

SUMIDEROS DE CARBONO PARA EL FORZAMIENTO CLIMÁTICO ANTROPOCENO. UNA VISIÓN DE ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN DESDE LA CIENCIA DEL SUELO

F. MACÍAS

Laboratorio de Tecnología Ambiental. Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Dpto de Edafología. Fac. Biología. Universidad de Santiago

Abstract. A review of the historical evolution of natural climatic changes has been carried out and comparisons of the natural changes of temperature and CO₂ concentrations along the history with those expected based on IPCC studies on the antropogenic climatic change has been made. A general discussion has been carried out and alternatives of mitigation and adaptations are described, including those in which the use of soils as temporary C sinks are considered.

Resumen. Se realiza una revisión de los datos disponibles sobre la evolución histórica de los cambios climáticos naturales, comparando las variaciones de temperatura y concentración de CO₂ con las previstas por los investigadores del IPCC para el forzamiento climático antropoceno y se discuten y presentan algunas alternativas de mitigación y adaptación estableciendo la posibilidad de utilizar a los suelos como sumideros temporales de C.

INTRODUCCION

En 1957, Charles Keeling, de la Universidad de California, inició una de las series de medidas experimentales que mayor difusión científica, económica y social han alcanzado en los últimos tiempos. Sus determinaciones de la concentración de CO₂ atmosférico en la cima del Mauna Loa (Hawai), seguidas de otras iniciadas años más tarde en las zonas polares, pusieron de manifiesto la existencia de cambios de la concentración de este compuesto, no sólo con las estaciones que influyen en la actividad fotosintética, sino con una clara y continua tendencia creciente del orden de 1 ppm de CO₂/año en un período de unos 20 años (Figs. 1, 2 y 3).

La trascendencia del descubrimiento fue rápidamente intuida por diferentes investigadores. A finales del siglo XIX Arrhenius (1896) ya había establecido la relación existente entre la concentración de determinados gases atmosféricos (como el CO₂, CH₄, H₂O, NOx,...) con el denominado “*efecto invernadero*”, que permite el mantenimiento de las condiciones actuales de la Tierra, con una temperatura más elevada y favorable a los procesos vitales que la que correspondería al sumatorio de su energía interna y la que recibe del Sol y del espacio exterior.

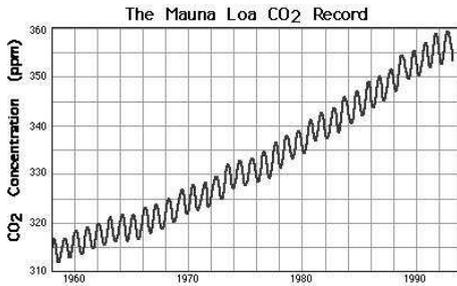


FIGURA 1. Variación estacional durante el período 1960-1990 de la concentración de CO_2 en el observatorio de Mauna Loa (Hawái), según las experiencias iniciadas por Keeling (Allègre, 1990)

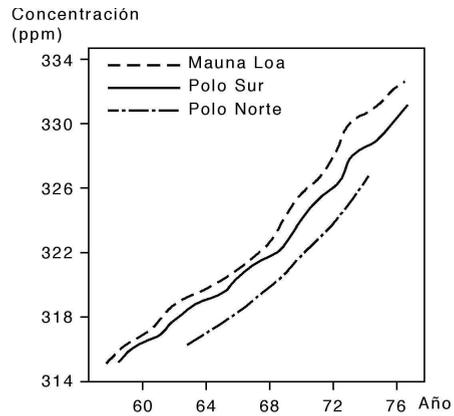


FIGURA 2. Variación de la concentración de CO_2 atmosférico en las primeras medidas realizadas en el Mauna Loa y en las zonas polares (Clark, 1982).

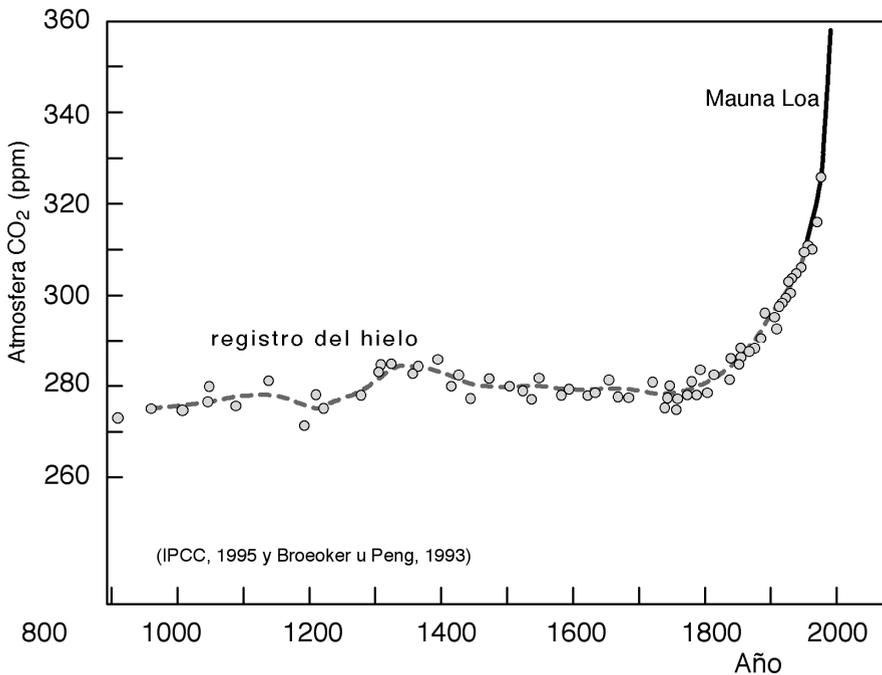


FIGURA 3. Comparación de las medidas en el Mauna Loa y los datos obtenidos en el registro histórico de los hielos polares en los últimos 1000 años (IPCC, 2000)

La diferencia entre una temperatura media del orden de -15 a -18 °C (que sería la de la Tierra si no existiesen los gases de efecto invernadero) a la actual (en torno a los 15 °C) supone el cambio entre un planeta totalmente cubierto de hielo (al menos en toda la superficie terrestre y en gran parte de los océanos, que serían cubiertos por casquetes polares mucho más amplios que los actuales) y el planeta que conocemos, con amplias zonas donde el agua se mantiene líquida y se permite el desarrollo de biomas con una gran diversidad, asociados a las diferencias de la distribución y los cambios de las precipitaciones y las temperaturas. Este efecto hace posible que la Tierra que conocemos no sea un planeta helado, sólo algo menos frío que Marte, pero no llega ser tan intenso como el que existe en Venus, donde en la superficie se superan los 400 °C de temperatura, como consecuencia tanto de su mayor proximidad al Sol como de su mayor concentración de gases de efecto invernadero. Así pues, los datos de Keeling, y otros posteriores que los confirmaron, planteaban un serio problema, pues una simple deducción llevaba a que el incremento de los gases de efecto invernadero produciría irremediablemente un incremento de la retención de la energía reflejada y, por tanto, un cambio climático con un incremento creciente de las temperaturas a no ser que existiesen potentes mecanismos reguladores. Además, el cambio climático sería acelerado por la elevación progresiva de la temperatura, ya que se provocaría la liberación a la atmósfera de gases atrapados en diferentes zonas del planeta, tales como el CO_2 disuelto en las masas de aguas oceánicas frías y profundas, el CH_4 atrapado en sedimentos reductores y en el “*permafrost*” que sería liberado al evaporarse el agua, el CO_2 producido por el incremento de la velocidad de mineralización y metabolismo de sedimentos y suelos ricos en materia orgánica, etc., si bien debe tenerse en cuenta también el efecto fertilizador que tiene el

CO_2 sobre el crecimiento y absorción de CO_2 por las masas forestales. Por otra parte, la progresiva fusión de los hielos de las zonas montañosas y polares disminuiría el porcentaje de energía que se devuelve al espacio exterior por reflexión sobre las superficies blancas y la mayor evaporación de agua contribuiría a incrementar la capa de nubes que frenan la llegada de las radiaciones y, sobre todo, su salida, quedando atrapada una mayor cantidad de energía en la biosfera. El cambio climático en todo el planeta sería global y la posible desaparición de los polos modificaría completamente las corrientes marinas y atmosféricas de las que dependen, en gran medida, las variaciones climáticas.

Este cambio climático global sería una consecuencia de la capacidad transformadora del medio por la especie humana que, en un corto período de tiempo que algunos autores han definido como un nuevo período geológico, el Antropoceno, ha dejado su huella en toda la Tierra. Efectivamente, al margen de toda exageración antropocéntrica, está demostrado que la mayor parte del incremento del CO_2 atmosférico y de otros gases de efecto invernadero que modifican las condiciones de la biosfera es responsabilidad de las sociedades humanas, especialmente desde la “Revolución Industrial”, pero también de todas las sociedades que alcanzaron progresivamente las condiciones propias para el mayor cambio histórico humano, la “Revolución Neolítica”. Así, se han eliminado extensas superficies boscosas, transformado suelos forestales, praderas y desiertos en áreas de uso agrícola intensivo, se ha multiplicado la cabaña ganadera de rumiantes, incrementado la producción de residuos fermentables (sólo en la Europa de los 15 ya se había superado la cifra de producción de más de 1000 millones de Tm de materia orgánica exógena anual en el 2004) almacenándolos en vertederos que producen CH_4 , CO , CO_2 y diferentes compuestos de nitrógeno reducidos o que son incinerados con formación de los

correspondientes gases oxidados y se ha consumido una parte importante de la herencia geológica de combustibles fósiles en la industria, el transporte o la fabricación de cemento. La consecuencia de estas actividades es, entre otras, el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero que llevará consigo, según un gran número de científicos que forma parte del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), un incremento de las temperaturas en el siglo que vivimos, una importante modificación de los patrones climáticos en muchos lugares e importantes pérdidas de biodiversidad y recursos en amplias zonas del planeta.

A pesar de que no pocos científicos disienten en mayor o menor medida de estas últimas opiniones, la lógica aplicación del Principio de Precaución obliga a considerar actuaciones de “*adaptación*” y de “*mitigación*” a los cambios previsibles. Pero eso no puede hacernos olvidar que en el establecimiento de estas medidas deben utilizarse criterios derivados del conocimiento, tanto del ya disponible y comprobado, como de los nuevos avances sobre los factores que influyen en el clima y en los ciclos biogeoquímicos (especialmente en el del C), de modo que las actuaciones se contemplen también a la luz del Principio de Racionalidad Científica y no deriven exclusivamente de intereses económicos y/o ideológicos, cuando no de una manipulación o simplificación, honesta pero excesivamente reduccionista, de los datos reales.

¿CAMBIO CLIMÁTICO O FORZAMIENTO CLIMÁTICO?

Cuando se considera el ciclo del C actual (Fig. 4) sorprende el escaso peso relativo de las actividades humanas frente a las cifras que se atribuyen a los procesos

naturales. Los intercambios naturales entre la biomasa y la atmósfera o entre el suelo y los otros compartimentos son considerablemente mayores. Por otra parte, las cifras de almacenamiento ponen de manifiesto la gran capacidad de sumidero de C que tienen los materiales geológicos, los océanos, los suelos y la biomasa frente al compartimento atmosférico (Tabla 1), a pesar de que el siglo XX ha producido un importante aumento de éste último relacionado con las actividades industriales y el cambio de uso del suelo

Lal y colaboradores (2001) consideran que el problema se debe a que desde 1850 a 1998 la concentración de CO₂ atmosférico ha pasado de 280 ppm (600 x 10⁹ toneladas, 600 Gt de C) a 365 ppm (770 Gt), incrementándose a la velocidad de 0.5 % año⁻¹ o 3.8 Pg año⁻¹. Como principales responsables de este efecto señala la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento (270 ± 30 Gt C) y la deforestación y los cultivos (136 ± 55 Gt C) de las que 78 ± 17 Gt C han salido de los suelos, estimándose en 26 ± 9 Gt C las pérdidas por erosión. Hasta 1970 la responsabilidad en el aporte de C a la atmósfera estaba principalmente relacionada con las actividades agrícolas que superaban a los aportes industriales y a los producidos por el transporte y, aún ahora, Lal (2001) estima que la agricultura representa el 25% de las emisiones; esto significa que los suelos agrícolas han pasado de actuar como *sumideros* (se entiende por sumidero dentro del Protocolo de Kioto “cualquier sistema o proceso que sustrae un gas o gases de la atmósfera”) de C a convertirse en *fuentes* para la atmósfera, debido al mal uso que se está realizando de los recursos edáficos y bióticos.

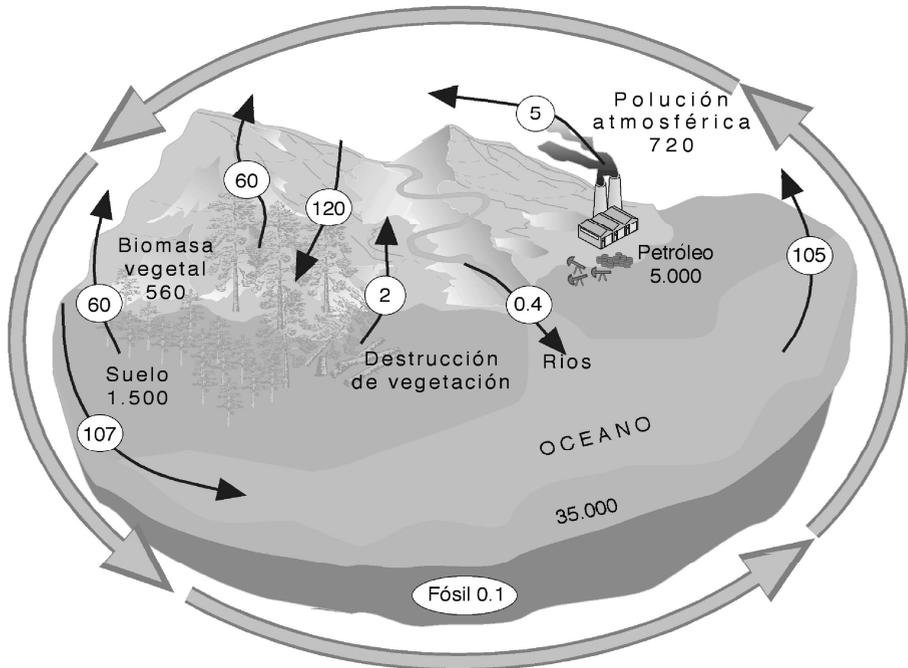


FIGURA 4. Ciclo global del carbono (flujos y sumideros en Gt C = 10^9 t C) (Lal, 2001).

TABLA 1. Estimación de la capacidad de los diferentes reservorios de C terrestre según diferentes autores (datos en Gt = 10^9 t C) (Lal et al., 2001).

Reservorio	C inorgánico	C orgánico	C total
Atmósfera	760		760
Biosfera		560	560
Edafosfera	1.700	1.500	3.200
Hidrosfera	38.000	1.000	39.000
Litosfera	48.000.000	17.000.000	65.000.000

Parece lógico que si conocemos las causas podamos actuar sobre ellas realizando actuaciones que fuercen los intercambios de C con la atmósfera en sentido contrario. Sin embargo, las soluciones no son fáciles y, por otra parte, es necesario conocer con qué amplitud y en qué dirección se han movido

los intercambios de C con la atmósfera en condiciones naturales. Es decir, es necesario recurrir al análisis de los datos históricos sobre la concentración de C en la atmósfera.

El análisis de los conocimientos disponibles nos lleva rápidamente a varias conclusiones importantes:

1.- Los cambios climáticos son la norma en el comportamiento de la Tierra. Aunque parece que los períodos fríos están relacionados con la cantidad de energía radiante que recibimos, la meteorización es el principal proceso controlador de las variaciones climáticas naturales en períodos largos.

Se sabe que se han producido glaciaciones intensísimas que prácticamente han cubierto toda la superficie terrestre (situación conocida como “*Tierra blanca*” o “*Tierra bola de nieve*”) al menos en dos ocasiones en el Proterozoico. Por otra parte, está bien comprobado que los episodios glaciares se han seguido produciendo en períodos, generalmente cortos, pero repetidos a lo largo del tiempo y que, desde el punto de vista del tiempo geológico, nos encontramos saliendo de la última de las glaciaciones Pleistocénicas (Würm), si bien el período de calentamiento parece algo más largo e intenso de lo normal (Allègre, 1990).

Tras cada uno de los períodos fríos, la Tierra ha pasado por fases cálidas, generalmente más duraderas. Algunas, las de las condiciones iniciales del planeta, probablemente con una gran influencia del propio calor interno, hoy muy disminuido, pero que hacía que materiales básicos y ultrabásicos fuesen muy abundantes en la superficie terrestre, estimándose que en el Precámbrico la presencia de estos materiales procedentes del manto eran al menos un 30% superior a la actual y que la formación de rocas volcánicas ultrabásicas (proceso que no se realiza desde hace más de 2000 millones de años) fuese relativamente frecuente como lo demuestra la abundancia de komatiitas en los escudos precámbricos antiguos (Ahrens

& Protas, 1979). Esta situación cambió con el enfriamiento de la corteza terrestre y la consolidación de las placas superficiales a partir de la cual la formación de rocas volcánicas ultrabásicas ya no se produce, por lo que, paulatinamente, la corteza terrestre continental se vuelve más aluminica y ligera, pero menos alterable.

Según cálculos de algunos geoquímicos (Berner et al., 1983) la importancia del calor interno ha disminuido fuertemente y, al menos desde hace 100 millones de años, la relación entre temperatura y concentración de CO₂ atmosférico es similar a la actual. A pesar de esto, se ha pasado por períodos tan cálidos como el Cretácico (para el que el modelo BLAG, propuesto por Berner, Lasaga y Garrels (1983), estimaba una temperatura media de 25 °C y una concentración de CO₂ al menos 30 veces superior a la actual (Fig. 5) a períodos glaciares en los que la temperatura media anual apenas superaría los 5-10 °C y la concentración de CO₂ sería al menos unas 5 veces inferior a la actual (Fig. 5, 6 y 7).

La relación CO₂ atmosférico y temperatura (Berner *et al.*, 1983) está bien establecida y hay constancia de que los períodos cálidos se producen cuando la concentración es elevada, mientras que los fríos presentan bajas concentraciones. En este sentido, los valores mínimos encontrados en los hielos de Vostock para la glaciación würmiense (la más fría de las Pleistocénicas) oscilaron entre 150 y 200 ppm, correspondiendo los valores más bajos a la fase final de la misma producida entre 20.000 y 50.000 años antes del presente (Lorius et al., 1990; Petit, et al., 1999) (Figs. 6 y 7). En cambio, los períodos cálidos presentan concentraciones mucho más elevadas.

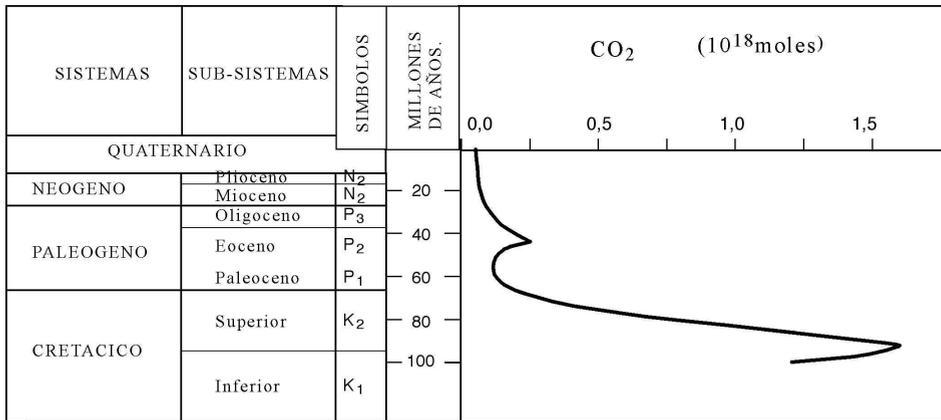


FIGURA 5. Variaciones de la concentración de CO₂ en los últimos 100 millones de años según el modelo Blag (Berner et al.,1983). Los datos del Eoceno corresponden a unas 1000 ppm con una temperatura media del orden de 20-21 °C. Los datos del Cretácico corresponderían a una temperatura media de 25 °C.

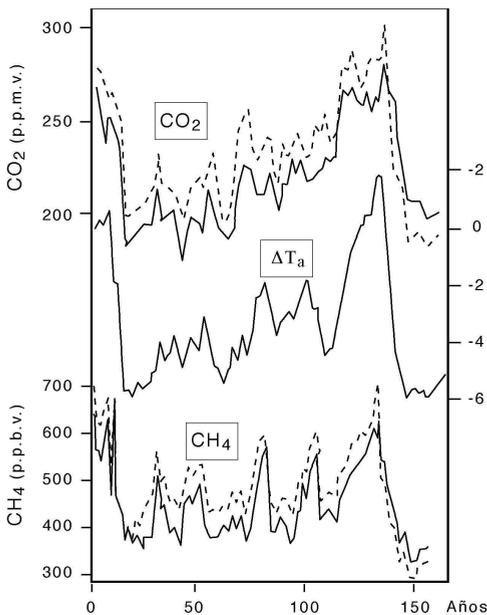


FIGURA 6. Variaciones de la concentración de CO₂ y CH₄ en el aire atrapado en las burbujas del hielo de Vostok durante el Pleniglacial, hace 18000 años (Lorius et al., 1999).

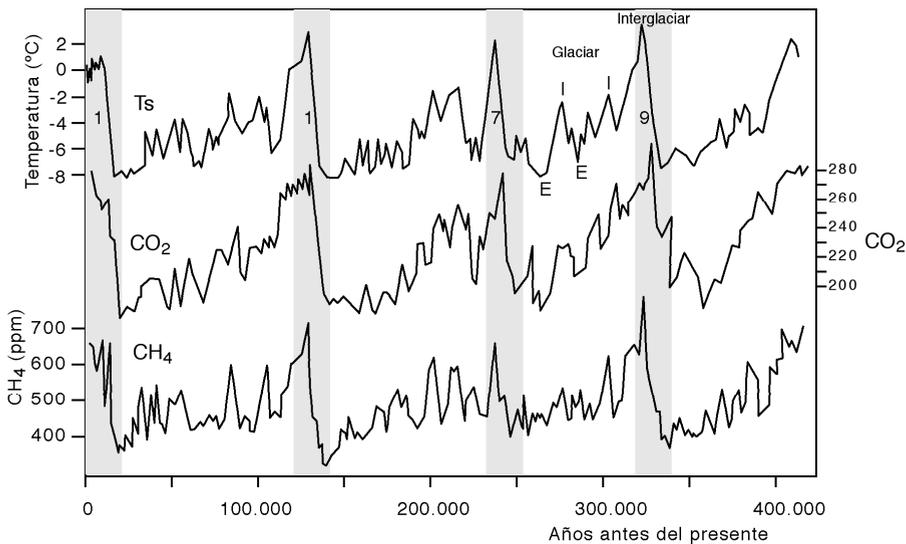
Así, dentro del último período glacial se han encontrado concentraciones más altas, 300 ppm hace 150.000 años, según Lorius 1990, ó más de 280 ppm en cada máximo interglacial, según Petit et al., 1999. Para el Eoceno los datos disponibles indican que era superior a 1.000 ppm, con una temperatura del orden de 20 °C y el modelo Blag (Berner et al., 1983) estima más de 2.000 ppm para el Cretácico (Fig. 5) mientras que en los últimos 60 millones de años los datos obtenidos por procedimientos isotópicos indican que los valores superaron las 1.500 ppm en diferentes ocasiones (Zachos et al., 2003).

Parece que está claro lo que ocurre con la relación CO₂ atmosférico-temperatura pero no cuál de los dos parámetros es el desencadenante. ¿Aumenta el CO₂ atmosférico porque sube la temperatura o aumenta la temperatura porque sube el CO₂?, ¿o es un sistema de doble dirección en la que los cambios de un parámetro se manifiestan de forma directa e inmediata en los cambios del otro?. Parece lógico que si sube la temperatura (p.e: porque la tierra, por su posición en el espacio, recibe más radiación solar o hay más calor interno que se libera)

esto implica la liberación de CO_2 disuelto en los océanos al elevarse su temperatura y del CO_2 atrapado en los suelos hidromorfos y fríos al incrementarse la velocidad de mineralización y su temperatura. Es decir, un cambio de temperatura al alza supone, al menos en principio, un incremento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero. Por lo mismo, un descenso de la temperatura (p.e. por un exceso de partículas volcánicas en el aire o por una menor

radiación recibida o por un incremento de la continentalidad con mayor acumulación de nieve asociada a los períodos de Pangea) debe suponer la situación contraria.

Sin embargo, cuando es el CO_2 el que varía la situación es algo diferente pues el ciclo del C es de mayor complejidad e intervienen en él muchos factores geológicos, edáficos, hidrológicos, etc, además de la temperatura.



(Petit et al, 1999)

FIGURA 7. Cambios de la concentración de CO_2 y CH_4 durante los últimos 400.000 años con episodios glaciares e interglaciares alternado aproximadamente cada 200.000 años (Petit et al., 1999)

En el ciclo geoquímico del C intervienen procesos internos y externos muy complejos. Un incremento de la concentración de CO_2 origina un efecto de fertilización de la biomasa con el consiguiente incremento de C biomasa y C edáfico, y un descenso del pH del agua de lluvia y ambos procesos provocan un incremento de la velocidad de alteración de los materiales. Este aumento llevaría más C (en forma de HCO_3^- y materia orgánica

sedimentaria) al mar y de ahí puede acumularse más C en forma de sedimentos organógenos y carbonatos sedimentarios en los sedimentos profundos que pueden, por subsidencia, ser incorporados a la astenosfera o al manto. Estos mecanismos reducen la concentración de CO_2 atmosférico, especialmente si la cantidad de material alterable en la corteza terrestre es muy elevada, como ha sucedido en diferentes períodos en los que la existencia de grandes emisiones de rocas

basálticas producía un enfriamiento (al menos una de las dos situaciones de “bola de nieve” se atribuye a las grandes emisiones de basalto producidas durante la rotura del supercontinente conocido como Rodinia al final del Proterozoico). Esta situación y todas las modelizaciones geoquímicas de los

tiempos pasados conducen a la conclusión de que la concentración de CO₂, al menos a largo plazo, está controlada por la meteorización y no por los cambios en la radiación recibida por el planeta (Fig. 8; Zachos et al, 2003).

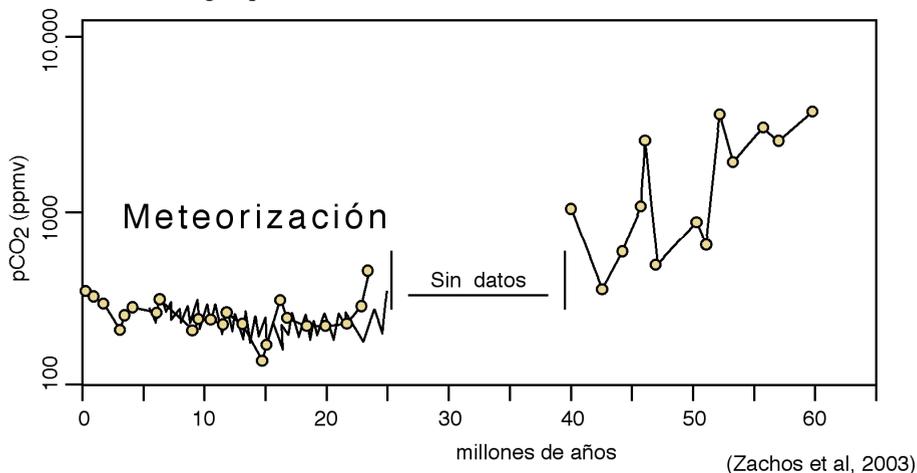


FIGURA 8.- Variación de la concentración de CO₂ en los últimos millones de años (según Zachos et al., 2003).

Dicho de otra manera, los desequilibrios puntuales producidos por las variaciones de la temperatura son corregidos a largo plazo por el sistema amortiguador de la meteorización, que es el que controla la temperatura terrestre en ciclos largos mediante el equilibrio biogeoquímico cuyo funcionamiento para los últimos millones de años ha sido definido por Schlesinger (1997) por la reacción:

Pirita + carbonatos = yeso + materia orgánica

Esta ecuación también nos plantea algo significativo para el control del C atmosférico que es la posibilidad de acumulación de materia orgánica en determinados lugares, como los suelos o los sedimentos lacustres o marinos. Siempre que

se producen periodos cálidos, se produce un incremento de la formación y acumulación de C (Carbonífero, Cretácico, Mioceno,..) en determinados emplazamientos que presentan las características Eh-pH adecuadas. Es bien conocido que la materia orgánica es termodinámicamente inestable en condiciones superficiales oxidantes, pero puede mantenerse en forma metaestable de forma duradera en ambientes pantanosos, lacustres o marinos de condiciones reductoras (Chesworth, 2002) en los que puede acumularse dando origen a formaciones de turba, leonarditas, lignitos,... que secuestran C y lo acumulan en yacimientos organógenos sedimentarios donde tienen tiempos de residencia superiores a las decenas de millones de años. Luego, períodos cálidos tienen como respuesta de la naturaleza la

acumulación de C en lugares adecuados como las depresiones sedimentarias continentales o marinas. Sin duda estos procesos están favorecidos por la existencia de pluviometrías elevadas (asociadas a las altas temperaturas) lo que conduce a una intensa meteorización y, también, a un incremento de la biomasa y de la evolución edáfica con fijación de C en biomasa y suelo en función de la actividad fotosintética y de la capacidad productiva del sistema. Un ejemplo de esto lo tenemos en la próxima depresión de As Pontes, donde en un período comprendido entre hace 30 millones de años y 19 millones de años (el período cálido entre el Oligoceno y el inicio del Mioceno) se han formado grandes depósitos de lignitos (explotados a un ritmo superior a las 12 millones de t/año desde 1979 hasta la actualidad) en medios pantanosos con suelos de tipo Gleysol, en los que la vegetación hidrófila (Typha, juncos,...) favorecía la acumulación de C en la biomasa y necromasa y de siderita en la zona de enraizamiento con fuerte liberación del CO₂ de la respiración radicular (Fotos 1 y 2). Luego, meteorización, edafogénesis acelerada o en biotaxia, formación de depósitos de C son, entre otros, procesos que influyen en el ciclo de C y constituyen algunos de los sistemas reguladores. A pesar de ello, los sistemas de suelos reductores no son los únicos que intervienen pues existen mecanismos de estabilización inorgánicos por los que el C de los suelos oxidados puede aumentar su tiempo de residencia en forma metaestable. Es el caso de los procesos de carbonización por quemas o incendios, que conduce a la formación de formas recalcitrantes (Almendros, et al., 1988), pero también de los enlaces de la materia orgánica con iones metálicos y superficies reactivas de óxidos e hidróxidos de Fe y Al o aluminosilicatos de bajo grado de orden como sucede en muchos

suelos como los Humox de la mata atlántica brasileña, los Andosoles de zonas húmedas, los Umbrisoles aluminicos de Galicia, los Chernozem de las estepas,... donde se demuestra que las interacciones con los elementos Fe, Al y Ca producen un claro incremento de la capacidad de acumulación de C y del tiempo de residencia de la materia orgánica en los suelos. Así, en suelos de Galicia se han realizado determinaciones de la edad de la materia orgánica que han dado resultados de 1070 años en horizontes Ah de Andosoles sobre anfibolitas, 2600 años en horizontes Ah2 de Andosoles sobre gabros, 1090 años en el horizonte Bh de un Podsol sobre materiales cuarzosos o 4900 años en el horizonte A3 de un perfil policíclico (Ranker Ah3 atlántico) sobre granitos (Macías, et al., 2001). Datos similares han sido encontrados por Martínez Cortizas en suelos y paleosuelos con edades entre 550 y 8000 años para horizontes próximos a la superficie y de entre 30000 y 45000 años para algunos paleosuelos enterrados en depósitos coluviales (Martínez Cortizas, 2004). Lo mismo sucede en otros suelos como los Latossoles húmicos (antiguos Humox de la Soil Taxonomy) de Brasil donde se han realizado dataciones de la materia orgánica con edades de entre 2100 y 5330 para horizontes A y entre 4150 y 40380 años para horizontes AB en suelos de Minas Gerais, (Silva y Vidal-Torrado, 1999).

Otros factores, como la relación entre la superficie de corteza terrestre continental y de corteza litoral, la importancia del volcanismo y de los procesos orogénicos, el metamorfismo o la velocidad de movimiento de las placas en los movimientos de distensión influyen también en el ciclo del C y, por tanto, en la concentración de CO₂ atmosférico desplazándolo en uno u otro sentido.



FOTO 1.- Secuencia de paleohistosoiles y paleogleisoles oligoceno-miocénicos en la cuenca de As Pontes. Los horizontes superficiales, ricos en materia orgánica se transformaron en lignitos. Los horizontes subsuperficiales, minerales, contienen siderita formada en torno a las raíces de plantas acuáticas como la Typha.

El problema ante un incremento no natural de la concentración de CO_2 es saber a qué velocidad funcionan los mecanismos de amortiguación y cuál es su capacidad para amortiguar en un plazo corto el desequilibrio causado por las emisiones antrópicas. Por medidas isotópicas sabemos que gran parte del excedente de C atmosférico es de origen antrópico, pero hay otro dato, mucho menos aireado pero conocido con la misma precisión científica, y es el de que los modelos iniciales preveían un calentamiento mucho más intenso y rápido y que todas las medidas realizadas en los últimos 10 años ponen de manifiesto la existencia de un sumidero no modelizado, y de origen y funcionamiento no totalmente conocido, que está actuando con una importante capacidad de secuestro de C de la atmósfera estimado en cifras en torno a las 2 Gt C/año (Robert, et al., 2001). Schindler (1999) denomina a este sumidero desconocido “*the missing C sink*” y lo evalúa en alrededor de 1.8 a 2 Pg C año⁻¹ que se acumulan en ecosistemas terrestres, y alrededor de 2.5 Pg C año⁻¹ que lo hacen en los océanos (¿incremento de la actividad del fitoplancton?, ¿fijación en suelos?). El sumidero terrestre está principalmente



FOTO 2.- Detalle de la secuencia de paleosuelos con los horizontes orgánicos convertidos en lignitos y los minerales con elevada presencia de nódulos y segregaciones de siderita en la mina de As Pontes

situado en la zona norte del hemisferio norte, y probablemente está relacionado con la acumulación de C en biomasa y en suelos.

2.- Los cambios climáticos previsible actualmente no son mayores que los que se han producido en ausencia de actividades humanas. Lo que nos sorprende es la rapidez del proceso de acumulación atmosférica de gases de efecto invernadero y, sobre todo, que es la primera vez que una especie ha producido un forzamiento climático y está sometido a sus consecuencias.

La aparición del hombre, y más concretamente, la del hombre industrial, ha podido alterar la alternancia de condiciones climáticas por el incremento brutal de las emisiones a la atmósfera de una gran parte del Carbono que la tierra había almacenado en forma sólida a lo largo de su historia. Esto

ha sido reconocido por el IPCC que afirma que los seres humanos estamos alterando la tasa natural de intercambio de carbono entre la atmósfera y la biosfera mediante el uso de la tierra, el cambio de uso y las actividades silvícolas (IPCC, 2000). Otros investigadores, como el geoquímico Allègre (1990), no lo asegura tan taxativamente, sino que lo plantean como una hipótesis y un interrogante, al afirmar que las sociedades actuales se encuentran inmersas en un período interglaciar natural cuya duración, y quizás intensidad, parece superior a la normal a lo largo del Cuaternario, responsabilizando de este posible “*forzamiento climático*” a las actuaciones antrópicas liberadoras de gases de efecto invernadero. En todo caso, los cambios en el pasado, como hemos visto por las Figuras 1 a 7, han sido más intensos que lo que predicen los modelos de evaluación de los cambios climáticos utilizados por el IPCC) tanto para la temperatura media del planeta como para la concentración atmosférica de CO₂.

Por ello, cabe pensar de acuerdo con un gran número de investigadores (Lal, Smith, Schindler, ...) que un regreso a las condiciones propias de los sistemas naturales, e incluso un forzamiento antrópico de la capacidad de sumidero de los sistemas terrestres, favoreciendo las reacciones que conducen a un incremento del C fijado en la biomasa y que pasa a la necromasa, de las formas de C recalcitrantes o metaestabilizadas en condiciones oxidadas, de la formación de turbas en las reducidas, y, sobre todo, las actuaciones de conservación del suelo contra la erosión, favoreciendo la biostaxia, pueden mitigar el problema del forzamiento climático, al menos durante algunos años como señala el manifiesto de la SSSA. Esto es, en parte reconocido en el artículo 3 del Protocolo de Kyoto, donde se admite que es posible reducir las emisiones netas de C a la atmósfera, a través del incremento de la capacidad de sumidero de otros sistemas, como la biomasa y el suelo.

POSIBLES ACTUACIONES DE MITIGACION Y ADAPTACION AL FORZAMIENTO CLIMÁTICO ANTROPOCENO

Ante la situación de incremento de C atmosférico provocado por el hombre es preciso realizar actuaciones que la mitiguen, simplemente por responsabilidad, pero también por precaución o disminución de los daños. Las primeras, pasan por una intervención directa en los dos términos clave del ciclo del C, es decir, las “fuentes” y los “sumideros”.

Actuaciones sobre las “fuentes”.
Reducción o al menos ralentización de las emisiones. - Esta es la principal medida adoptada por los firmantes del Protocolo de Kyoto y la que parece más lógica y directa por cuanto castiga a los principales responsables del problema y es la más efectiva por la reducción que implica del flujo hacia la atmósfera. Sin embargo, la energía la utilizamos todos y reducir emisiones requiere un importante cambio del sistema tecnológico-energético y/o de las demandas de la población. Efectivamente, la mayor producción de energía de las sociedades actuales se basa en el consumo de grandes cantidades de combustibles fósiles en las actividades industriales, agrícolas y en el transporte, pero también en la mejora de la calidad de vida y condiciones de los hogares. Si a esto añadimos que la demanda es creciente, no sólo en los países industrializados sino en todas las poblaciones y especialmente en las denominadas economías emergentes, cabe pensar que el objetivo es difícilmente alcanzable con la tendencia de crecimiento de la población humana. Si esto es así, el mantenimiento de los recursos de los países de economía avanzada sólo puede basarse en el mantenimiento de la pobreza en la mayor parte de la población o bien en un cambio tecnológico lo suficientemente importante que permita escapar otra vez a las predicciones malthusianas, es decir el agotamiento de los recursos ante las

diferencias de crecimiento entre éstos y la población. Propuestas, como el control de la población, van unidas a otras que pretenden un cambio tecnológico en el aprovisionamiento de energía. Así, el incremento y generalización de la producción energética nuclear tienen sus partidarios, pero también sus detractores. El incremento de las renovables es más fácilmente admisible, pero plantea dudas acerca de su capacidad para superar determinados porcentajes de la demanda global. Otras, como la energía de fusión, prevista hace 30 años para el inicio de este siglo, parecen muy lejanas. Esto significa que la reducción, al menos en los principales emisores y actividades es obligada, pero hay dudas de que sea suficiente y que se puedan superar los conflictos que pueden originarse entre países emergentes y países de economía avanzada y, también, aunque en menor medida, en las economías de éstos últimos. A pesar de ello, todo lo que pueda hacerse en la mitigación de las “fuentes” de emisión de las actividades industriales, la agricultura y el transporte, mediante el ahorro y el cambio tecnológico, es obligado y a ello responden las exigencias fundamentales del Protocolo de Kyoto.

Actuaciones sobre los sumideros. El papel del secuestro de C en bosques y suelos. - El acuerdo de Kyoto es claro en el papel de las “fuentes” pero no en el de los “sumideros” a los que todas las redacciones iniciales negaban y que sólo se han ido incorporando paulatinamente por la presión económica de algunos países y por la divulgación de los conocimientos científicos en este campo. Esto resulta extraño si se considera que la cantidad total del C de la Tierra es constante y que la tonelada de C retenida fuera de la atmósfera tiene el mismo efecto para la atmósfera (mientras esté retenida) que la tonelada que no se ha emitido. Se ha argumentado que los sumideros eran lentos, inestables y de escasa capacidad, pero los datos de los trabajos de

multitud de investigadores han demostrado que esto no es siempre exacto y que sí pueden tener significado, si no como solución al problema al menos como retraso de los efectos negativos del cambio climático o incremento del tiempo para encontrar nuevas tecnologías adaptadas a las nuevas realidades. Es decir, según muchos científicos, la utilización de los sumideros permitiría hacer el cambio tecnológico menos rápidamente y, por tanto, con menor impacto sobre las economías y sociedades actuales. Esta es la línea defendida desde hace más de una década por autores norteamericanos, como Lal y colaboradores (1995-2001) que consideran que deben hacerse esfuerzos en la reducción de emisiones y, también, en el incremento de los sumideros. De esta forma, de las redacciones iniciales de Kyoto se ha pasado a la redacción final del Protocolo en el que se reconoce que los sumideros de carbono pueden suponer una ayuda importante a la hora de hacer que los compromisos de reducción acordados para cada Parte no sean tan difíciles de cumplir. Los artículos que hacen referencia a los sumideros son:

El artículo 3.3 se refiere a las actividades LULUCF (uso de la tierra, cambio de uso y silvicultura) que generan cantidades que se pueden sumar o restar a la cantidad asignada. Estas se reducen a forestación, reforestación y deforestación. Se establece que *“las variaciones netas de las emisiones por las fuentes y la absorción por los sumideros de gases de efecto invernadero que se deban a la actividad humana directamente relacionada con el cambio de uso de la tierra y la silvicultura, limitada a la forestación, reforestación y deforestación desde 1990, calculadas como variaciones verificables del carbono almacenado en cada periodo de compromiso, serán utilizadas a los efectos de cumplir los compromisos de cada Parte incluida en el Anexo I dimanantes del presente artículo. Se informará de las emisiones por las fuentes y la absorción por*

los sumideros de gases de efecto invernadero que guarden relación con esas actividades de una manera transparente y verificable y se las examinará de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 8.

Sin embargo, a pesar de reconocer la importancia de los sumideros, especialmente de los bosques, en el secuestro de C, sólo se cuentan en el primer período de compromiso las superficies con actuaciones de reforestación y aforestación desde el 1 de enero de 1990 siendo en el último caso necesario que no estuviesen forestadas durante los 50 años anteriores (IFN2/1990 – IFN1/1970). Esta medida, sin duda totalmente artificial y sin ningún motivo científico que la justifique, ha sido ampliamente criticada (ver entre otros el informe de la Academia de Ciencias de Francia, 2000) porque supone de hecho un premio a los países que hace tiempo que han deforestado su territorio y un castigo a los que los han conservado. Además, niega la clara evidencia de que los bosques de más de 15-20 años en los que no se hayan realizado actividades de mejora de origen antrópico tienen capacidad fijadora y siguen actuando como sumideros de C. Además, al reducir la contabilidad de la fijación al sumidero por forestación posterior a 1990, incita a cortar los bosques anteriores a dicha fecha por considerarlos inútiles como fijadores; si bien esta actuación también es penalizada pues se considera que el C de toda la madera cortada debe contabilizarse como emisión. En síntesis, la paradoja es que los países que no han cortado sus bosques en el siglo XX antes de 1990 son obligados a no contabilizar el secuestro que producen, a no ser como gestión forestal, actividad que está contingentada, y a contabilizar la deforestación producida por las talas posteriores a dicha fecha; por el contrario, los que lo hicieron en la primera mitad del siglo o antes pueden forestar y el C retenido en las nuevas plantaciones es contabilizado.

El artículo 3.4 se refiere a actividades adicionales a las anteriores que se pueden contabilizar. Durante el primer período de compromiso las actividades adicionales admitidas son: *gestión agrícola, gestión forestal, gestión de pastizales y revegetación*. Los límites establecidos para gestión forestal se reflejan en la tabla de la decisión 11/CP.7 (documento FCCC/CP/2001/13/Add.1) y están individualizados, según el acuerdo de Marrakech (2001), estando limitada la cifra a reducir por España a un máximo de 0,67 millones de t CO₂ (cantidad muy inferior a la que se puede obtener sólo en Galicia por este concepto con una gestión sólo ligeramente mejorada). En el resto de las actividades adicionales, la contabilización es “neto-neto”, es decir, no hay límite, pero no se tienen en cuenta las actividades realizadas en este campo antes del 1 de enero de 1990. De nuevo, resulta difícil de entender la limitación de la contabilización por los sumideros producidos por las mejoras en la gestión forestal. El que haya una cantidad máxima contabilizable para cada país por el manejo de los sistemas forestales no parece lógico en una situación grave de forzamiento climático. Todo lo contrario, si la situación es grave deberíamos poner todos los mecanismos posibles de lucha en marcha y si los bosques son los elementos de mayor capacidad y rapidez de actuación habrá que hacerlo, incentivando al máximo el secuestro de C por este sumidero.

Si hay limitaciones de Kyoto para los sumideros forestales, muchos más los hay para el secuestro en suelos a los que se reduce su contabilidad a las actuaciones no forestales del artículo 3.4 y con importantes limitaciones de aplicación. Todo ello, a pesar de que los datos dicen que el sumidero edáfico es de mayor capacidad que el atmosférico (ver Tabla 1) y de que es bien conocido que los suelos actuales de los países avanzados (a los que se dirige fundamentalmente el Protocolo) han perdido, por sus actividades agrícolas, forestales y

urbanas, más del 30-40 % del C original (en los países mediterráneos puede alcanzar hasta el 80-90 %) y que este C es recuperable en plazos cortos (10-50 años según las disponibilidades hídricas) por un cambio en las actuaciones sobre el suelo que limite la erosión y favorezca la formación del suelo (1 cm de suelo de los horizontes superficiales de Galicia contiene entre 5 y 8 t C/ha (Macías y Camps Arbostain, 2002), mientras que en el País Vasco esta cifra se reduce a 3-4 (IHOBE, 2005) y, en el resto de la España seca puede oscilar entre 1 y 4 t C/ha). Estas cifras parecen pequeñas, pero basta multiplicarlas por la superficie para que se pueda evaluar la importancia de la realización de un **Plan de Conservación y Regeneración de Suelos** que limite la erosión, acelere la formación de suelos e incremente la entrada de C en el suelo a través de una incentivación de nuevas formas de lo que podríamos denominar como *Agriculturas y Silviculturas del C*, algunas de cuyas alternativas de actuación han sido recogidas por Lal y colaboradores (2001)

Se puede hacer mucho más si gestionamos mejor los residuos ricos en materia orgánica. Gran parte de los residuos orgánicos (no tóxicos) los llevamos a vertederos para que se forme y libere metano (gas de efecto invernadero muy superior al del CO₂), los incineramos con producción de CO₂ o incluso los compostamos (con una liberación de C del orden del 40-50% durante el compostaje y del 90-100% al cabo de 2-3 años). Sin embargo, pueden estabilizarse, con garantía sanitaria, por mecanismos similares a los que existen en algunos suelos (como los Histosoles, Terras pretas, Humox, Andosoles, Chernozems,...) incrementando tanto la cantidad de C de los suelos como su estabilidad y permanencia, al tiempo que se ayuda a resolver el problema de los residuos, suelos como los Humox de la mata atlántica

brasileña, los Andosoles de zonas húmedas, los Umbrisoles aluminicos de Galicia, los productividades y la actividad y diversidad biológica.

Organismos como la FAO han reconocido el papel substancial del potencial de los suelos agrícolas, forestales y de praderas para fijar carbono concluyendo que el secuestro de C en suelos (especialmente en sistemas forestales) produce un importante efecto sumidero y tiene, además, otros muchos efectos positivos ambientales que han llevado a Robert (2001) a concluir que fijar C en suelos es una “*estrategia win-win*”. Más recientemente, la Unión Europea ha reconocido la importancia del suelo como sumidero de C al incluir a la materia orgánica dentro de los mandatos específicos para los grupos de trabajo surgidos para el desarrollo de “*Estrategia de Protección del Suelo*” (Van Camp et al., 2004) y afirmar que, según recientes estimaciones, el potencial de secuestro de carbono en los suelos agrícolas puede suponer el 20% del total de la reducción requerida en la UE durante el primer período del Convenio de Kioto (8% de reducción previsto entre el 2008 y el 2012 desde la base de 1990). También ha sido reconocido teóricamente por los acuerdos de Bohn (2001) y Marrakech (2001), e incluso por el IPCC (2003), pero su aplicación en la contabilidad del Protocolo está impedida, o al menos dificultada, sin que puedan entenderse los motivos por los que no se ponen en marcha todos los mecanismos de secuestro existentes que no tengan consecuencias negativas para el sostenimiento de su capacidad y diversidad. Si el problema es grave, parece lógico activar todos los resortes, incluso aquellos que parecen pequeños, no vaya a ser que “*no hagamos nada porque pensamos que podemos hacer poco*”.

TABLA 2. Prácticas recomendadas para el secuestro de C (Lal, 2001).

Práctica	Tasa potencial de secuestro de C (t ha ⁻¹ año ⁻¹)
Laboreo de conservación	0.1-0.5
Compost y abonos orgánicos	0.05-0.5
Eliminación del barbecho de verano	0.05-0.4
Cosechas protectoras de invierno	0.2-0.5
Agricultura de precisión	0.1-0.4
Mejora de variedades y sistemas de cultivo	0.05-0.4
Conservación del agua y gestión de acuíferos	0.05-0.3
Mejora en el manejo del pasto	0.05-0.3
Aforestación / Reforestación	0.08-0.4
Uso de fertilizantes en suelos forestales	0.8-3.0
Restauración de suelos de mina y otros suelos degradados	0.3-1

Al contrario, se necesitan incentivos y planes para la adopción de prácticas técnicas sólidas y con beneficios económicos para los propietarios de los suelos que fijen C (como sucede en USA) pues sólo así se implicarán en el objetivo de reducción. Además, el desarrollo de estos nuevos sistemas o prácticas de cultivo deben estar imperativamente ligados a otros beneficios ambientales, como la protección del suelo y la biodiversidad, la lucha contra la desertificación o el incremento de la eficiencia en la gestión de residuos, entre otros. Esto puede impedir que la conocida sentencia de Chateaubriand “*los bosques preceden a los pueblos, los desiertos los siguen*” se invierta, con el consiguiente efecto sobre la conservación y mejora de las funciones ambientales y productivas del suelo en la línea de los objetivos de la

Estrategia Europea de Protección del Suelo (2002).

Otras actuaciones sobre los sumideros.

Otros procesos de secuestro del C han sido postulados por diferentes países e investigadores. Así, se han considerado entre otras las siguientes actuaciones:

a) Incremento de la fijación en la biomasa mediante aumento de las zonas húmedas y, dentro de ellas, de algunos sistemas controlados eutrofizados; fertilizar con CO₂ cultivos forzados de plantas superiores y algas, aumentar la producción de biomasa mediante el incremento del cultivo de plantas C4 de mayor eficiencia fotosintética, incrementar la superficie de cultivos forestales fertilizados,... pero, en último término, toda actuación sobre la biomasa requiere de una estabilización

posterior en los suelos, si bien las que se usen con fines energéticos en sustitución de combustibles fósiles suponen un descenso y una mejora respecto a la situación actual. (Ver Camps Arbestain y Pinto en este número)

b) Fijar C en el medio acuático mediante disolución del CO₂ industrial en capas de agua profundas y frías.

c) Secuestrar C en formaciones carbonatadas biogénicas (moluscos, algas calcáreas, corales,...) cultivadas. Un ejemplo sería el cultivo de mejillón y berberecho de Galicia.

d) Fijar en el medio terrestre mediante la conversión del CO₂ en CaCO₃ mediante procesos catalizados por algas fijadoras o por reacción en medio alcalino.

e) Almacenar CO₂ en sistemas geológicos confinados como pozos petrolíferos o de gas explotados, depósitos salinos, etc.

Todas ellas, además de las restantes medidas de secuestro, deben ser alternativas a estudiar y a utilizar si se demuestra la posibilidad tecnológica, ambiental y económica de ponerlas en marcha.

Actuaciones de adaptación. Si las modelizaciones realizadas por el IPCC son correctas las medidas de secuestro pueden mitigar o retrasar, en ningún caso evitar, el incremento de temperaturas. Por ello, además de adoptar todas las medidas de reducción de emisiones, avances tecnológicos y secuestro en sumideros deben adoptarse medidas de adaptación a los cambios derivados que reduzcan las pérdidas de biodiversidad, protejan los ecosistemas productores de alimentos y fibras, mitiguen la extensión de la desertización y erosión y reduzcan el impacto sobre los sistemas litorales y sus recursos. En este sentido, los avances de la investigación científica y la monitorización continua y atenta de los cambios de los diferentes biomas deben contribuir a lograr estos objetivos.

CONCLUSIONES

Las actuaciones humanas son claramente responsables de cambios en los sistemas de uso del suelo y de utilización de los combustibles fósiles que han incrementado la concentración de gases de efecto invernadero atmosféricos que no han sido inmediatamente controlados por los sumideros naturales. La reducción de emisiones, mediante avances tecnológicos, medidas de ahorro y cambios en las pautas de actuación socioeconómicas, son obligadas; pero eso no significa que deba renunciarse a las actuaciones sobre los sumideros, que por medio de su capacidad de mitigación y retraso de los efectos negativos y por las mejoras ambientales que producen, justifican sobradamente su uso como secuestradores de C.

REFERENCIAS

- Academie des Sciences (2000). Conséquences scientifiques, juridiques et économiques du Protocole de Kyoto. Rapport 45. Institut de France. TEC&DOC. Paris.
- Ahrens, L.H.; Protas, G. (1979). Origin and distribution of the elements. Pergamon Press.
- Allègre, C. (1990). Economiser la planète. Fayard.
- Almendros G., Martin F.J., González-Vila F.J. (1988). Effects of fire on humic and lipid fractions in a Dystric Xerochrept in Spain. *Geoderma* 42, 115–127.
- Arrouays D., Pelissier, P. (1994). Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant Soil* 160, 215-223.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53, 215-220.

- Batjes, N.H. (1999). Management options for reducing CO₂ - concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. ISRIC. Wageningen, The Netherlands. 114 pp.
- Berner, R.A.; Lasaga, A.; Garrels, R.M. (1983). The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *Am J. Sci.*, 283, 641-683.
- Ciais P., Tans P.P., Trolier M., White J.W.C., Francey R.J. (1995). A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the 13C/12C ratio of atmospheric CO₂. *Science* 269, 1098-1102.
- Clarck, W.C. (1982). Carbon dioxide review, Claredon Press.
- Eswaran, H. et al (1995).- Global soil carbon resources. En R. Lal et al (Eds.): *Soils and Global Change*. CRC Press. Boca Raton, FL, 27-44.
- IHOBE. (2005). Inventario de carbono orgánico en suelos y biomasa de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Serie Programa Marco Ambiental. 48:1-8.
http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-11293/es/contenidos/inventario/carbono_organico/es_pub/adjuntos/carbono_organico.pdf
- IPCC (2000). Land use, land-use change, and forestry. Special report. Cambridge University Press. 377 pp
- IPCC (2003). Guía de Buenas Prácticas para las actividades de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.htm>
- Kimble, J.M.; Lal, R.; Follet, R.F. (2002). *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil*. Lewis Publishers.
- Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds), 1995. *Soils and Global Change*. CRC/ Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Lal, R., Bruce, J.P (1999). The potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. Ann Arbor Press. Chelsea, MI.
- Lal, R. (2000). World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.*, 71: 145-191.
- Lal, R. (2001). Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect. SSSA Special Publication Number 57.
- Lorius, C.; Jouzel, J., Raynaud, D., Hansen, J., Le Trent, H. (1990). The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, 347, 139-1145.
- Macías, F. (1991). Aspectos ambientales de la energía. En: *"El mercado energético Europeo: previsión de las alternativas para los años 90"* (ISBN: 84-87014-50-X). Colegio Oficial de Ingenieros de Minas del N.O. de España, Oviedo. 65-82.
- Macías, F.; Calvo, R.; Arce, F.; Bulnes, C.; López, R. (2001). Los suelos como sumideros de Carbono: Materia orgánica de los suelos de Galicia. En: *XXII Reunión Nacional de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo*. Ed. R. Calvo de Anta y F. Macías. 118-122.
- Macías, F.; Camps Arbestain, M. (2002). Suelo y Cambio climático: Capacidad de Fijación de Carbono en sistemas edáficos. En: *Seminario Europeo sobre Protección del Suelo y desarrollo Sostenible*. Instituto Geológico y Minero de España. Soria. (en prensa).
- Martínez Cortizas, A. 2004. Datos no publicados de dataciones de suelos y paleosuelos de Galicia. Comunicación personal.
- Robert, M (2001) Soil carbon sequestration for improved land management ;world soil resources reports 96 FAO, 57 p.
- Ruimy A., Dedieu G. and Saugier B. (1996). TURC: A diagnostic model of

- continental gross primary productivity and net primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles* 10: 269-285.
- Schlesinger, W.H. (1997).- *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press, San Diego, CA.
- Schindler, D.W. (1999). The mysterious missing sink. *Nature*, 398:105-107.
- Schmidt, M.W.I., J.O. Skjemstad, C. Jäger. 2002. Carbon isotope geochemistry and nanomorphology of soil black carbon: black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. *Global Biogeochemistry Cycles*. 16: 1123.
- Silva, A.C. Vidal-Torrado, P.(1999) Gênese dos Latossolos Húmicos e sua relação com a evolução da paisagem numa área cratônica do Sul de Minas Gerais. *Rev. Brasileira de Ciência do Solo*, 23:329-341.
- Smith, P. (2004). Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. *Soil Use and Management*, 20:264-270.
- Tebruegge, F. (2000). No-tillage visions – protection of soil, water and climate. Institute for Agricultural Engineering, Justus-Liebig University, Giessen, Germany.
- Van-Camp. L.; Bujarrabal, B.; Gentile, A.R.; Jones, R.J.A.; Montanarella, L.; Olazabal, C.; Selvaradjou, S.K. (2004). Reports of the Technical Working Group Established under the Thematic Strategy of Soil Protection. EUR 21319 EN/3. Vol. III. Organic Matter, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.