto invernadero al retener en la atmósfera una parte de la energía proporcionada por el Sol.

Mucho se ha hablado y difundido sobre el efecto invernadero, al punto de llegar a tener una connotación totalmente negativa, pero se olvida mencionar que este efecto es indispensable para la vida en la Tierra. Sin este efecto, la temperatura en la superficie terrestre sería mucho más baja y probablemente la vida como la conocemos no se habría desarrollado. ¡El mayor gas de efecto invernadero es el vapor de agua! Vista desde el espacio exterior, la atmósfera de nuestro planeta está cubierta en más de 60% por nubes. Sin este escudo protector de la radiación incidente como de la atrapada en la atmósfera, el clima terrestre sería muy hostil y con temperaturas extremas.

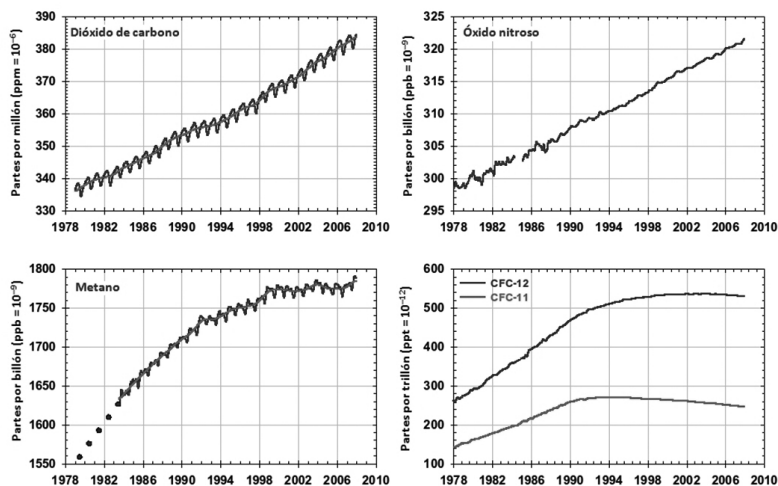
Aparte del vapor de agua, que está sujeto al ciclo hidrológico, los principales gases de efecto invernadero son el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y algunos compuestos orgánicos halogenados, como los clorofluorocarbonos (CFC). La figura 5 muestra las tendencias en la concentración de cinco gases importantes de efecto invernadero. Puede observarse que la concentración de  $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2O$  se ha incrementado constantemente en las últimas décadas, lo que ocasiona un desequilibrio en el balance energético de la atmósfera. Este desequilibrio genera el conocido efecto invernadero y el calentamiento global como su principal consecuencia directa.

También se observa en que las concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  varían cíclicamente. Esto se debe a que dichos gases están involucrados en muchos procesos biológicos y dependen de la incidencia de la radiación solar. Durante el día, y sobre todo en el verano del hemisferio norte, las plantas realizan la fotosíntesis aprovechando la energía solar y convierten el  $\text{CO}_2$  del aire y el agua en celulosa y carbohidratos que las plantas requieren para su crecimiento, produciendo además oxígeno. En este periodo, la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera disminuye.

Durante la noche, especialmente en el invierno boreal, las plantas, al igual que los animales y los seres humanos, respiran, consumiendo oxígeno y generando  $\text{CO}_2$ . En cuanto al  $\text{CH}_4$ , este resulta de procesos de descomposición anaeróbicos de plantas y animales, procesos que se han llevado a cabo en la Tierra por millones de años y que han generado finalmente los yacimientos de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), los que son explotados a un ritmo creciente; de este modo, se está revirtiendo el proceso de captación del  $\text{CO}_2$  de la atmósfera que se realiza desde que empezaron a existir las plantas sobre la Tierra.

Figura 5

Tendencias en la concentración de gases de efecto invernadero  
Unidades: ppm =  $10^{-6}$ , ppb =  $10^{-9}$ , ppt =  $10^{-12}$

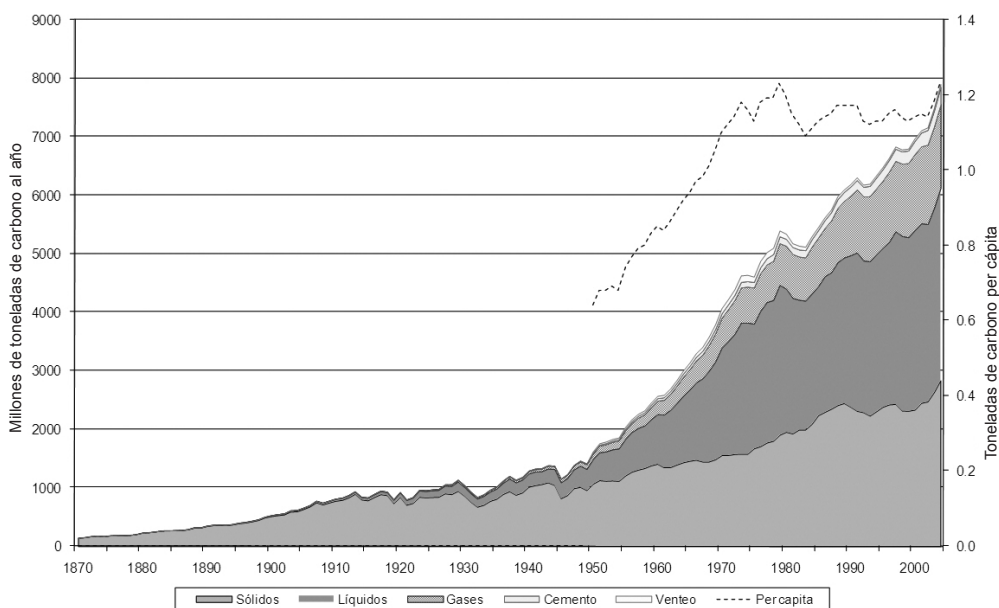


Fuente: NOAA Earth System Research Laboratory. *The NOAA Annual Greenhouse Index (AGGI)*. Colorado, 2005 [en línea]. <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>>.

George Power Porto

Desde el inicio de la era industrial, el consumo de combustibles fósiles se ha incrementado constantemente, pero en las últimas décadas el incremento ha sido más pronunciado. Las emisiones actuales de carbono en forma de CO<sub>2</sub> son de alrededor de 8 mil millones de toneladas al año con una tendencia a duplicarse en los siguientes 50 años. Estas emisiones provienen principalmente de tres fuentes, a saber: 1) la producción de energía por combustión de carbón, petróleo y gas natural; 2) la industria del cemento, y 3) el venteo (*flaring*), es decir la combustión de los gases excedentes de la extracción y refinación de petróleo. En la figura 6 se muestra la evolución de las emisiones de carbono desde 1870, así como las emisiones equivalentes per cápita desde 1950.

**Figura 6**  
**Emisiones de carbono antropogénicas desde 1870 (1 t C = 3,66 t CO<sub>2</sub>)**



Fuente: Oak Ridge National Laboratory. "Carbon Dioxide Information Analysis Center". Tennessee, 2007 [en línea]. <<http://cdiac.ornl.gov/ndps/ndp006.html>>. Elaboración propia.

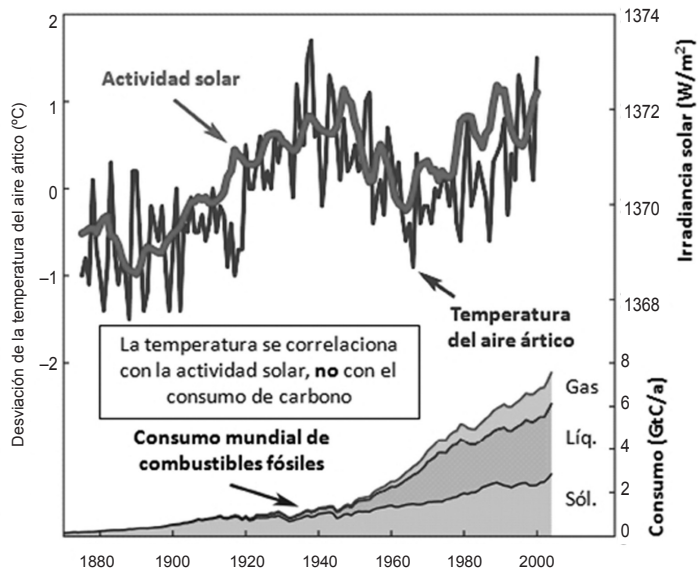
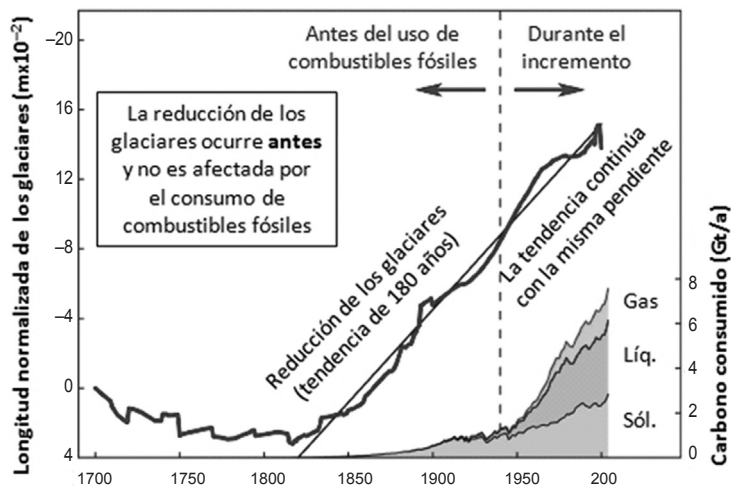
## 2.2 Relación entre las emisiones de carbono y el calentamiento

Basta colocar los gráficos de las figuras 1, 5 y 6 en la misma escala de tiempo y no será difícil concluir que muy probablemente existe una relación entre las emisiones de carbono, el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y el calentamiento global. Esto se hace más evidente cuando se examinan datos provenientes de muestras de perforaciones del hielo antártico, anillos de crecimiento anual de los árboles, radiactividad de rocas, etcétera, que permiten comparar las fluctuaciones del CO<sub>2</sub> de la atmósfera y de la temperatura desde hace más de 500 mil años. Siempre se observa una correlación entre la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y la temperatura, pero el máximo jamás superó los 270 ppm de CO<sub>2</sub>. Actualmente, la concentración promedio es de 385 ppm, con posibilidades de superar en la próxima década el “punto de no retorno” (estimado entre 450 y 500 ppm) al ritmo de crecimiento actual. A partir de ese momento, los científicos predicen daños irreversibles al ecosistema con una probable desaparición de más del 30% de las especies vivientes y millones de seres humanos afectados, especialmente en los países más pobres.

Los detractores indican enfáticamente que estas predicciones están erradas y que no hay fundamento científico que soporte la teoría de que el calentamiento global sea causado por la actividad humana;<sup>i</sup> más aún, se aclara que el aumento de la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera es el *resultado* del aumento de temperatura, y al revés. Se argumenta también que la temperatura del aire en el Ártico y el mar de los Sargazos y el nivel del mar han aumentado de manera constante después de la llamada “pequeña era de hielo” hace unos 300 años, mucho antes de la era industrial, y por lo tanto, no se puede correlacionar con la quema de combustibles fósiles sino más bien con la actividad solar (figura 7). El exceso de emisiones de CO<sub>2</sub> es absorbido por los mares, la tierra y en forma especial por las plantas. Los bosques de las regiones templadas y frías muestran efectivamente una tasa de crecimiento mayor en las últimas décadas, de modo que no debe pensarse en el CO<sub>2</sub> como un contaminante, sino más bien como un “regalo” de la era industrial al favorecer la propia vida como alimento de las plantas y estas a su vez de los animales y seres humanos.

George Power Porto

**Figura 7**  
Ejemplos de hipótesis contrarias al calentamiento global causado por actividad humana.



Fuente: Oregon Institute of Science and Medicine, 2007.

La controversial conclusión de estos científicos es que no debemos producir menos sino más energía si se ha de mantener el crecimiento económico a la par con el de la población. Por el momento, los combustibles fósiles y nucleares son la única fuente de energía económicamente viable, y no deben desperdiciarse esfuerzos en desarrollar tecnologías costosas y no competitivas en vista de una supuesta causalidad entre las emisiones de carbono y el aumento de la temperatura, que va a ocurrir de cualquier manera. Más bien, deben dedicarse esfuerzos a paliar los efectos del cambio climático y aprovechar algunos cambios ventajosos, como la posibilidad de poblar zonas inhóspitas de la tierra, como la tundra, y de abrir permanentemente el paso en el noroeste del Océano Ártico, lo que reduciría enormemente las rutas de la navegación comercial.

No debe olvidarse tampoco que el dióxido de carbono no es el único gas de efecto invernadero, y que otros, como el metano, y especialmente los gases de la era industrial, tienen un mayor potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés), porque, a pesar de estar presentes en menor concentración tienen un tiempo de vida mucho mayor en la atmósfera. La tabla 1 muestra este potencial para varios gases presentes en la atmósfera. Es evidente que, aun si las emisiones de todos estos gases industriales cesarán en forma instantánea, pasarían muchos años hasta que desaparecieran completamente de la atmósfera y el efecto invernadero persistiría.

**Tabla 1**  
**Tiempo de vida en la atmósfera (años) y potencial de calentamiento global (GWP) de varios gases de efecto invernadero**

Gas	Tiempo de vida atmosférico	GWP a 100 años	GWP a 20 años	GWP a 500 años
CO <sub>2</sub>	50 – 200	1	1	1
CH <sub>4</sub>	12 ± 3	21	556	6,5
N <sub>2</sub> O	120	310	280	170
HFC-23	264	11.700	9.100	9.800
HFC-125	32,6	2.800	4.600	920
HFC-134a	14,6	1.300	3.400	420
HFC-143a	48,3	3.800	5.000	1.400
HFC-152a	1,5	140	460	42

(continúa)

George Power Porto

(continuación)

Gas	Tiempo de vida atmosférico	GWP a 100 años	GWP a 20 años	GWP a 500 años
HFC-227ea	36,5	2.900	4.300	950
HFC-236fa	209	6.300	5.100	4.700
HFC-4310mee	17,1	1.300	3.000	400
CF <sub>4</sub>	50.000	6.500	4.400	10.000
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	10.000	9.200	6.200	14.000
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	2.600	7.000	4.800	10.100
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	3.200	7.400	5.000	10.700
SF <sub>6</sub>	3.200	23.900	16.300	34.900

Nota: El GWP se define como la fuerza radiante acumulada, integrada de efectos directos e indirectos en un periodo de tiempo, de la emisión de una unidad de masa de un gas relativo a un gas de referencia (CO<sub>2</sub>).

Fuente: IPCC, 1996.

Sería largo detallar aquí más de los argumentos a favor y en contra, pero no se puede dejar de notar una cierta simplicidad de las conclusiones de los detractores. Si bien es cierto que a mayor temperatura se emite más carbono a la atmósfera de la biomasa y de los grandes sumideros o depósitos de carbono como el mar, no se puede ignorar absolutamente el efecto invernadero y el círculo vicioso que resulta entre estos dos factores. El aumento en la tasa de crecimiento de las plantas en las últimas décadas obviamente no solo se debe al incremento de la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico sino fundamentalmente también a la mayor tecnificación de la agricultura con el uso de fertilizantes y pesticidas, imágenes satelitales, etcétera. Tampoco se puede tildar simplemente de teorías al trabajo del IPCC y la complejidad alcanzada en su cuarto reporte de evaluación (AR4), con un volumen de más de mil páginas, con descripción de modelos, tablas, gráficos y proyectos, en contraposición con algunos artículos y editoriales publicadas por los detractores y sus adherentes. La reducción de las emisiones de carbono ya fue aceptada como estrategia por las naciones industrializadas y solo queda adoptar las medidas necesarias para lograr este fin.

### 3. ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

En el 2007, la prestigiosa *National Geographic Magazine* dedicó varios artículos al tema del calentamiento global y las emisiones de car-

bono.<sup>9, 10, 11</sup> Incluso, la revista *Selecciones* (Reader's Digest) publicó un pequeño resumen sobre el tema. Figuras del cine, la televisión y la política tratan de mejorar su imagen ecológica al mostrar que conducen vehículos "verdes" que funcionan solo con aceite reciclado o son híbridos (combustible y electricidad). Lamentablemente se cae en el simplismo de enfocar el problema a una solución única (hidrógeno, etanol, etcétera) y se olvida que la demanda real de energía del mundo actual jamás podrá satisfacerse con una sola de estas tecnologías. Se requieren propuestas viables, basadas en tecnologías ya existentes y que puedan mejorarse e implementarse en el mediano plazo para alcanzar en unos cincuenta años la estabilización a los niveles actuales o la reducción total de las emisiones de carbono a niveles preindustriales.

Después del Protocolo de Kyoto, la revista *Environment* dedicó una edición especial al tema y entre los artículos llama la atención uno en especial que presenta los resultados de un grupo de investigadores de la Universidad de Princeton, Nueva Jersey. Lejos de especular sobre los posibles escenarios del calentamiento global, dicho artículo<sup>12</sup> se dedica en concreto a analizar las tecnologías disponibles para reducir las emisiones de carbono. El problema se ataca de manera muy simple. Primero se analiza la tendencia en las emisiones globales de carbono antropogénico, que actualmente son 8 mil millones de toneladas de carbono al año (GtC/a). Hace cincuenta años este valor estaba en menos de la mitad y de aquí a otros cincuenta años se espera una duplicación (la figura 8a muestra los datos de 2004). De no tomar ninguna medida, las emisiones continuarán aumentando hasta triplicarse en cincuenta años más. Con el fin de reducir las emisiones los investigadores han dividido la meta en "cuñas de estabilización". Cada cuña implica adoptar —en el lapso de cincuenta años— una tecnología capaz de reducir las emisiones en 1 GtC/a. Para construir el "triángulo de estabilización" (figura 8b), es decir, para llegar en cincuenta años al mismo nivel

9 Appenzeller, Tim "The Big Thaw". *National Geographic Magazine*, julio del 2007.

10 McKibben, Bill. "Carbon's New Math". *National Geographic Magazine*, octubre del 2007.

11 Bourne, Joel K., Jr. "Biofuels: Green Dreams". *National Geographic Magazine*, octubre del 2007.

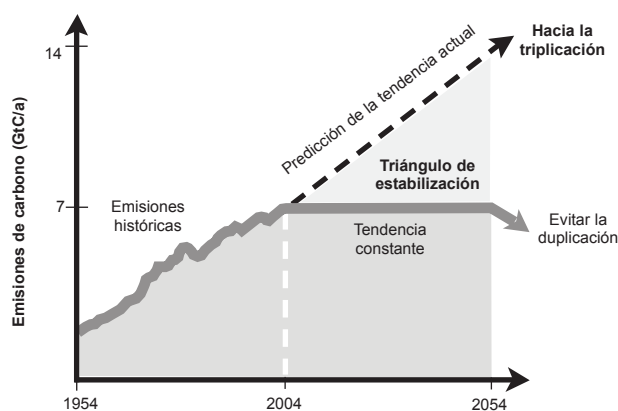
12 Socolow, Robert; Hotinski, Roberta; Greenblatt, Jeffery B. y Stephen Pacala. "Solving the climate problem - Technologies Available to Curb CO<sub>2</sub> Emissions". *Environment*, vol. 46, núm. 10, pp. 8-19, 2004.



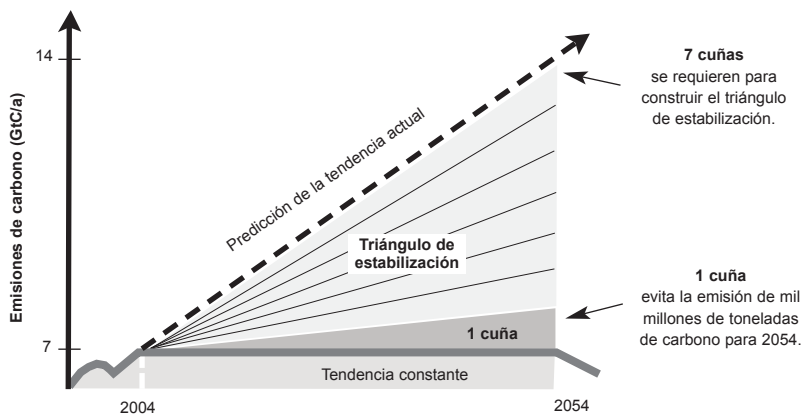
George Power Porto

de emisiones que el nivel actual, se requieren ocho cuñas o tajadas (en el artículo de Socolow et al. se consideran siete). Más cuñas de estabilización se requerirían para reducir aún más las emisiones y llegar tal vez a los niveles de la década de 1950 o a un nivel neto de emisiones igual a cero.

**Figura 8a**  
Emisiones históricas de carbono y dos posibles escenarios futuros



**Figura 8b**  
"Cuñas de estabilización" para la reducción de emisiones.



Fuente: Socolow, R.; Hotinski, R.; Greenblatt, J. B. y S. Pacala. Op. cit.

Las tecnologías disponibles para lograr las cuñas de estabilización se resumen en la tabla 2. Algunas de estas soluciones son:

- *Vehículos más eficientes.*- Existen mil millones de vehículos ligeros en el mundo, número que tiende a duplicarse en los próximos cincuenta años. Para un recorrido de 15.000 km/año y un consumo de 50 km/gal, las emisiones equivalentes en cincuenta años serían de 2 GtC/a. Un aumento de la eficiencia a 100 km/gal (posible con la tecnología actual) significaría emisiones de solo 1 GtC/a, con lo cual se lograría una cuña de estabilización.
- *Reducción del uso de vehículos.*- Similar al caso anterior, pero los vehículos recorren solo 7.500 km/año, la diferencia debe ser transporte público basado en energías renovables. Resultado 1 GtC/a menos, es decir, otra cuña de estabilización.
- *Edificios y viviendas eficientes.*- Mejorar las formas de aislamiento y el uso de la energía; que los sistemas de calefacción y aire acondicionado sean más eficaces y mejor diseñados; usar paneles solares; eliminar todos los bombillos incandescentes y reemplazarlos por focos ahorradores. Resultado: una cuña menos del sector comercial y otra del sector residencial.
- *Plantas de energía más eficientes.* La producción de electricidad estimada en cincuenta años es de 13.000 TWh/a. Las emisiones actuales son de 232 gC/kWh, con 40% de eficiencia, equivalente a 3 GtC/a. Un incremento de la eficiencia a 60% (por ejemplo, plantas de ciclo combinado) significa emisiones de 2 GtC/a.
- *Reemplazo de carbón por gas natural en plantas de potencia.*- Condiciones actuales: 2,8 Gt de carbón (70,7% C), 1.400 GW de capacidad instalada y 10.800 TWh de generación. Emisiones equivalentes de 1,98 GtC/año. Equivalente energético en gas natural: 1,3 Gt (75% C), emisiones 0,98 GtC/año.
- *Energía nuclear.*- Una cuña más se deriva de la triplicación de la capacidad de producción de energía nuclear (351 GW en 1999). El crecimiento de la capacidad instalada de energía nuclear ha sido menor que lo proyectado por problemas de abastecimiento, disposición de residuos y transferencia de tecnología.
- *Energía eólica y solar.*- El incremento de la producción de energía eólica y solar en 100 TWh/año en un lapso de cincuenta años representan una cuña cada una. La tecnología está cambiando constan-

George Power Porto

temente y ya existen turbinas de viento de 5 MW y plantas solares (fotovoltaicas y térmicas) de 30 MW.

- *Combustible a partir de biomasa.* Por lo menos una cuña adicional es el posible reemplazo de combustibles fósiles por biocombustibles (etanol, biodiésel, biogás). Los grados de eficiencia energética varían mucho (tabla 3) y es importante evitar la competencia con la producción de alimentos.

Los autores detallan, con ejemplos de cálculo, otras soluciones, teniendo en cuenta que algunas de ellas, como la energía eólica y fotovoltaica, aún no son comercialmente competitivas, pero con incentivos y políticas adecuadas (por ejemplo, la Ley de Energías Regenerativas de Alemania) pueden llegar a serlo. Los opositores y el cabildeo de la industria energética obviamente critican que se malgasten ingentes recursos económicos, que bien podrían destinarse a paliar los efectos del cambio climático, el hambre y las enfermedades.

Otras propuestas provienen del científico ganador del premio Nobel de Energía, Daniel Kammen. En el especial de televisión de seis episodios llamado *Ecópolis - Ciudad del Futuro*,<sup>13</sup> investiga soluciones tecnológicas visionarias para los retos de las megaciudades del futuro, como la producción de alimentos, el acceso al agua potable, la energía, la gestión de residuos y el transporte. Las soluciones se analizaron desde el punto de vista de la viabilidad técnica y económica, así como el impacto real energético y la reducción real de emisiones (“huella de carbono”). Al analizar varias alternativas y tratar de escoger las mejores soluciones en cada caso, es notable ver cuán complejos resultan todos los factores involucrados en las emisiones de gases de invernadero.

---

13 Kammen, Daniel. *Ecópolis - City of the Future*. Discovery Channel, 2008.

**Tabla 2**  
**Resumen de tecnologías disponibles para reducir la emisiones de carbono**

Tecnología	Electricidad	Combustible	Calor	Reserva
1. Vehículos eficientes		X		
2. Reducción del uso de vehículos		X		
3. Edificios eficientes	X	X	X	
4. Plantas de energía más eficientes	X			
5. Energía a partir de gas natural	X			
6. Captura de CO <sub>2</sub> en planta	X			
7. Energía nuclear	X			
8. Energía eólica	X			
9. Energía solar	X			
10. Captura de CO <sub>2</sub> en planta de H <sub>2</sub>		X		
11. Captura de CO <sub>2</sub> en planta de combustibles sintéticos		X		
12. H <sub>2</sub> a partir de energía eólica		X		
13. Combustible de biomasa		X		
14. Reducción de deforestación				X
15. Explotación con conservación				X

Fuente: Socolow, R.; Hotinski, R.; Greenblatt, J. B. y S. Pacala. "Solving the climate problem - Technologies Available to Curb CO<sub>2</sub> Emissions". *Environment*, Vol. 46, núm. 10, 2004.

**Tabla 3**  
**Comparación de eficiencia energética de biocombustibles**

Tipo de combustible	Unidades de energía obtenible por cada unidad de energía gastada
Etanol a partir de maíz (EEUU)	1,3
Etanol a partir de caña de azúcar (Brasil)	8
Biodiésel a partir de colza (Alemania)	2,5
Etanol a partir de celulosa (EEUU, todavía en desarrollo)	2 a 36

Fuente: *National Geographic Magazine*, 2007.

#### 4. CONCLUSIONES

Las consecuencias del calentamiento global en el futuro inmediato serán bastante graves, con cambios climáticos severos, deshielo, sequías, inundaciones, y probablemente millones de seres humanos afectados, especialmente en los países con capacidad económica limi-

George Power Porto

tada. El medio ambiente ha mostrado cierta capacidad de amortiguación de estos cambios, pero se teme que en las próximas décadas se llegue al “punto de no retorno”, a partir del cual cualquier medida será demasiado tarde.

A pesar de que un grupo importante de científicos se opone a la teoría del calentamiento global causado por el hombre, la limitación de los modelos del clima y ecosistemas y la incertidumbre en las predicciones, la gran mayoría de la comunidad científica está de acuerdo en que debe hacerse algo ahora. Las recientes crisis energéticas y financieras pueden tomarse como un respiro para el medio ambiente a fin de adoptar medidas y políticas acordes con el crecimiento sostenible. Los certificados de carbono comercializados a partir del Protocolo de Kyoto son una alternativa viable para el desarrollo de proyectos ecológicos en países en vías de desarrollo.

La adopción de tecnologías más limpias, energéticamente eficientes y autosostenibles tiene ventajas económicas, al margen de cualquier teoría sobre las causas del calentamiento global. Al ritmo como está creciendo la población mundial, la demanda energética en los próximos años no podrá ser satisfecha solo con combustibles fósiles, y se requerirán diversas fuentes alternativas que, para que sean viables, deben ser desarrolladas ahora.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aitkin, Don et al. "Don't fight, adapt. We should give up futile attempts to combat climate change". Carta abierta al Secretario General de las Naciones Unidas. *National Post*, 12 de diciembre del 2007.
- Appenzeller, Tim. "The big thaw". *National Geographic Magazine*. Washington, DC: National Geographic Society, julio del 2007.
- Baldwin, Alec. *Six degrees could change the world*. Director: Ron Bowman. National Geographic, 2007.
- Bourne, J. K. "Biofuels: Green dreams". *National Geographic Magazine*. Washington, DC: National Geographic Society, octubre del 2007.
- DiCaprio, Leonardo. *La hora once*. Documental. Directoras: Nadia Conners y Leila Conners Petersen. Warner, 2007.
- Gore, Al. *Una verdad incómoda*. Documental. Director: Davis Guggenheim. Paramount, 2006.
- Kammen, D. *Ecopolis: City of the future*. Programa especial de televisión. Discovery Channel, 2008.
- IPCC. "Intergovernmental Panel on Climate Change: 16 years of scientific assessment in support of the climate convention". Diciembre del 2004 [en línea]. <<http://www.ipcc.ch/pdf/10th-anniversary/anniversary-brochure.pdf>>.
- McKibben, Bill. "Carbon's new math". *National Geographic Magazine*. Washington, DC: National Geographic Society, octubre del 2007.
- NASA. Goddard Institute for Space Studies. Nueva York, 2008 [en línea]. <<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>>.
- NOAA Earth System Research Laboratory. "The NOAA Annual Greenhouse Index (AGGI)". Boulder, Colorado, 2005 [en línea]. <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>>.
- Oak Ridge National Laboratory. "Carbon Dioxide Information Analysis Center". Tennessee: Oak Ridge, 2007 [en línea]. <<http://cdiac.ornl.gov/ndps/ndp006.html>>.
- Pachauri, R. K. Presidente del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Discurso de recepción del Premio Nobel de la Paz. Oslo, 10 de diciembre del 2007 [en línea]. <[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/peace/laureates/2007/ipcc-lecture\\_en.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/peace/laureates/2007/ipcc-lecture_en.html)>.

George Power Porto

Robinson, A. B.; Robinson, N. B. y W. Soon. "Environmental Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide". *Journal of American Physicians and Surgeons* 12. Oregon: Oregon Institute of Science and Medicine, Cave Junction, 2007 [en línea]. <<http://www.oism.org/pproject/s33p36.htm>>.

Robinson, Noah. "The global warming myth". 11<sup>th</sup> Annual Gilder/Forbes Telecosm Conference. Seattle: Discovery Institute, 2007 [en línea]. <<http://www.discovery.org/v/30>>.

Socolow, R.; Hotinski, R.; Greenblatt, J. B. y S. Pacala. "Solving the climate problem: Technologies available to curb CO<sub>2</sub> emissions". *Environment*. Vol. 46, núm. 10. Washington, DC: Heldref Publications, 2004.

Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. y H. L. Miller (eds.). "IPCC, 2007: Summary for Policymakers". *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Nueva York: Cambridge University Press, 2007.