

MESA 5

Científica

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS SUELOS*

Diego de la Rosa
Instituto de recursos naturales y Agrobiología de Sevilla
Consejo superior de investigaciones científicas

Con este tamaño. Primer párrafo con sangría de 1cm. Referencias al final, a tamaño 7 con este mismo tipo de letra.

1. Introducción

El *cambio climático acelerado* está dando lugar a un abanico de impactos, efectos directos e indirectos, que se ven acentuados por la interacción con otros factores del *cambio global* (De la Rosa, 2008). En los sucesivos informes del IPCC (1990, 1996, 2001, 2007) se viene desarrollando una evaluación sistemática de los impactos del cambio climático, que se complementan con evaluaciones similares a nivel continental (ej.: proyecto ACACIA en Europa, Warrick et al., 1990) y a nivel nacional (ej.: proyecto ECCE, 2002-2005, en España; Moreno, 2005). Dentro de este último proyecto, Vallejo et al. (2005) elaboraron el capítulo correspondiente a los impactos sobre los recursos edáficos españoles.

En este trabajo se analizan los impactos que las alteraciones de las temperaturas y de los regímenes de humedad pueden tener sobre los principales procesos endógenos del suelo, su potencialidad agrícola y vulnerabilidad a la degradación. También, se discuten las posibilidades recíprocas que ofrecen el adecuado uso y manejo del suelo en la modificación de los procesos atmosféricos. Esta modificación es consecuencia de la capacidad de captura y fijación de CO₂ atmosférico que tienen los suelos y que puede ser incrementada mediante su cambio de uso, restauración de zonas degradadas o aplicación de adecuadas prácticas de manejo agrícola.

Tal y como se esquematiza en la **Figura 1**, los procesos que tienen lugar en el suelo condicionan el *ciclo global del carbono*, alterando el flujo de CO₂ a la atmósfera, como también ocurre con el flujo de otros gases de efecto invernadero (GHGs), principalmente CH₄ y N₂O. A su vez, como se recoge en la **Tabla 1**, los suelos del mundo representan el tercer *reservorio de carbono*

(*) Este texto se corresponde básicamente con el Capítulo 19 del libro "Evaluación Agro-ecológica de Suelos para un Desarrollo Rural Sostenible" (De la Rosa, 2008),

más importante después de los océanos y de los estratos geológicos y mucho mayor que la atmósfera y la biosfera, estimándose en 2.400 Gt (miles de millones de toneladas; Lal, 2004). Esta gran capacidad de secuestro de carbono que tienen los suelos se puede incrementar o reducir antrópicamente, pudiendo resultar una interesante medida de mitigación del cambio climático.

2. Efectos sobre los procesos endógenos

El cambio climático actualmente previsto es debido al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, lo que provoca un aumento de la temperatura del suelo; y altera los patrones de precipitación y evaporación, provocando modificaciones en el régimen de humedad del suelo.

Parece que para el año 2100 la concentración de CO₂ en la atmósfera puede alcanzar las 760 ppm, aproximadamente el doble de la actual. El efecto directo de este fenómeno sobre los suelos se relaciona principalmente con la población faunística y microbiana, la mineralización, la disponibilidad de nutrientes y la producción de biomasa (Lal, 2006).

También a lo largo de este siglo, la *temperatura del suelo* es previsible que aumente considerablemente como consecuencia del incremento esperado de la temperatura global, de 1,4 a 5,8 °C, y debido al enriquecimiento de la atmósfera en gases de efecto invernadero. De acuerdo con Lal (2006), este calentamiento global es probable que tenga un fuerte impacto sobre los procesos y calidad del suelo, muy especialmente sobre la respiración y mineralización, la producción de biomasa, y la erosión, contaminación y otros fenómenos degradativos.

Otro parámetro climático que puede actuar como factor determinante del cambio son los *patrones de precipitación*: cantidad de lluvia y distribución temporal. Recientemente, Zhang et al. (2007) han puesto de manifiesto los efectos combinados que los cambios en las concentraciones en la atmósfera de los GHGs han tenido en los patrones de lluvia durante el siglo pasado. A nivel mundial, estos autores separan diferentes bandas latitudinales (40-70°N; 0-30°N; 0-30°S) con aumentos y disminuciones importantes de las precipitaciones totales (+20 a 85%; -20 a 40%; +75 a 120%; respectivamente en cada banda), aportando datos precisos sobre la contribución antrópica a esos cambios.

2.1. Poblaciones faunística y microbiana

La fauna del suelo puede verse muy afectada por el aumento de CO₂, así por ejemplo Yeates et al. (1997) observaron en estas circunstancias experimentales cambios significativos en las poblaciones de *lombrices* y *nematodos*, aunque no unidireccionales, y una disminución de *bacterias*. Esto último probablemente debido al aumento de nematodos predadores. A su vez, Wiemken (2001) puso de manifiesto en diferentes tipos de suelos, que

incrementos en la concentración de CO₂ atmosférico elevaban significativamente las poblaciones de *micorrizas*.

Sin embargo, parece que el contenido total de carbono orgánico del suelo no cambia sustancialmente con la elevación del CO₂ y aunque se puede ver favorecida la acumulación de carbono de más bajo peso molecular y de otras variedades alifáticas (Islam et al., 1999).

Sobre la influencia del aumento de la temperatura no existe mucha información disponible, aunque en condiciones de campo se han observado aumentos en la diversidad de la población faunística, a condición de que la disponibilidad hídrica no disminuya excesivamente; ya que si ello ocurre, el efecto pasa a ser negativo (Harte et al., 1996).

2.2. Descomposición y humificación

El aumento de la temperatura acompañado de una mayor sequedad del suelo parece claro que acelerará el proceso microbiano de *descomposición de los residuos* vegetales. En todo caso, este proceso de descomposición microbiana, seguido a más largo plazo por el de formación del humus, interacciona fuertemente con otros procesos del ciclo del carbono como el de respiración y mineralización.

2.3. Respiración y mineralización

Sobre el grado y sentido de la afectación de los múltiples procesos relacionados con el carbono que tienen lugar en la rizosfera (**Figura 1**), debido al efecto de *fertilización del CO₂*, existe mucha incertidumbre y queda mucho que investigar (Solverness, 1999). En todo caso, la mineralización parece aumentar solo si se produce también un incremento de la temperatura del suelo; y la capacidad de acumulación de carbono, tanto del suelo como de la vegetación, sí es previsible que aumente considerablemente (Tian, 2000).

La mayor temperatura del suelo producirá un incremento del proceso de respiración de dicho suelo, y como consecuencia un aumento de las emisiones de CO₂ a costa del contenido en materia orgánica. No obstante esta simple relación causa-efecto puede ser drásticamente alterada por otros factores, como por ejemplo el contenido en humedad del suelo. Lal (2006) hace una amplia revisión de numerosos experimentos sobre el proceso de respiración del suelo, llevados a cabo en diferentes tipos de suelos y usos, y en condiciones cambiantes de temperatura y humedad. Entre las conclusiones destaca la importancia del factor *tipo de suelo*, así como las interacciones con otros procesos del ciclo del carbono, muy especialmente con el de descomposición y humificación.

En cuanto a los impactos sobre los recursos edáficos españoles, destaca el hecho estimado sobre una *pérdida de carbono orgánico* de los suelos del 7 % por cada grado de aumento de la temperatura; valor que podría variar

según el cambio en la precipitación y las características intrínsecas de cada suelo. También, ciertas perturbaciones accidentales como son los incendios forestales podrían llegar a producir pérdidas de carbono en los suelos de hasta el 90 % cuando las temperaturas superen los 450 °C (Vallejo et al., 2005).

3. Impactos sobre la potencialidad agrícola

Los cambios esperados en los procesos que tienen lugar preferentemente en los horizontes de los suelos explorados por las raíces, con la consiguiente liberación de nutrientes, así como el propio efecto fertilizante del CO₂, debe tener un fuerte impacto sobre la *producción de biomasa* con importantes implicaciones sobre el ciclo global del carbono. De esta forma, los ecosistemas naturales y agrícolas aumentarán considerablemente su capacidad de retención de CO₂ durante los próximos 50 ó 100 años (Nisbet, 2002).

3.1. Capacidad productiva

Sobre la capacidad productiva de los suelos, el impacto de un incremento de las temperaturas va a depender muy probablemente de la latitud, las precipitaciones y el tipo de suelo. En las latitudes más altas, con períodos de desarrollo vegetativo cortos, el calentamiento del suelo con el asociado incremento de la mineralización estimulará la producción de biomasa.

Olsen y Bindi (2002) pronosticaron que el calentamiento en Europa ocasionará un desplazamiento hacia el norte de las zonas de mayor interés agrícola, determinando un incremento de la productividad y de la eficiencia en el uso de los recursos rurales. En Canadá, Belanger (2002) considera que un incremento de 2 a 6°C en las temperaturas mínimas durante los meses de invierno afectará la supervivencia de los cultivos forrajeros perennes. La menor duración de la capa protectora de nieve durante el invierno causará daños importantes sobre dichos cultivos. Esta inesperada forma en que las temperaturas más cálidas afectarán negativamente el desarrollo de los cultivos, pone de manifiesto la complejidad con que el cambio climático puede afectar el funcionamiento del sistema suelo-planta (Lal, 2006).

De una forma integrada, el modelo ACCESS (Loveland et al., 1995) trata de pronosticar, con dos niveles de detalle, la influencia del cambio de diferentes parámetros climáticos sobre la capacidad productiva de los suelos para diversos cultivos tradicionales.

3.2. Fertilidad natural

En muchos ecosistemas terrestres, el ciclo del carbono suele estar relacionado con los ciclos de los nutrientes, muy especialmente del nitrógeno. Así, cambios en el ritmo de descomposición de la materia orgánica debido al calentamiento global pueden afectar la mineralización del nitrógeno, las emisiones de N₂O y NO, y el nivel de fertilidad natural. En la Amazonia, Cattanio (2002) observó que la sequedad del suelo provocada por el

incremento de temperatura elevó las emisiones de N₂O y NO. Otros autores, como Jamieson (1998) en suelos de Inglaterra, llegaron también a la misma conclusión de que la escasez de humedad es el principal factor determinante de los procesos microbianos de la rizosfera. A su vez, la mayor movilidad de los nutrientes ocasionada por el incremento de la temperatura provocará la pérdida por lavado de dichos elementos

4. Impactos sobre la vulnerabilidad

En términos generales, es ya ampliamente aceptado que la aceleración del efecto invernadero redundará en un aumento de la vulnerabilidad o riesgos de degradación de la mayoría de los suelos.

4.1. Erosión

El aumento del riesgo de erosión del suelo será fundamentalmente debido al: i) incremento de la frecuencia e intensidad de los episodios extremos de lluvias; ii) disminución del contenido en materia orgánica y, como consecuencia, deterioro estructural de los suelos; y iii) deterioro de la capacidad protectora de la cubierta vegetal debido a la mayor descomposición de los residuos de los cultivos.

De la Rosa et al. (1996) hicieron uso del modelo Raizal, considerando una perturbación climática (en cuanto a temperatura y precipitación) previsible en el año 2050, para pronosticar el riesgo de erosión hídrica en suelos representativos de Andalucía, España. Se estimó que el riesgo de erosión aumenta en un 47 % de los suelos andaluces y disminuye en otro 18 % de los suelos, resaltando como era de esperar la *importancia del tipo de suelo*.

Los estudios de Rodolfi y Zanchi (2002) ponen de manifiesto que el incremento de la temperatura conducirá a más fuertes y prolongados períodos de sequía, mayor extensión de las condiciones de aridez, disminución de la materia orgánica de los suelos, erosión, salinización y desertificación. Incluso en las tierras marginales, la pérdida de productividad acentuará la degradación de los suelos, hasta llegar a una erosión masiva que propicie su abandono y la imposibilidad de un uso futuro de dichas tierras.

4.2. Contaminación

La mayor velocidad de los procesos de mineralización y movilización de los nutrientes, ocasionada por el calentamiento global parece que provocará una mayor facilidad del *lavado* de ciertos elementos como el nitrógeno y el aluminio, lo que afectará adversamente el riesgo de contaminación de los suelos y la calidad de las aguas subterráneas (Solvernes, 1999).

De la Rosa et al. (1996) hicieron uso del modelo Pantanal, considerando una perturbación climática (en cuanto a temperatura y precipitación) previsible en el año 2050, para pronosticar el riesgo de contaminación difusa en suelos

representativos de Andalucía, España. Se calculó un aumento del riesgo de contaminación en un 60 % de los suelos andaluces, mientras que disminuye en otro 40 %. Por tipo de contaminante, los riesgos por metales pesados y pesticidas aumentan proporcionalmente más que los riesgos por fertilizantes.

Otro proceso degradativo que se verá afectado por el cambio climático es la salinización del suelo. El aumento de la evapo-transpiración y de la sequía comportarán la remontada del nivel freático, la intrusión salina y la acumulación de sales en la zona de enraizamiento del suelo, en los climas áridos y semiáridos (Vallejo et al., 2005).

4.3. Traficabilidad

Entre otros muchos efectos negativos que tiene el cambio climático, destaca la traficabilidad de los suelos de las zonas más frías, sobre todo los que se sitúan al norte del Círculo Polar Ártico, que se verá seriamente amenazada. El calentamiento global ha comenzado a derretir grandes extensiones de los suelos *permafrost* (permanentemente helados; nominado como nanopodsol nórdico según Kubierna, 1952) bajo el bosque de tundra. Así por ejemplo, en Alaska es frecuente que los camiones que viajan por carreteras o caminos sobre suelos *permafrost*, se queden atascados en el barro, al ir disminuyendo el número de días aptos para el tráfico rodado (**Figura 2**; Gore, 2007).

5. Efectos del suelo sobre el cambio climático

Dependiendo del tipo de uso y manejo, el suelo puede actuar como fuente o por el contrario como sumidero de CO₂ atmosférico. De acuerdo con el ciclo global del carbono en los ecosistemas agrícolas (**Figura 1**), el *sistema-suelo* actuará como emisor de CO₂ a la atmósfera siempre que la cantidad de biomasa que se incorpore al propio suelo en forma de estiércol o residuos sea menor que las pérdidas de carbono ocasionadas por los procesos de mineralización, erosión y lavado.

Por el contrario, el sistema-suelo será capaz de capturar y retener CO₂ siempre que, por ejemplo, se reforesten las tierras marginales o de escaso interés agrícola, aumentando su contenido en materia orgánica. En general, la capacidad de secuestro de carbono de los suelos se hará efectiva siempre que se consiga un uso y manejo sostenibles o, en otras palabras, a la medida de cada suelo (De la Rosa, 2008).

5.1. El suelo como fuente de GHGs

Tal y como expuso Lal (2006), los ecosistemas agrícolas han sido históricamente importantes emisores de gases de efecto invernadero. Así *las emisiones de CO₂* se remontan a 10.000 años, con el inicio de las actividades agrícolas; mientras que, hace 5.000 años, las de CH₄ se incrementaron considerablemente con el cultivo del arroz bajo riego y la expansión de la

ganadería doméstica. Entre 1800 y 1994, las emisiones de CO₂ como consecuencia del cambio de uso de los suelos, desde natural a agrícola, se estiman de 100 a 180 Gt de carbono, y de 24 a 36 Gt solo entre 1980 y 1999. En comparación, para esos mismos períodos de tiempo las emisiones de CO₂ debidas al uso de combustibles fósiles se estiman de 240 a 260 Gt y de 115 a 220 Gt, respectivamente (Sabine, 2004). Según los cálculos del IPCC (2001), en el período 1990 a 2000, alrededor del 20 % de las emisiones antrópicas totales fue debido a la deforestación tropical, a la quema de biomasa y a las prácticas agrícolas. En la actualidad, la concentración de CO₂ en la atmósfera se estima en 375 ppm (partes por millón).

Entre algunas situaciones concretas, destaca la creciente liberación de CO₂ como consecuencia de la descongelación de los suelos *permafrost* en los bosques de tundra al norte del Círculo Polar Ártico, que solo en Siberia se estima en 70 Gt de carbono (Gore, 2007).

A finales de los años 1990, la *concentración atmosférica de CH₄* se estimaba en 1.745 ppb (partes por mil millones), con una velocidad de crecimiento de 7 ppb por año (IPCC, 2001). Esta concentración ha supuesto un aumento del 150 % sobre la correspondiente en la época pre-industrial. Las fuentes más importantes de CH₄ a la atmósfera son de tipo agrícola, concretamente, el cultivo del arroz en zonas húmedas, la quema de biomasa, o el uso ganadero de los rumiantes.

La *concentración atmosférica de N₂O* ha pasado de 270 ppb en la era pre-industrial a 314 ppb a principios de este siglo (IPCC, 2001). Las principales fuentes de este gas de efecto invernadero son los propios suelos, así como los fertilizantes y la quema de biomasa.

En general, la capacidad de emisión de GHGs de los suelos se incrementa considerablemente con la aceleración de los procesos degradativos, tales como la erosión, compactación, contaminación, acidificación y anaerobiosis. Procesos, que como ya es bien conocido, aumentan descontroladamente con el inadecuado uso y manejo de los propios suelos.

5.2. El suelo como sumidero de GHGs

Se hace referencia en este apartado al almacenamiento de carbono en los suelos de forma sólida y estable. La vía de secuestro de carbono atmosférico más importante es la que tiene lugar de manera *indirecta*, a través de la biomasa formada por la transformación fotosintética del CO₂ y la posterior descomposición de dicha biomasa en el suelo. La vía *directa* ocurre mediante reacción química inorgánica que transforma el CO₂ en otros compuestos del carbono tales como los carbonatos de calcio y magnesio.

Los procesos que afectan la dinámica del carbono orgánico en los suelos (**Tabla 2**), pueden ser modificados por perturbaciones naturales y por manipulaciones antrópicas. Entre estas últimas, las actividades agrícolas que

favorecen la captura y retención estable del CO₂ atmosférico destacan: la reforestación de áreas marginales; la máxima producción de biomasa; la incorporación al suelo de los residuos de los cultivos; la reducción del laboreo; la racionalización del uso de fertilizantes; y la explotación biológica de nutrientes, en especial nitrógeno y fósforo. De esta forma, el suelo agrícola puede ser receptor neto de CO₂ y CH₄ si es utilizado y manejado adecuadamente. Estas medidas antrópicas, afortunadamente, *coinciden* con las recomendadas para mantener e incluso recuperar la calidad de cada tipo de suelo.

Según Lal (2004), la velocidad de recuperación del secuestro de CO₂ por los suelos, siguiendo estas prácticas recomendadas, es mayor en los climas fríos y húmedos (300 – 500 kg/ha/año) que en los cálidos y secos (50 – 200 kg/ha/año). En casos excepcionales, esta velocidad de secuestro de los suelos agrícolas ha llegado a ser de 1 t/ha/año.

Se supone que la capacidad de secuestro de carbono de los suelos agrícolas es aproximadamente igual a la pérdida histórica sufrida, es decir, del 30 al 50 % de su capacidad inicial en las regiones templadas, y del 50 al 75 % en los suelos tropicales. La mayoría de los suelos agrícolas han perdido entre 30 y 50 toneladas de carbono por hectárea. Es de esperar que alrededor de las dos terceras partes de esta pérdida pueda ser recuperada siguiendo las prácticas recomendadas (Lal, 2004).

A partir de los estudios realizados por Rodríguez-Murillo (2001) sobre el contenido de carbono de los suelos en España, según el tipo de uso (**Tabla 3**), los suelos agrícolas (cultivo de secano) al cambiar hacia otras formas de uso más naturales (bosque/matorral) podrían hasta duplicar su contenido en materia orgánica.

Existe también otra vía de secuestro de carbono por los suelos a través de la formación de carbonatos secundarios y su posterior lavado hasta los acuíferos. Esta formación de *carbonatos* se produce por los procesos biogénicos que se aceleran mediante la aplicación de biosólidos y otras enmiendas orgánicas. La velocidad de formación de carbonatos secundarios es baja, por lo general menos de 50 kg/ha/año.

Según Sabine (2004), desde la era pre-industrial, la pérdida histórica de carbono de la biosfera terrestre puede superar los 180 Gt. Pacala y Socolow (2004) proponen una serie de opciones tecnológicas, algunas referidas al uso y manejo del suelo, para lograr una captura de CO₂ atmosférico del orden de 6 Gt anuales. Entre estas medidas relacionadas con los suelos, destaca la reforestación de zonas agrícolas marginales o de suelos degradados con lo que se lograría capturar carbono tanto para la producción de biomasa forestal como para aumentar la materia orgánica de dichos suelos. Con ello se podría retirar de la atmósfera hasta 1 Gt de carbono al año.

Otra medida considerada por Pacala y Socolow (2004) incluye el conjunto de prácticas agrícolas discutidas anteriormente y que podrían capturar a nivel mundial de 0,4 a 1,2 Gt de carbono al año. Estas prácticas no solo aumentarían también la calidad de los suelos, sino que incidirían favorablemente sobre la calidad del agua y la biodiversidad.

El uso de biocombustibles, bien por combustión directa o por conversión a etanol o hidrógeno, es otra opción capaz de reciclar CO₂ atmosférico disminuyendo la parte correspondiente al uso de combustibles fósiles. Para ello se requieren cultivos con muy altas producciones de biomasa (del orden de 15 t/ha/año), y en el caso de cultivos de grano, como el trigo, maíz o soja, sus residuos no se deben retirar del suelo para mantener el nivel de materia orgánica y evitar la erosión. Para conseguir mediante esta opción retirar de la atmósfera 1Gt de carbono al año, se precisaría producir 34 millones de barriles de etanol por día hasta el 2054. Esta cantidad es 50 veces mayor que la producción de etanol en el 2004, y se requerirían 250 millones de hectáreas de tierras con alta producción de biomasa (Pacala y Socolow, 2004).

Gráficos y tablas

Constituyente	Cantidad de carbono, Gt
Océanos	38.400
Estratos geológicos	4.130
Suelos (hasta 1 m de profundidad)	2.400
Atmósfera	760
Vegetación	560

Tabla 1. *Distribución del carbono entre los principales constituyentes del planeta Tierra.*
Fuente: Adaptación de Lal (2004).
Gt = miles de millones de toneladas

Que producen pérdidas (Emisión)	Que producen ganancias (Secuestro)
Erosión	Incorporación de biomasa
Mineralización	Incorporación de residuos
Respiración microbiana	Descomposición microbiana
Lavado	Humificación

Tabla 2. *Procesos que afectan la dinámica del carbono orgánico en los suelos.*
Fuente: Adaptación de Lal (2006)

Usos del suelo	Extensión, ha	Carbono, kg/m ²	Total, Mt
Bosque coníferas	6.301.000	7,50	473
Bosque planifolios	2.399.100	9,36	225
Bosque mixto	1.893.400	12,10	229
Matorral	7.849.200	11,30	890
Matorral arbolado	5.093.800	8,20	417
Cultivo secoano	12.174.000	5,08	618
Otros	14.745.800	6,28	926
TOTAL	50.456.300		3.778

Tabla 3. *Contenido en carbono de los suelos en España, según el tipo de uso.*
 Fuente: Adaptación de Rodríguez-Murillo (2001).
 Mt = millones de toneladas

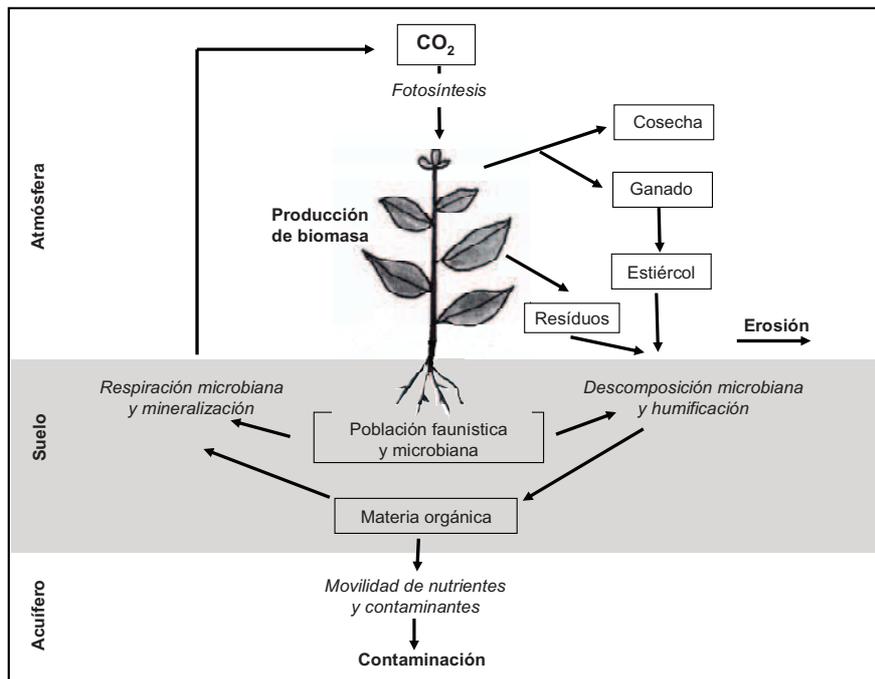
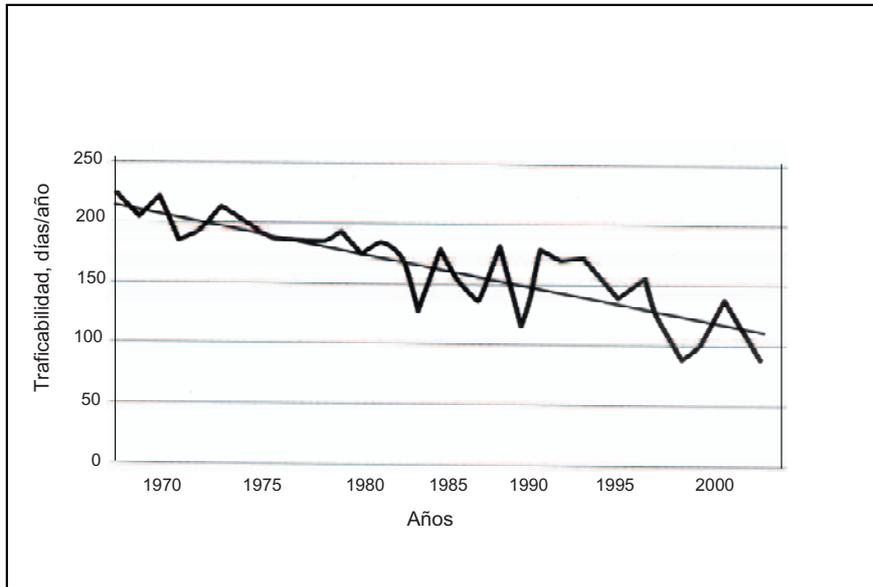


Figura 1. *Representación del ciclo global del carbono en los ecosistemas agrícolas*



Fuente: Adaptación de la figura original, Gore (2007).

Figura 2. Número de días aptos para el tráfico rodado en carreteras o caminos sobre suelos permafrost de Alaska, EE.UU.

Referencias

- Belanger G., 2002. Climate change and winter survival of perennial forage crops in Eastern Canada. *Agronomy Journal* 94: 1120-1130.
- Cattanio J.H., 2002. Unexpected results of a pilot experiment on soils emissions of CO₂, CH₄, N₂O and NO in eastern Amazonia. *Biological Fertility of Soils* 36: 102-108.
- De la Rosa D., 2008. *Evaluación agro-ecológica de suelos para un desarrollo rural sostenible*. Mundi-Prensa Eds., Madrid.
- De la Rosa D., Crompvoets J., Mayol F., Moreno J.A., 1996. Land vulnerability evaluation and climate change impacts in Andalucía, Spain. *International Agrophysics Journal* 10: 225-238.
- Gore A., 2007. *Una verdad incómoda: La crisis planetaria del calentamiento global y como afrontarla*. Ed. Gedisa, Barcelona.
- Harte J., Rawa A., Price V., 1996. Effects of manipulated soil microclimate on mesofaunal biomass and diversity. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 313-322.
- IPCC, 1990, 1996, 2001, 2007. *First to fourth assessment reports: Climate change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Islam K.R., Mulchi C.L., Ah A.A., 1999. Tropospheric carbon dioxide or ozone enrichments and moisture effects on soil organic carbon quality. *Journal of Environmental Quality* 28: 1629-1636.
- Jamieson N., 1998. Soil N dynamics in a natural calcareous grassland under a changing climate. *Biological Fertility of Soils* 27: 267-273.
- Kubienski W.L. 1952. *Claves sistemática de suelos*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Lal R., 2004. Soil carbon sequestration impact on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Lal R., 2006. Impacts of climate on soil systems and of soil systems on climate. En: Uphoff N., et al. (Eds.). *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, Taylor & Francis CRC Publ., Boca Raton FL.
- Loveland P., Rounsevell M., Mayr T., Legros J.P., Volt M., De la Rosa D., Armstrong A., 1995. ACCESS: A spatially distributed model. *Science Research Development* EUR 15921 EN, 215-228.
- Moreno J.M. (Coord.), 2005. *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto*

- del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Nisbet T.R., 2002. Implications of climate change: Soil and water. En: Broadmeadow M. (Ed.), *Climate change impacts on UK forests*. Forestry Commission Bulletin No. 125. Edimburgo.
- Olsen J.E., Bindi M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16: 239-262.
- Pacala S., Socolow R., 2004. Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305: 968-972.
- Rodolfi G., Zanchi C., 2002. Climate change related to erosion and desertification. En: Sidle R.C. (Ed.), *Environmental changes and geomorphic hazards in forests*. CAB International, Wallingford.
- Rodríguez-Murillo J.C., 2001. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biology and Fertility of Soils* 33: 53-61.
- Sabine C.I., 2004. The oceanic sink for atmospheric CO₂. *Science* 305: 367-371.
- Solverness K.A., 1999. *Effects of elevated carbon dioxide on an increased temperature on plants and soils*. Norwegian Univ. Life Sci., Aas.
- Tian H., 2000. Climatic and biotic controls on annual carbon storage in Amazonian ecosystems. *Global Ecology & Biogeography* 9: 315-335.
- Vallejo R., Díaz-Fierro F., De la Rosa D., 2005. Impactos sobre los recursos edáficos. En: Moreno J.M. (Coord.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid
- Warrick R.A., Barrow E.M., Wigley T.M., 1990. *The greenhouse effect and its implications for the European Community*. EUR 12707 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Wiemken V., 2001. Effects of elevated carbon dioxide and nitrogen fertilization on mycorrhizal fine roots and the soil microbial community in beech-spruce ecosystems on siliceous and calcareous soil. *Microbial Ecology* 42: 126-135.
- Yeates G.W., Tate K.R., Newton P.C., 1997. Response of the fauna of a grassland soil to doubling of atmospheric carbon dioxide concentrations. *Biological Fertility of Soils* 25: 307-315.
- Zhang X., Zwiers F.W., Hegert G.C., Lambert H., Gillett N., Solomon S., Scott P.A., Nozawa T., 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* 448: 461-466.