



FUNDACION NEXUS

CIENCIAS SOCIALES – MEDIO AMBIENTE – SALUD

***DIOXIDO DE CARBONO Y EFECTO INVERNADERO EN
LA HISTORIA DE LA TIERRA***

Buenos Aires, julio/2010

1- INTRODUCCION

Hace más de 100 años el químico sueco Svante Arrhenius y el geólogo americano Thomas H. Chamberlin propusieron independientemente la hipótesis de que la temperatura superficial de la tierra dependía de los niveles atmosféricos de dióxido de carbono debido al llamado efecto invernadero. Arrhenius estimó que al duplicarse la concentración de CO₂ en la atmósfera se produciría un aumento global de temperatura de aproximadamente 9 grados Celcius.

En 1939 G.S.Callendar supuso que el calentamiento observado en los 60 años anteriores podría haberse debido a un aumento en la cantidad de CO₂ atmosférico que a su vez sería consecuencia de un mayor uso de combustibles fósiles. A principios de la década del 50 G.N.Plass razonó de una forma similar. Ninguna de las dos propuestas fue tomada muy en serio por la comunidad científica especialmente por que por aquella época la temperatura media global dejó de subir y, en las dos décadas siguientes disminuyó levemente. Esto concordaba con la suposición de que casi todo el CO₂ producido industrialmente podía ser absorbido por los océanos y eliminado de la atmósfera; como las mediciones de CO₂ de muestras de aire tomadas en lugares y épocas diferentes variaban mucho era imposible determinar si la cantidad total en la atmósfera aumentaba o disminuía.

Hacia finales de la década del 70, las mediciones de concentración de CO₂ en la atmósfera indicaban ya un aumento indiscutible. En 1982 se predijo que si este gas estaba realmente afectando el clima, hacia el decenio del 90 podría observarse un calentamiento neto. Los seis años más cálidos registrados desde principios de este siglo han sido los de 1988, 1987, 1983, 1981, 1980 y 1986 en ese orden.

2- EL EFECTO INVERNADERO

El efecto invernadero se produce por la presencia en la atmósfera de ciertos gases que facilitan el calentamiento de la superficie del planeta. Actúan permitiendo que llegue hasta ella la radiación solar pero interceptando la salida hacia el espacio de la radiación infrarroja (térmica) que el planeta emite, reenviando gran parte de esta energía hacia la superficie produciendo así un aumento de temperatura que depende de los niveles de radiación incidente y de la concentración de "gases invernadero" en la atmósfera.

Hay varios gases además del CO₂ que producen este efecto. Algunos de ellos son emitidos a la atmósfera en cantidades cada vez mayores como consecuencia de las actividades humanas y no deben ser

olvidados al estudiar el calentamiento global. Entre ellos podemos mencionar al metano (que es 20 veces más eficiente que el CO₂ pero tiene un tiempo de permanencia menor en la atmósfera), al óxido nitroso y a los halocarburos. El ozono, el amoníaco y el agua también pueden ser considerados como "gases invernadero".

Se hace hincapié en el CO₂ por ser el más abundante en la atmósfera, por estar relacionado con la regulación de la temperatura terrestre en eras geológicas anteriores y por estar estrechamente vinculado con la producción agrícola e industrial que, en los últimos dos siglos han aumentado considerablemente. Por otra parte, la posibilidad de explicar los climas de Venus y Marte a través de un efecto invernadero mediado por CO₂ le otorga un interés teórico adicional

3- LA TIERRA PRIMITIVA

La mayoría de los modelos cosmológicos indican que cuando se formó el sistema solar, hace unos 4600-5000 millones de años, la luminosidad del sol era entre un 25 y un 30 % menor que la actual; desde entonces ha ido aumentando. Si la primitiva atmósfera de la tierra hubiera sido como la actual, la baja luminosidad solar habría producido una glaciación general. La evidencia geológica indica no sólo que esta glaciación no ha ocurrido sino que, por el contrario, la tierra ha tenido océanos líquidos desde hace por lo menos 3800 millones de años siendo su temperatura media mayor que la actual. Sagan y Mullen en 1972 sugirieron que la menor luminosidad solar podría haber sido compensada por un efecto invernadero mayor. Para que esto ocurriera era necesario que la composición de la primitiva atmósfera terrestre fuera diferente de la actual. Las primeras teorías postularon una atmósfera fuertemente reductora, con niveles de amoníaco y metano muy superiores a los que tenemos actualmente. Se calculó que una concentración relativamente baja de amoníaco sería suficiente como para producir el efecto invernadero necesario y se supuso que la transición entre el efecto invernadero debido a amoníaco y agua de ese período y el actual debido a CO₂ y agua sería consecuencia del aumento de la fotosíntesis hace 1000-2000 millones de años. Cálculos posteriores demostraron que esa cantidad de NH₃ habría desaparecido por fotodisociación en un período de tiempo muy breve y no hay evidencias de que existiera una fuente adecuada para reemplazar al que se iba disociando.

La idea de que la atmósfera de la tierra primitiva habría sido sólo levemente reductora está más de acuerdo con los conocimientos actuales relacionados principalmente con las condiciones en que pueden sintetizarse por vías no biológicas las principales biomoléculas. En este caso, el gas que más probabilidades pudo haber tenido para producir el suficiente efecto invernadero es el CO₂ que tiene sobre el NH₃ la ventaja adicional de originarse en procesos geológicos normales.

Hay en la tierra mucho más carbono almacenado bajo la forma de carbonatos (restos fósiles de esqueletos de animales) y kerógeno (restos de tejidos blandos de animales) que en la materia viva o muerta acumulada en la superficie. Si todo el C presente en las rocas carbonatadas se liberara a la atmósfera, la presión parcial de CO₂ llegaría a ser de unos 70 bar. Con una presión parcial 200 veces menor y una luminosidad solar equivalente a la de hace 4200 millones de años, los modelos climáticos permiten predecir una temperatura media mucho mayor que la mínima necesaria para impedir una glaciación. El hecho de que la tierra primitiva fuera tectónicamente muy activa (una consecuencia directa de esta actividad es una mayor liberación de CO₂ a la atmósfera) apoya la suposición de una atmósfera rica en este gas. La posterior disminución de los niveles atmosféricos de CO₂ y el incremento de la luminosidad solar serían procesos relacionados.

Se ha postulado la existencia de un mecanismo de realimentación negativa entre la temperatura superficial de la tierra y la presión parcial de CO₂ que podría explicar la constancia en la temperatura media global pese a las variaciones en la luminosidad solar.

4- EL CICLO GEOQUIMICO DEL CARBONO

El vulcanismo y los procesos metamórficos liberan CO₂ de las rocas a la atmósfera. En períodos de tiempo geológicamente significativos, este C regresa a las rocas a través de la meteorización de silicatos y el depósito de carbonatos en rocas sedimentarias según la siguiente secuencia:

- 1- Meteorización de rocas carbonatadas (en superficie)
- 2- Meteorización de rocas silicatadas (en superficie).
- 3- Formación de carbonatos en los océanos (especialmente por vía biológica)
- 4- Meteorización de silicatos con formación de carbonatos
- 5- Descomposición metamórfica o magmática de carbonatos (a grandes profundidades en zonas de subducción y de vulcanismo activo)

Los productos de las etapas 1 y 2 son transportados por los ríos hasta el océano, cuya fauna los emplea para formar caparzones de carbonato de calcio (etapa 3). La meteorización de rocas carbonatadas (etapas 1 + 3) no representa ni ganancia ni pérdida neta de CO₂ (la etapa 3 es la

inversa de la 1). En cambio la meteorización de silicatos (etapas 2 + 3) produce una pérdida neta de CO₂ atmosférico (las etapas 2 y 3 sumadas equivalen a la 4). En las profundidades de la tierra hay descomposición metamórfica y magmática de carbonatos (etapa 5) con liberación de CO₂ a la atmósfera. Estos procesos combinados forman parte de un ciclo que pudo haber sido el que reguló los niveles de CO₂ en las atmósferas de la Tierra, Marte y Venus. Se calcula que este ciclo opera en períodos de tiempo de orden de los 500.000 años.

La velocidad de meteorización de silicatos (etapa 2) controla al ciclo de meteorización-vulcanismo. Esta reacción ocurre solamente durante el tiempo en que el agua de lluvia y de escorrentía está en contacto con rocas y suelos y se la puede medir indirectamente conociendo los niveles de SiO₂ en los ríos. Las determinaciones realizadas indican que estos niveles aumentan con la temperatura, con el caudal de los ríos y con la presión de CO₂ (en los espacios porales de los suelos esta presión está aumentada en un orden de magnitud con respecto a los valores atmosféricos debido a la respiración de las raíces, la presencia de ácidos orgánicos y la descomposición de la materia orgánica de los suelos.)

Una menor luminosidad significaría un menor calentamiento superficial. La consecuencia inmediata sería una menor evaporación de agua y menos precipitaciones disminuyendo así la tasa de meteorización (etapas 1 y 2). Si la actividad metamórfica y el vulcanismo no varían (etapa 5), el balance neto sería una acumulación de CO₂ en la atmósfera, que produciría un mayor efecto invernadero, calentando la tierra con lo cual aumentarían las precipitaciones y la meteorización cuyo efecto neto es absorber CO₂ de la atmósfera y disminuir el efecto invernadero, es decir enfriando la tierra reiniciándose así el ciclo. Si el enfriamiento fuera tan grande como para producir una glaciación general, éste no afectaría los niveles de liberación de CO₂ a la atmósfera por tectonismo; el efecto a largo plazo sería el ya descrito. Este mecanismo es el que habría mantenido la temperatura de la tierra casi desde sus comienzos en valores compatibles con la presencia de agua líquida, que es lo que permitió el origen y evolución de la vida.

5- EL PERIODO CRETACICO

Si bien la hipótesis de un nivel de CO₂ atmosférico sin oscilaciones violentas a lo largo de las eras geológicas es válida, esto no significa que no hayan existido fluctuaciones menores. La cantidad de CO₂ en la atmósfera es siempre mucho menor que la que entra o sale de ella. Desequilibrios relativamente pequeños entre los flujos de los componentes del ciclo geoquímico del C pueden alterar significativamente el nivel de CO₂ atmosférico que en los últimos 100 millones de años ha estado disminuyendo (y en consecuencia, la tierra ha estado enfriándose)

Durante el período Cretácico (-135 a -65 millones de años) la temperatura media global fue más alta que la actual. Las observaciones paleogeográficas apoyan esta afirmación: se han encontrado restos fósiles de animales y plantas de climas tropicales en lo que fueron regiones polares cretácicas. La proporción en la que se encuentra el isótopo 18 de oxígeno en dichos fósiles también es indicadora de un clima cálido. De acuerdo con los modelos climáticos de circulación general las variaciones en la tasa de circulación oceánica, los cambios de posición de los continentes y las variaciones en la radiación solar combinadas no alcanzan para justificar estas temperaturas ni su distribución. En cambio, una presión de CO₂ entre 4 y 8 veces mayor que la actual permitiría igualar las temperaturas polares con las calculadas a través de los datos geoquímicos y paleontológicos. Hay evidencias geológicas que permitirían justificar un mayor nivel atmosférico de CO₂ durante el Cretácico: los datos geoquímicos indican que éste fue un período de movimientos rápidos de placas, cuya consecuencia directa es una mayor liberación de CO₂ a la atmósfera (etapa 5). Sobre esta base, los modelos geoquímicos permiten predecir una atmósfera con un nivel de CO₂ entre 5 y 10 veces mayor que el actual. Estos números coinciden con los calculados con los modelos climáticos de circulación general.

6- LOS TESTIGOS DE HIELO DE LA ANTARTIDA

Una prueba directa que relaciona los gases de invernadero con los cambios climáticos la ofrece el estudio de burbujas de aire aprisionadas en los hielos antárticos. La concentración de gases en ellas es la de la atmósfera del momento en que se formaron. La profundidad a la que se encuentra la burbuja y la variación en la distribución de isótopos pesados de H y de O en la columna de hielo permiten determinar cuándo se formó la burbuja. Otra información que puede deducirse de la distribución de isótopos de H y O es la temperatura media global del momento en que la nieve que originó esa capa de hielo se depositó.

La mayoría de los sondeos llegaron a varios centenares de metros de profundidad. La perforación de la estación rusa Vostok llegó a más de 2200 m, abarcando un lapso de 160.000 años. En estos testigos se han medido los niveles de CO₂ metano y de deuterio (que permitió calcular la temperatura del momento de formación). Hay una notable concordancia entre estas tres variables. Tanto la temperatura como el CO₂ atmosférico aumentaron al terminar un período glacial hace unos 130.000 años disminuyendo al comenzar un nuevo período glacial hace 10.000 años. Las oscilaciones en la concentración de metano son concordantes.

7- LAS ESTACIONES METEOROLOGICAS DE MAUNA LOA Y DEL POLO SUR

En 1958 se instalaron analizadores de gas de gran precisión para la medida continua de CO₂ en dos puntos: cerca de la cima del volcán Mauna Loa (en Hawai) y en la estación del Polo Sur del Programa Antártico de los EEUU. Los datos obtenidos en estos lugares fueron suplementados con mediciones en muestras de aire recogidas por aviones en varios puntos de los océanos.

En ambas estaciones se observa una variación cíclica anual en la concentración de CO₂ que refleja las actividades estacionales de las plantas verdes. Durante la primavera y el verano hay una disminución del CO₂ atmosférico debido a una mayor actividad fotosintética; durante el otoño y el invierno es proporcionalmente mayor la respiración, con una liberación neta de CO₂ a la atmósfera. Cuando se elimina esta variación estacional los registros muestran un aumento aproximadamente exponencial del CO₂ en ambas estaciones. Cuando se iniciaron las mediciones la concentración subía a razón de 0,7 ppm/año; hacia finales de la década del 70 había alcanzado una tasa de 1,4 ppm/año.

8- LOS ULTIMOS 200 AÑOS

La combinación de los niveles de CO₂ atmosférico medidos a través de los testigos de hielo de la Antártida y en la estación de Mauna Loa permite reconstruir su historia durante los últimos 200 años. Se han elaborado muchos modelos tratando de explicar esta evolución.

Durante los últimos 200-300 años la actividad humana (especialmente la quema de combustibles fósiles y tala de bosques para dedicar estas tierras a la agricultura) ha sido suficientemente importante como para superar ampliamente los niveles de liberación de CO₂ debido a fenómenos geoquímicos que aportan anualmente a la atmósfera unos 330 millones de toneladas de CO₂. Se calcula que la quema de combustibles fósiles aporta anualmente unos 5.600 millones de toneladas y la deforestación entre 400 y 2.500 millones de toneladas.

El balance neto de esta actividad es que desde principios del siglo XIX el nivel de CO₂ atmosférico ha aumentado de 280 a 340 ppm. Hubo un incremento significativo durante el siglo pasado, cuando la quema de combustibles fósiles todavía no era importante pero sí lo era la deforestación.

Los balances de masa indican que no todo el CO₂ liberado a la atmósfera queda en ella pero no se sabe con certeza cuales son los mecanismos involucrados. Durante muchos años se creyó que los océanos tenían capacidad suficiente como para absorber el exceso de CO₂ atmosférico. Se sabe actualmente que, si bien esto es cierto, el

proceso es muy lento y gran parte del CO₂ permanece en la atmósfera durante un período de tiempo suficientemente largo como para producir un efecto invernadero considerable.

9- EL CICLO GLOBAL DEL C

Los modelos del ciclo global del C tratan de describir los flujos de carbono entre la atmósfera, la biomasa, los océanos y la litósfera (donde se incluye la quema de combustibles fósiles). Uno de los principales problemas al plantear estos ciclos radica en que no se tiene información suficiente respecto del comportamiento de los sistemas naturales. En muchos casos es necesario hacer suposiciones que no siempre pueden ser comprobadas.

En estos modelos, la atmósfera es considerada como un sistema homogéneo; los océanos son divididos en, como mínimo, dos reservorios bien diferenciados: la capa superficial (hasta 80 m de profundidad) o zona de mezcla y el océano profundo. El modelo que más se ajusta a la realidad tiene en cuenta el fenómeno de los afloramientos, que ocurren a latitudes altas y permiten la ventilación de aguas profundas. Se considera que este fenómeno ocurre en el 10 % de la superficie total del océano y el intercambio gaseoso es en ellos 1,7 veces mayor que en el resto del océano.

La determinación de la contribución de la litósfera al CO₂ atmosférico total es la que menos problemas acarrea ya que casi toda la producción proviene de la quema de combustibles fósiles que es la variable que más fácilmente puede medirse.

La complejidad aumenta cuando se trata de describir la biomasa. Para poder hacerlo adecuadamente hay que tener información sobre superficies ocupadas por selvas y bosques, áreas cultivadas discriminadas según su uso (zonas arables, permanentemente cultivadas, pasturas, praderas naturales o artificiales, explotación forestal), tipos y distribución de suelos (especialmente en cuanto a su contenido en materia orgánica y su capacidad para degradarla se refiere), niveles, tipo y distribución de material vegetal en descomposición (hojas, madera, descomposición natural, quemada por el hombre).

La ecuación básica para describir este ciclo tiene en cuenta que la suma de los cambios (con sus signos) en el contenido de C de todos los reservorios es igual a cero. Se calculan los cambios individuales estimando las entradas y salidas de C en cada uno de ellos. Entre las variables que es necesario estimar se encuentra la producción primaria neta (fotosíntesis menos respiración) en cada ecosistema. La tasa neta de fotosíntesis depende de la iluminación, la distribución de agua, la concentración de nutrientes y la presión de CO₂ y es relativamente independiente de la temperatura. La respiración en

cambio, aumenta con la temperatura (en consecuencia calentamiento global significaría un aumento en la liberación de CO₂ debido a la biomasa aumentando el efecto invernadero y con él la temperatura, generándose un ciclo de realimentación positiva). Hay más información sobre el comportamiento fisiológico de las plantas frente a estas variables que sobre el de los ecosistemas. Esto obliga muchas veces a hacer inferencias que rara vez son satisfactorias.

Se pueden estimar el aumento en la superficie total dedicada a agricultura y la intensidad en la tala de bosques (ambas necesarias en el cálculo de biomasa) de varias formas. Woodwell en 1983 lo hizo a través de tres vías diferentes: usando datos de la FAO, usando información sobre deforestación publicada por otros autores y haciendo una estimación en base al aumento de la población mundial. Las tres aproximaciones coinciden en la liberación total de CO₂ en los últimos 120 años pero difieren significativamente en los valores asignados a los últimos años. Otras formas indirectas de realizar estas estimaciones tampoco resultan satisfactorias.

Pese a estos inconvenientes los modelos del ciclo global del C reproducen en forma adecuada no sólo las variaciones en la concentración de CO₂ atmosférico en los últimos 200 años sino también las estimaciones obtenidas a partir del estudio de la distribución de los isótopos pesados de carbono en los anillos de los troncos de los árboles o en organismos marinos. Falta, sin embargo en los modelos información suficiente como para poder reproducir las oscilaciones estacionales observadas tanto en Mauna Loa como en el Polo Sur.

Para poder tener un mejor ajuste entre los modelos y la realidad es necesario estudiar mucho más detalladamente cada uno de los subsistemas que integran este mecanismo.

10- CONSECUENCIAS DE UN CALENTAMIENTO GLOBAL

Actualmente no se discute ni el aumento neto en la concentración de CO₂ atmosférico ni el calentamiento global ni sus causas. La evidencia que lo demuestra es incontrovertible.

A lo largo de las eras geológicas el nivel de CO₂ atmosférico ha sido controlado principalmente por fenómenos físicos, siendo relativamente poco importantes los biológicos. El registro fósil indica que la lenta fluctuación natural en los niveles de CO₂ atmosférico puede equiparar y aún superar a los cambios mucho más rápidos que se están produciendo como consecuencia de la actividad humana.

El tener en cuenta que el CO₂ ha ejercido una influencia primordial sobre la temperatura global del pasado, da una idea de lo que puede esperarse en el futuro, si se continúa con la quema de combustibles fósiles y con la deforestación a un ritmo como el actual. Hay acuerdo

general en que si esto es así, el calentamiento será rápido y se dejará sentir en forma diferente según la latitud. En escala de tiempo humano, el cambio será irreversible. No es fácil predecir el efecto neto sobre las zonas cultivadas pero sí puede predecirse que muy pocos ecosistemas podrán adaptarse con la rapidez necesaria.

Las reservas de combustibles fósiles actuales son suficientes como para multiplicar la concentración de CO₂ atmosférico por un factor que oscila entre 5 y 10. Los cálculos hechos hasta ahora con un aumento mucho menor prevén ya efectos desastrosos para la actividad humana y los ecosistemas.

BIBLIOGRAFIA

Berner, R.A. y Lasaga, A.C.- "Modelización del ciclo geoquímico del carbono". Investigación y Ciencia No 152, pág. 54 (1989).

Esser, G.- "Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts". Tellus 39 B, pág.245 (1987).

Friedli, H., Löttscher, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U. y Stauffer, B.- "Ice core record of the 13C/12C ratio of atmospheric CO₂ in the past two centuries". Nature vol.324, pág.237 (1986).

Graedel, T.E. y Crutzen, P.J.- "Una atmósfera cambiante". Investigación y Ciencia No 158, pág.22 (1989).

Houghton, R. y Woodwell, G.M.- "Cambio climático global". Investigación y Ciencia No 153, pág. 8 (1989).

Kasting, J.F., Toon, O.B. y Pollak, J.B.- "Evolución del clima en los planetas terrestres". Investigación y Ciencia No 139, pág. 48 (1988).

Owen, T. y Cess, R.D.- "Enhanced greenhouse to compensate for reduced solar luminosity on early Earth". Nature vol.277, pág. 640 (1979).

Pearman, G.I., Etheridge, D., de Silva, F. y Fraser, P.J.- "Evidence of changing concentrations of atmospheric CO₂, NS₂T and CH₄ from air bubbles in Antarctic ice". Nature vol.320, pág. 248 (1986).

Revelle, R.- "Dióxido de carbono y clima mundial". Investigación y Ciencia No 73, pág.10 (1982).

Rotty, R.M.- "Estimates of seasonal variation in fossil fuel CO₂ emissions". Tellus 39 B 1-2. pág.184 (1987).

- Schneider, S.H.- "Modelos climáticos". Investigación y Ciencia No 130, pág. 40 (1987).
- Schneider, S.H.- "Un clima cambiante". Investigación y Ciencia No 158, pág.32 (1989).
- Siegenthaler, U. y Oeschger, H.- "Biospheric CO₂ emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data". Tellus 39 B 1-2, pág.140 (1987).
- Walker, J.C.G. , Hays, P.B. y Kasting, J.F.- "A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of earth's surface temperature". Journal of Geophysical Research vol.86, No C10, pág. 9776 (1981).
- Woodwell. G.M.- "La cuestión del dióxido de carbono". Investigación y Ciencia No 18, pág. 6 (1978).
- Woodwell, G.M., Hobbie, J.E., Houghton, R.A., Melillo, J.M., Moore, B., Peterson, B.J. y Shaver, G.R.- "Global deforestation: contribution to atmospheric carbon dioxide". Science vol.222, No 4628, pág. 1081 (1983).