

SOSTENIBILIDAD DEL SECUESTRO DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES

Robert Jandl ¹ y Agustín Rubio Sánchez ²

¹ Centro de Investigación Forestal. Seckendorff-Gudent Weg 8. A-1131-VIENA (Austria). Correo electrónico: robert.jandl@bfw.gv.at

² Dpto. Silvopascicultura. E.T.S.I. de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: arubio@montes.upm.es

Resumen

El secuestro de carbono en los ecosistemas forestales es una oportunidad para la reducción de la concentración de CO₂ en la atmósfera y por eso un posible alivio para el calentamiento mundial. La toma en consideración de los bosques como parte de la solución requiere de un mejor conocimiento del tiempo de residencia del C en los ecosistemas forestales y también sobre la permanencia y la estabilidad del sumidero terrestre de C. Mucha atención se está dirigiendo hacia el C del suelo forestal dado que la parte más estable del C puede residir durante siglos. La gestión de los sistemas forestales puede aumentar el stock de C del suelo mediante distintas estrategias: la selección de especies de árboles, la frecuencia de las entresacas, la longitud del turno de corta, etc. Estas estrategias pueden maximizar el stock de C dentro de límites que son específicos para los distintos tipos de bosques. Sin embargo, otros factores pueden actuar en sentido contrario en el secuestro de C. Así, el calentamiento global puede favorecer la actividad de los microorganismos del suelo y en consecuencia aumentar la respiración y por lo tanto la emisión de CO₂. Una adecuada gestión forestal enfocada al secuestro de C puede ofrecer una solución intermedia que contribuya al secuestro de C en los sumideros terrestres durante las próximas décadas.

Palabras claves: *Secuestro de C, Suelos forestales, Gestión de bosques*

SOSTENIBILIDAD

El concepto *sostenibilidad* se nos presenta como un auténtico paradigma, difícil de entender y de aplicar puesto que cada ecosistema tiene su propio ritmo y su particular dinámica. Los bosques de los Alpes manifiestan una dinámica muy estable, en concreto los bosques situados fuera de las líneas de aludes pueden tener edades de más de 300 años y, al menos para el observador, parecen bastante estables. En cambio, la dinámica de los bosques de regiones secas, en muchas ocasiones, aparece dominada por frecuentes fuegos. Ambos casos pueden ser empleados como

ejemplos de dinámicas intrínsecas bien diferentes: los bosques de los Alpes parecen ser bastante estables, mientras que los de las regiones secas se muestran bastante dinámicos. Ambos sistemas tienen sus propias dinámicas, pero sobre todo en distintas escalas temporales.

El concepto *sostenibilidad* en relación con el secuestro de carbono se entiende en el sentido de “permanencia”. Los sumideros de C sostenibles serán los que demuestren una máxima persistencia. El hombre demuestra preferencia por un estilo de vida para el que hacen falta grandes cantidades de energía. El uso de energías fósiles (carbón, petróleo) presenta una consecuencia: el

C es oxidado a CO₂, un gas con un fuerte efecto invernadero. El foro internacional UNFCCC reclama una reducción de las emisiones de CO₂; en cambio, el Protocolo de Kyoto abre para los países signatarios la opción de reducir los niveles de los gases mediante la consideración del aumento de los stocks de C en algunos bosques mediante adecuadas formas de gestión.

Para mitigar el efecto del calentamiento del planeta dentro de amplios marcos hay que adoptar medidas que favorezcan la captura de CO₂. Una posibilidad la ofrecen las medidas técnicas, teóricamente eficientes, pero caras y todavía en incipiente estado de desarrollo. Otra opción es distribuir el C por la biosfera. Un primer apoyo al respecto lo ofrece la absorción de CO₂ por parte de las plantas. Este planteamiento no soluciona el problema, puesto que la absorción de CO₂ por las plantas no retira totalmente el C del ciclo, tan sólo queda retenido durante una serie de años, queda secuestrado. El tiempo máximo de secuestro será el tiempo durante el que el C permanezca como madera en los árboles, más el tiempo durante el que dicha madera perdure como producto elaborado o transformado. Esta última fase es poco conocida y es el sujeto de estudio del proyecto *wood-chain* del Sexto Programa Marco de la Unión Europea. Dado que todos estos tiempos son limitados, aún siendo un poco especulativo, es fácil asumir que no supondrán una solución a largo plazo para el secuestro de C en los ecosistemas. Otra posibilidad que ofrece la biosfera es el secuestro de C en el suelo. Sin embargo, la dinámica del ciclo del C en el suelo tiene muchas facetas. Una gran parte del C que entra en el suelo vuelve casi inmediatamente a la atmósfera (es el C dinámico) y sólo una pequeña parte del C del suelo muestra una larga permanencia en él (es el C recalcitrante). Por lo tanto una solución podría radicar en intentar aumentar la cantidad de este C recalcitrante. Esto, a pesar de tratarse de una pequeña fracción, podría suponer un gran efecto debido al gran stock al que afectaría. Los ecólogos entienden bien que el secuestro del C en los bosques solamente es una solución intermedia del problema del calentamiento mundial, aunque con estos planteamientos relativos al C recalcitrante del suelo podríamos encontrarnos ante una nueva e interesante dimensión de las soluciones al problema de las emisiones de CO₂ a la biosfera.

Las cuestiones vinculadas con el secuestro de C en el suelo son (1) ¿el tamaño del stock del C involucrado es suficiente, relevante o marginal?, (2) ¿de qué manera podemos influir en la tasa del secuestro?, (3) ¿son superables las dificultades que presenta la verificación? En este texto se tratan los dos primeros puntos.

LAS MAGNITUDES DEL CARBONO EN LOS SUELOS

Las cantidades del C en la atmósfera (750 Pg) y en la biomasa terrestre (600 Pg) son muy parecidas. El pequeño tamaño del stock del C en la atmósfera implica una alta sensibilidad de éste a cambios de las cantidades del C en los ecosistemas terrestres. El noventa por ciento del C de la biomasa está en los ecosistemas boscosos. El stock de C en los suelos es con mucha diferencia el más grande (1500 Pg; tabla 1).

Las estimaciones sobre el tamaño del stock de C en los suelos de los bosques boreales varían en órdenes de cantidades que se ven multiplicadas por un factor de 3, de manera que la base de datos de la que se dispone hasta ahora es bastante inexacta. Las cifras dependen de la procedencia de dichas bases de datos (DIXON *et al.*, 1994; JOBÁGGY & JACKSON, 2000) y así, cuando los datos proceden de sitios húmedos, se encuentran stocks muy altos mientras que, por el contrario, en sitios secos aparecen stocks bajos.

En el pasado la puesta en cultivo de suelos redujo considerablemente el stock de C de los suelos. En tiempos históricos España estuvo dominada por bosques al igual que otros países como Austria y Suiza (aprox 50%), Alemania y Francia (30%). En suelos de intenso manejo (roturados, arados) el ciclo de C está acelerado y se ha tenido que establecer un nuevo equilibrio con menos C. La recuperación completa del stock de C original de estos suelos agrícolas es prácticamente imposible dada la necesidad de una continua producción agraria. Pero un adecuado manejo podría recuperar 60×10^9 t C, i.e. un aumento del stock de C total de 4% (LAL, 2004). Para ello hace falta adoptar adecuadas medidas de forestación, desarrollar una agricultura ecológica que evite tareas de laboreo (“no tillage”) etc. A este respecto hay destacadas iniciativas, aun-

Bioma	Área (x10 ⁶ km ²)	C (kg m ⁻²)	C (x10 ⁹ t)
Bosques boreales	12,0	9,3	112
Bosques templados	7,0	17,4	122
Bosques perennes	5,0	14,5	73
Bosques tropicales	23,5	18,9	435
<i>Total bosques</i>	47,5		742
Uso agrario	14,0	11,2	157
Desiertos	18,0	6,2	112
Matorrales	8,5	8,9	76
Prados templados	9,0	11,7	105
Prados tropicales	15,0	13,2	198
Tundra	8,0	14,2	114
<i>Total</i>	121,0		1500

Tabla 1. Área, concentración y stock de C (hasta 1 m de profundidad) en diferentes ecosistemas (JOBAGGY & JACKSON, 2000; POST, 1982)

que puntuales. Por ejemplo, se están realizando grandes esfuerzos de forestación de pastos abandonados en Irlanda sobre suelos pantanosos. En algunos países de América Latina se están generando grandes expectativas en cuanto a los ingresos que pueden venir mediante proyectos relacionados con el secuestro de C para los que tienen prioridad política. En aquellas sociedades que disponen de áreas forestales el potencial secuestro de C de los bosques recae en la posibilidad de establecer nuevas masas forestales (forestación, reforestación).

Sin embargo, esta posibilidad no está al alcance de aquellas áreas que carecen de terrenos forestales, ni allí donde haya grandes áreas ya pobladas de bosques, puesto que no será posible establecer más bosques en el futuro. Otra línea de actuación vendría de promover la lenta formación de una fracción de C estable en los suelos. El secuestro potencial de C en suelos forestales es importante, aunque menos que el de los suelos agrícolas (Tabla 2).

En la tabla 1 es interesante observar que los prados tienen un stock de C similar al de los sue-

los forestales. La razón es el denso sistema de raíces de las gramíneas, que a veces sitúan muy profundamente el C en el suelo. No obstante, también se puede comprobar que el stock total del C en los prados es más bajo que el stock de bosques, como consecuencia del efecto de la biomasa que generan los árboles. Además, las forestaciones tienen otro efecto positivo como es la protección del suelo por la permanente cobertura de las plantas. En consecuencia la tasa de erosión en áreas pobladas con bosques normalmente es mínima.

Como primera conclusión se puede afirmar que los suelos forestales son muy importantes en la compleja cuestión del secuestro de C.

EL CAMINO DEL CARBONO HACIA EL SUELO Y DESDE EL SUELO

Se estima que los bosques tienen una capacidad anual para fijar 50 Pg de C (*producción primaria bruta*) mediante la *fotosíntesis*. En los ecosistemas maduros el ciclo del C está cerrado,

Uso de la tierra	Área [ha]	Secuestro Potencial de C Anual [t C año ⁻¹]
Campos, suelos arados	1,35 x 10 ⁹	0,40 - 0,80 x 10 ⁶
Pastos	3,70 x 10 ⁹	0,01 - 0,30 x 10 ⁶
Suelos irrigados	275 x 10 ⁶	0,01 - 0,03 x 10 ⁶
Suelos degradados, suelos forestales	1,10 x 10 ⁹	0,20 - 0,40 x 10 ⁶

Tabla 2. El secuestro estimado de carbono en los suelos del mundo es entre 0,4-1,2x10⁶ t C por año (LAL, 2004)

motivo por el que en el mismo tiempo la cantidad de C liberado es igual al C capturado. Los árboles utilizan aproximadamente el 50 % del C para el crecimiento de la biomasa y para la respiración y mantenimiento de su actividad metabólica. A la cantidad restante del C se le denomina *producción primaria neta*. Una parte del C de estos ecosistemas dirige su camino hacia el suelo. La ruta fundamental es la caída de las hojas con la que recargan el stock del C de la hojarasca y del horizonte orgánico del suelo, mientras que la desintegración de las raíces directamente recarga el stock del C en el suelo mineral. Ambas formas de C parcialmente son consumidas en la respiración de los microorganismos del suelo. La tasa de *mineralización* depende de la abundancia de los microorganismos, de la calidad química del sustrato y de algunos factores del sitio (humedad del suelo, temperatura, disponibilidad de nutrientes). El C que no es consumido en la respiración constituye la *producción neta del ecosistema* (IGBP, 1998) y es una parte de ésta el C que es secuestrado por el sistema.

Este C secuestrado es sensible a las alteraciones del ecosistema. Así, los fuegos, las infestaciones por insectos y la erosión son procesos que potencialmente pueden disminuir el secuestro de C. Estas alteraciones, su extensión y su dinámica temporal en principio son propiedades inherentes del ecosistema, pero a veces, con demasiada frecuencia, también son consecuencia del inadecuado uso del terreno. Todo ello configura un hecho importante: solamente una parte muy pequeña del C que entra en el ecosistema terrestre tiene realmente capacidad potencial de contribuir al secuestro del C.

En el suelo la pérdida de C mediante mineralización es bien conocida. Un factor adicional es la lixiviación del C disuelto, pero que solamente es importante en aquellos ecosistemas en los que en determinadas épocas hay un exceso de agua.

EL CARÁCTER DEL CARBONO DEL SUELO

El elemento clave del C del suelo es el tiempo que puede estar en el mismo. La materia orgánica del suelo es una mezcla heterogénea de distintos compuestos químicos. Unos son carbo-

hidratos liberados de las hojas caídas que, casi inmediatamente, son consumidos por los microorganismos en su respiración. Otros son moléculas más recalcitrantes como ácidos aromáticos y compuestos adsorbidos a los coloides del suelo. Estos distintos componentes tienen diferentes tiempos de residencia en el suelo, que varían desde pocas horas hasta miles de años. Para el secuestro de C en los suelos solamente importan los componentes estables de la materia orgánica.

Localización: En los suelos hay que distinguir entre el *C de la hojarasca*, situada por encima del suelo mineral y característica de los suelos forestales, y el *C del suelo mineral*. El C de la hojarasca retorna a la atmósfera con prontitud o con un desfase de algunos años. Esta característica es muy significativa de los suelos forestales: los nutrientes permanecen inmovilizados durante un cierto tiempo (meses, años), pero después son completamente mineralizados. En cambio el C del suelo mineral tiene la posibilidad de ligarse a estructuras inorgánicas (óxidos, arcillas), formando unos complejos estables, que son capaces de contribuir al secuestro de C. La gestión de los bosques y de sus perturbaciones (cortas, fuegos), así como la fertilización, afectan de manera inmediata al carácter de la hojarasca, determinando su situación y en consecuencia su aireación, lo cual posiblemente estimulará la mineralización. Existen distintas técnicas que mejoran notablemente la calidad del sitio, como la aplicación de calizas, puesto que en principio aumentan la velocidad de descomposición de la hojarasca y favorecen la destrucción parcial de la hojarasca.

Estado del agregado: El C existe en formas sólidas (materia orgánica), gaseosas (CO₂, CH₄) y disueltas ("dissolved organic carbon", DOC). La mayoría del stock de C aparece como C sólido, aunque los grandes flujos ocurren en la fase gaseosa. La fase acuática solamente es relevante en algunos ecosistemas. En los suelos profundos el DOC liberado mediante la descomposición en la hojarasca es absorbido en el suelo mineral, mientras que en suelos poco profundos el DOC es lixiviado al agua freática o a los ríos.

Factores químicos: La variabilidad del carácter químico de la materia orgánica es enorme. Se presenta tanto como ácidos orgánicos simples, como en complejas macromoléculas. El

noventa por ciento de la materia orgánica es estable y no participa en ninguna reacción química. El análisis en laboratorio del C se lleva a cabo mediante diversos métodos operacionales que consiguen distinguir fracciones de estabildades diferentes. El método clásico de separación de la materia orgánica en función de la distinta solubilidad de sus fracciones en soluciones con diferentes valores pH distingue entre ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y humina, en orden creciente de estabilidad (STEVENSON, 1982). La técnica de ^{13}C -NMR ha permitido además la diferenciación entre grupos alifáticos y aromáticos con una resolución bastante fina; sin embargo, la interpretación de los cromatogramas sigue siendo difícil (USSIRI & JOHNSON, 2003). Una alternativa es distinguir entre moléculas orgánicas pesadas y ligeras, apoyándose en los enlaces que las moléculas pesadas tienen con la materia inorgánica. Estos enlaces son estables y limitan el acceso de los microorganismos al C como sustrato, de manera que este C se considera también estable. En cambio, el C ligero no tiene relación con el suelo mineral, es fácilmente accesible para los microorganismos y su mineralización depende de su estructura química.

Factores del sitio: La mineralización no solamente depende de factores inherentes a la materia orgánica, sino también de la energía disponible (temperatura, radiación), así como de la cantidad de agua en el suelo, que siempre es el factor decisivo para las reacciones químicas y biológicas. Existen gradientes de la mineralización que siguen la altitud y también la latitud, de manera que sitios ubicados a gran altitud son muy semejantes a los de ecosistemas boreales.

ESTRATEGIAS DE GESTIÓN

1. La forestación. La acumulación de C en la biomasa de los sistemas forestales es un hecho irrefutable. La tasa de secuestro de C en el suelo puede cifrarse entorno a $0,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, aunque con mucha variabilidad (GUO & GIFFORD, 2002; POST & KWON, 2000). La acumulación de C en la biomasa de los bosques es más rápida y genera un stock de C que acaba por superar el de otros tipos de formaciones vegetales (pastizales, cultivos, etc.). Tras la forestación de un suelo anteriormente cultivado el establecimiento de un nuevo equilibrio necesita de varias décadas. En los bosques templados y boreales en la hojarasca se acumula C rápidamente, pero en formas lábiles y solamente por un tiempo limitado. La estabilización es posible cuando el C se incorpora al suelo mineral, aunque éste es un proceso es lento.

2. La especie forestal. El efecto sobre la biomasa también depende de la productividad, que en zonas con una larga tradición selvícola ya está optimizada, como ocurre en las regiones templadas. Dentro de este factor el elemento clave es la densidad de la madera que se produce. La tabla 3 muestra cómo el mismo volumen de biomasa difiere por un factor de 3 con respecto al stock de C, debido a que las maderas tienen densidades diferentes.

La influencia del tipo de árbol en el C del suelo depende de la calidad química de las hojas caídas, de la profundidad de las raíces y de la densidad de las raíces. Existen algunos datos comparables, pero todavía no se dispone de una conclusión final y comprensible a este respecto (VESTERDAL & RAULAND-RASMUSSEN, 1998). Lo más obvio es que el tipo de especie repercu-

Árboles caducifolios de hoja plana		Árboles aciculifolios	
Especie	kg m ⁻³	Especie	kg m ⁻³
<i>Salix</i>	330	<i>Thuja</i>	400
<i>Populus</i>	410	<i>Abies</i>	410
<i>Tilia</i>	490	<i>Picea</i>	430
<i>Alnus</i>	510	<i>Pseudotsuga</i>	470
<i>Acer</i>	590-640	<i>Pinus</i>	490
<i>Fagus</i>	680	<i>Larix</i>	550
<i>Carpinus</i>	790		

Tabla 3. Densidad de algunas especies de árboles europeos. Independientemente de la especie la concentración de C en la madera es aproximadamente 50% (DE VRIES et al., 2003)

te directamente en el stock del C de la hojarasca, pero el efecto sobre el stock de C en el suelo mineral todavía está escasamente aclarado.

3. Las cortas dan una ventaja competitiva al crecimiento de algunos individuos de la masa forestal con respecto de los otros. Con las cortas se consigue dar más valor a los fustes elegidos, aunque la biomasa total acaba siendo más baja que si no se efectuasen, de manera que las cortas nunca sirven para maximizar el stock de C. Aclarar una masa forestal estimula la descomposición (más radiación al suelo) y reduce la cantidad de hoja caída, por ello después de una corta acontece una bajada del stock de C. Sin embargo, el efecto sobre el C del suelo mineral es mínimo. Desde otra perspectiva una masa de fustes gruesos es más resistente ante las inclemencias meteorológicas. Por lo tanto, se puede asumir que hay una cierta compensación entre los efectos positivos y los negativos.

4. La extracción de madera implica una alteración para el suelo y una pérdida de biomasa, pero también supone un cambio en el microclima (más fuerte aún que las cortas). En los años posteriores a la saca de madera los suelos siguen perdiendo más C de lo que va aumentando la biomasa de los árboles. El efecto a largo plazo depende del grado de la alteración del suelo. Una revisión de la literatura muestra que el efecto de la saca de madera en el suelo es pequeño y que los efectos iniciales desaparecen pronto (JOHNSON & CURTIS, 2001).

5. El turno de rotación. El alargamiento del turno de rotación garantiza un tiempo (largo) para el desarrollo del suelo sin alteraciones. Incluso los bosques más maduros (*old growth*) acumulan C, como se ha podido comprobar en hayedos de 250 años en Alemania (KNOHL *et al.*, 2003; SCHULZE *et al.*, 2000). Es más, la acumulación de C en el suelo continúa incluso cuando se equilibran la mortalidad y el crecimiento y ello a pesar de haberse detenido la incorporación de C a la biomasa del sotobosque. La idea de alargar el turno de las rotaciones es bastante conservadora para la naturaleza. Sin embargo, en muchas ocasiones los posibles intervalos de los turnos de rotación vienen marcados por las reglas del mercado y habitualmente la industria de la madera acaba por imponer el acortamiento de los tiempos.

6. La fertilización con Nitrógeno. Muchos ecosistemas forestales manifiestan deficiencias en cuanto a los contenidos de N. En ellos se han llevado a cabo numerosas experiencias de fertilización que están demostrando que la fertilización con N puede tener consecuencias positivas para la productividad de las masas forestales, con lo cual se está consiguiendo almacenar más C en la biomasa aérea. Sin embargo, el efecto en los suelos es complejo. Este crecimiento estimulado del árbol incrementa las entradas de C en el suelo mediante la hojarasca, a través de las raíces y con la fijación microbiana. La materia en descomposición rica en nutrientes a su vez puede estimular las tasas de descomposición de la material orgánica lábil y a la vez promover la formación de otras formas materia orgánica estable (BERG & MEETEMEYER, 2002; HAGEDORN *et al.*, 2003).

Sin embargo, la fertilización con N tiene un serio inconveniente. Un uso poco eficiente por parte de las plantas del N aplicado conduce a la formación de óxidos de nitrógeno (N₂O), de manera que, en este caso, el efecto positivo en el secuestro de C que tendría una fertilización con N se vería contrarrestado por la producción de un gas de efecto invernadero especialmente persistente (BRUMME & BEESE, 1992). Hasta que el balance entre el secuestro de C y la producción de N₂O por los bosques se cuantifique correctamente, la mineralización de N debe ser tratada con mucha cautela.

Junto a la fertilización de N también hay que considerar otros efectos derivados de la deposición antrópica de N en los ecosistemas que vienen derivados del hecho de que para el secuestro de C en los diferentes compartimentos de los ecosistemas forestales se precisa en todos ellos de una cierta disponibilidad de N. Así, la hojarasca típicamente tiene una relación C:N entre 15 y 25, con valores altos en hojarascas recalitrantes y bajos incluso en los suelos minerales que sean fértiles. Según NADELHOFFER *et al.* (1999) si las proporciones C:N en la madera son 100:1, en la hojarasca puede ser del 20:1 al 30:1 y en el suelo mineral del 15:1 hasta 20:1. Es decir, que los ciclos biogeoquímicos del C y del N están vinculados. De manera que cuando el ecosistema carece de N, la tasa del crecimiento se retarda e incluso eventualmente se detiene. En consecuencia, para el secuestro de C en la

biomasa tan sólo se necesita un poco de N, pero para hacer efectivo el secuestro en el suelo tiene que haber más N disponible. En conclusión, sin N disponible el secuestro de C es mínimo, pero demasiado N puede acarrear nuevos problemas (formación de óxidos de nitrógeno).

7. Las enmiendas calizas. En el pasado se han realizado enmiendas calizas en muchos bosques de Europa Central y del Norte con las que se ha intentado controlar la acidez de los suelos y de las aguas superficiales. De esta manera se intentaba evitar una acidificación irreversible de los ecosistemas, movilizándose formas recalcitrantes de los suelos y de la hojarasca. Mediante la movilización de los nutrientes de la materia orgánica (K, Ca, Mg, N, P) se liberan y quedan a disposición de los árboles. Sin embargo, el objetivo de la movilización de la hojarasca entra en conflicto con el del secuestro de C y conduce indefectiblemente a pérdidas de C en los suelos (LUNDSTROM *et al.*, 2003).

8. Las perturbaciones (incendios y tormentas). Las alteraciones reiteradas implican la movilización de C y suponen una fuente de C potencialmente grande. La conservación de los ecosistemas y la adopción de sistemas de gestión que garanticen la máxima estabilidad es de gran importancia puesto que son necesarias décadas (en la biomasa) e incluso centurias (en el suelo) para recuperar los niveles de C previos a las alteraciones de los ecosistemas.

Los incendios siempre han desempeñado un papel integral en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas arbolados, especialmente en los bosques con estación seca. La estrategia de supresión del riesgo de incendios puede retrasar pero no puede evitar los incendios naturales a largo plazo. Es más, acarrea una aparente acumulación neta de C que de hecho representa una bomba de relojería en términos de emisión de C durante los fuegos catastróficos. El papel del fuego en los cambios de C de los ecosistemas no está muy claro. Diversos experimentos han demostrado que los incendios naturales han causado un incremento en el C del suelo, que puede aparecer incorporado a los suelos como carbón vegetal y que también puede entrar por una nueva vía de fijación de N₂ post-incendio. Al margen de ello, está claro que en bosques boreales y mediterráneos los incendios

naturales imponen unos límites en los tiempos de rotación.

Los daños por tormentas pueden aportar al suelo forestal una importante cantidad de residuos leñosos gruesos. Las dinámicas del C después de este tipo de perturbaciones se ven fuertemente afectadas por las prácticas de gestión, las cuales pueden incluir cortas a hecho y entresacas de la madera dañada. El descalzamiento de los árboles por los fuertes vientos destruye la estructura del suelo y temporalmente estimula los procesos microbiológicos. Después de dos años tras un descalzamiento en Rusia el ecosistema había perdido 2 t ha⁻¹ hacia la atmósfera durante los tres meses de verano (KNOHL *et al.*, 2002).

9. El drenaje de turberas. En suelos turbosos el exceso de agua dificulta la descomposición de la material orgánica del suelo y provoca la acumulación de C. La regulación hídrica estimula la productividad de las turberas arboladas y posibilita el establecimiento de un bosque en otra área de la zona turbosa carente de arbolado. La aireación de suelo estimula la descomposición y reduce el stock de C del suelo. En condiciones de calentamiento global y drenaje las turberas estarán más secas y el incremento de la actividad microbiana convertirá a las regiones boreales en fuertes emisoras de C. En los países nórdicos, aproximadamente 15 millones de hectáreas de turbera han sido drenadas para convertir las en bosques (MINKKINEN *et al.*, 2002). Las medidas directas de los balances de C en turberas no son frecuentes, aunque por término medio el drenaje por bosques disminuye las emisiones de CH₄, aumenta las emisiones de N₂O y de CO₂ desde la turba, pero también supone el aumento en el secuestro de C al ecosistema durante la primera generación de árboles.

Como resumen en relación a la gestión de los bosques, en las regiones donde las prácticas históricas de uso del territorio han reducido los stocks de C del suelo una opción para intentar recuperarlos es restaurar el tipo de bosque original de la zona. La restauración puede ser debida a una gestión activa o a procesos de recuperación serial provocados bien por deposición de N o por cambio climático. A este respecto los créditos contemplados en el artículo 3.4 del protocolo de Kyoto se restringen a los efectos de una gestión activa después del año 1990, pero no está previs-

to contabilizar los efectos indirectamente inducidos por el hombre en el secuestro de C.

Otra idea a destacar es que el proceso de estabilización de C es distinto a la simple acumulación de C. La acumulación está condicionada por factores del sitio que inhiben la respiración del suelo, como el exceso de humedad del suelo o las bajas temperaturas. Para un incremento sostenido de los contenidos de C en el suelo es necesario identificar sitios donde las propiedades de los suelos sean propicias para el secuestro de C y las propiedades de los suelos que favorecen la estabilización de C son la abundancia de superficies reactivas de minerales de arcilla y de óxidos. La evaluación de un amplio rango de actividades de gestión de los bosques han indicado que pocas prácticas son realmente buenas o malas con respecto al secuestro de C. Con frecuencia el impacto depende del grado de perturbación del suelo en el curso de las operaciones de corta o extracción de madera. Dos aspectos fundamentales son la cantidad y la calidad de la hojarasca (entrada de C) y la descomposición de la materia orgánica del suelo (salida de C). La optimización de la gestión forestal con respecto del secuestro de C debería garantizar en cuanto a las entradas una elevada productividad del bosque y en relación a las salidas debería evitar lo más posible perturbaciones en el suelo.

La gestión forestal no supone que automáticamente se puedan conseguir unas elevadas tasas en el secuestro de C. Para ello es recomendable mantener turnos de rotación largos y mini-

mizar las perturbaciones, apartándose de esta manera de las pautas marcadas por los mercados que demandan ciclos de producción más rápidos y cortas más tempranas. Además, esta gestión forestal comprometida con los criterios implicados en el secuestro de C proporciona al mercado una madera con fustes de grandes diámetros.

En definitiva, que los contenidos de C de suelos forestales pueden ser gestionados incrementando la productividad del bosque, con lo que se aumentarían las entradas de C al suelo, así como reduciendo las perturbaciones del suelo, lo que evitaría elevadas tasas de descomposición de la materia orgánica del suelo. Sin embargo, las reglas de valoración del Protocolo de Kyoto contemplan de muy distinta manera estas diferentes circunstancias. La conservación del estatus de un ecosistema requiere que no haya intervenciones humanas y esto no es contabilizable por los baremos de Kyoto, a pesar de que pueda suponer un secuestro de C adicional.

LOS SUELOS MEDITERRANEOS

Muchos suelos forestales de la zona mediterránea están en un importante estado de degradación debido a la larga historia de intenso uso agrícola. Según las ideas sobre la dinámica de la materia orgánica, el stock de C en un suelo forestal sin perturbaciones es máximo y cada perturbación conlleva pérdida de C, tal y como ocurre durante la cosecha en los suelos labore-

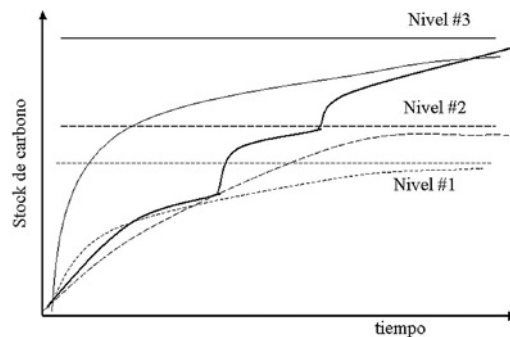


Figura 1. Diferentes niveles del stock de C son significativos para diferentes ecosistemas y diferentes tipos del uso del suelo. Alcanzar al nivel máximo necesita un cierto tiempo de maduración del ecosistema. Líneas finas: curso temporal para llevar al máximo nivel de C para ciertos usos de la tierra; línea gruesa: aumento fuerte del nivel del stock de C mediante cambios del uso de la tierra en dirección a un ecosistema con perturbaciones mínimas del suelo

dos en la agricultura. Por ello estos suelos siempre contienen menos C del que teóricamente es posible. En unas determinadas condiciones del sitio (altura, clima, geología) los suelos tienen un cierto nivel del stock de C, que es típico para cada uso de la tierra. La figura 1 muestra 3 niveles, que pueden representar el de un campo arado (nivel #1, con perturbaciones frecuentes), el de un pasto (nivel #2, con perturbaciones menos frecuentes), y el de un bosque (nivel #3, sin perturbaciones). Cambios en la gestión del suelo pueden suponer una disminución del nivel de C y después se necesita un cierto tiempo para restablecer dicho nivel otra vez. Esto es aplicable a diferentes métodos de gestión forestal, como elegir las especies de árboles, decidir el turno de rotación etc. Solamente el cambio de uso de la tierra a ecosistemas con mínimas perturbaciones ofrece la oportunidad de subir a altos niveles el stock de C y de explotar totalmente la capacidad de secuestro de C del sitio.

Son sitios donde la escasez de agua impone límites a la evolución del suelo, pero también es cierto que existen grandes áreas donde el uso de la tierra es mínimo donde los bosques, que crecen con pocas expectativas de obtener un rendimiento económico de la producción de madera, sin embargo poseen un importante potencial en el secuestro de C.

¿ES UN MITO EL SECUESTRO DE C EN LOS SUELOS?

Los modelos predicen que los suelos forestales de Europa tenderán a acumular C porque el cambio global provocará un aumento de la productividad los bosques, que en consecuencia producirán más follaje. Según los cálculos el aumento del stock de C por año estará entre el 32 y el 48% del aumento del C en la biomasa situada por encima del suelo. Para el año 2040 el secuestro de C en los suelos se situará entre el 61 y el 69% del secuestro en la biomasa. En los bosques de Europa central el secuestro de C en los suelos y la biomasa será más o menos igual. En el sur de Europa los suelos secuestrarán solamente un cuarto del secuestro en la biomasa. En este juego el proceso más importante en cuanto al suministro de C es la caída de la hojarasca. Este proceso está controlado por el método empleado en la cosecha y por las especies de árboles seleccionadas (Figura 2).

La recuperación del stock de C según las posibilidades (LAL, 2004) del 4% se corresponde con las emisiones antrópicas de solamente 10 años. Es decir que la utilización eficiente del potencial para secuestrar C en realidad no es más que un retraso en el tiempo que tardarán en alcanzarse niveles críticos de las concentraciones

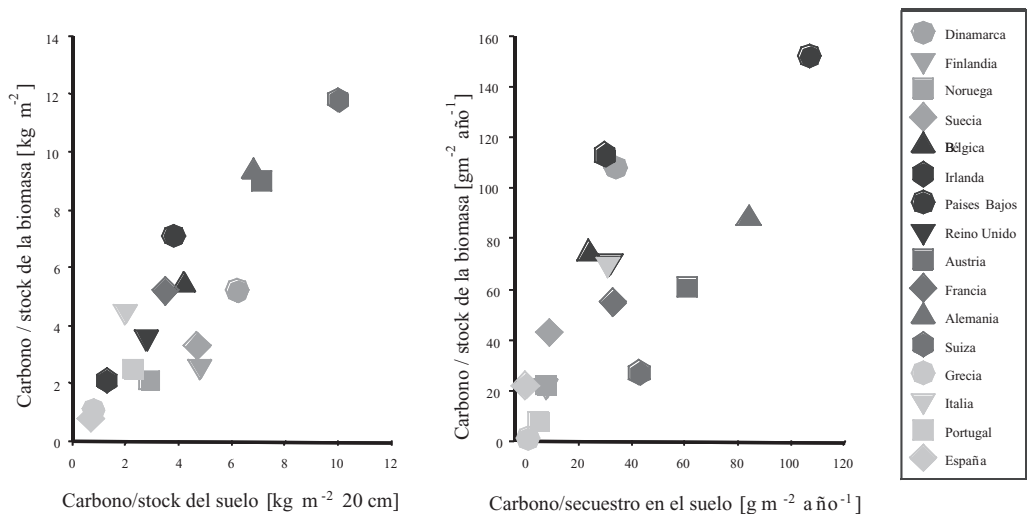


Figura 2: Stock de C en el presente (izquierda) y lo que se espera pueda ser secuestrado en bosques de Europa. Los colores representan las ecorregiones, según los modelos de LISKI et al., 2002

nes de CO₂ en la atmósfera, pero no es la solución definitiva en la lucha contra el cambio climático. Otro aspecto es el efecto de la sustitución de los combustibles fósiles puesto que la utilización de energía procedente de la biomasa podría reducir un 10% las emisiones por la combustión de energías fósiles.

La materia orgánica del suelo representa entre 1 y 12% (% C) de la masa del suelo y tiene implicaciones para la calidad del suelo a través de las propiedades químicas, físicas y biológicas en las que influye. Para los microorganismos la materia orgánica es el hábitat y para los heterótrofos incluso es el sustrato de donde obtener su energía (FISHER & BINKLEY, 2000). Se la denomina "oro negro" por su enorme importancia y por sus buenas características (LAL, 2004):

- aumenta la calidad del suelo (retención de nutrientes, ahorro de agua, estructura del suelo, actividad de los microorganismos)
- aumenta la productividad del suelo (selvicultura)
- afecta a la calidad del agua proveniente de la cuenca (por su papel como filtro)
- captura de potenciales gases de efecto invernadero (CO₂, NO_x, CH₄)
- aumenta la biodiversidad en el suelo

Los modelos de simulación de ciclos biogeoquímicos ofrecen estimaciones del stock de C en el suelo en las condiciones climáticas del futuro. Sin embargo, para su evaluación se necesitan experimentos prácticos. Respecto del stock de C existen dos líneas de opinión. Una plantea que el calentamiento estimulará la actividad de los microorganismos y los suelos se convertirán en grandes fuentes de CO₂. Sin embargo, la otra considera la gran estabilidad de una parte importante del C del suelo y sugiere que después de una corta fase de grandes pérdidas del C se alcanzaría muy rápidamente un nuevo estado de equilibrio (LISKI *et al.*, 2003b; MELILLO *et al.*, 2002).

BIBLIOGRAFÍA

- BATJES, N.; 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- BERG, B. & MEETEMEYER, V.; 2002. Litter quality in a north European transect versus carbon storage potential. *Plant Soil* 242: 83-92.
- BRUMME R. & BEESE, F.; 1992. Effects of liming and nitrogen fertilization on emissions of CO₂ and N₂O from a temperate forest. *J. Geophys. Res.* 97: 12851-12858.
- DE VRIES, W.; REINDS, G.J.; POSCH, M.; SANZ, M.; KRAUSE, G.; CALATYUD, V.; DUPOUEY, J.; STERBA, H.; GUNDERSEN, P.; VOOGD, J. & VEL, E.; 2003. Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe. *Tech. Rep. EC, UN/ECE*. Brussels.
- DIXON, R.K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.A.; SOLOMON, A.M.; TREXLER, M.C. & WISNIEWSKI, J.; 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- GUO L.B. & GIFFORD, R.M.; 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol.* 8: 345-360.
- FISHER R.F. & BINKLEY, D.; 2000. *Ecology and management of forest soils*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 3rd Ed.
- HAGEDORN, F.; SPINLER, D.; BUNDT, M.; BLASER, P. & SIEGWOLF, R.; 2003. The input and fate of new C in two forest soils under elevated CO₂. *Global Change Biol.* 9: 862-872.
- JOBBÁGY E.G. & JACKSON, R.B.; 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10: 423-436.
- JOHNSON D.W. & CURTIS, P.S.; 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *For. Ecol. Manage.* 140: 227-238.
- KNOHL, A., KOLLE, O.; MINAYEVA, T.; MILYUKOVA, I.M.; VYGODSKAYA, N.; FOKENS, T. & SCHULZE, E.-D.; 2002. Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biol.* 8: 231-246.
- KNOHL, A.; SCHULZE, E.-D.; KOLLE, O. & BUCHMANN, N.; 2003. Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany. *Agr. Forest Meteorol.* 118: 151-167.
- LAL, R.; 2004. Soil carbon sequestration impacts on climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.

- LISKI, J.; PERRUCHOU, D. & KARJALAINEN, T.; 2003. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *For. Ecol. Manage.* 169: 159-175.
- LISKI, J.; NISSINEN, A.; ERHARD, M. & TASKINEN, O.; 2003b. Climate effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biol.* 9: 575-584.
- LUNDSTRÖM, U.; BAIN, D.; TAYLOR, A. & VAN HEES, P.; 2003. Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes: A review. *Water, Air, and Soil Pollution, Focus* 3: 5-28.
- MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; ABER, J.D.; NEWKIRK, K.; LUX, H.; BOWLES, F.P.; CATRICALA, C.; MAGILL, A.; AHRENS, T. & MORRISSEAU, S.; 2002. Soil warming and carbon-cycle. Feedbacks to the climate system. *Science* 298: 2173-2176.
- MINKKINEN, K.; KORHONEN, R. ; SAVOLAINEN, T. & LAINE, J.; 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900-2100 - the impact of forestry drainage. *Global Change Biol.* 8: 785-799.
- NADELHOFFER, K.J.; EMMETT, B.A.; GUNDERSEN, P.; KJONAAS, O.J.; KOOPMANS, C.J.; SCHLEPPI, P.; TIETEMA, A. & WRIGHT, R.F.; 1999. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature* 398: 145-148.
- POST, W.M.; EMANUEL, W.R.; ZINKE, P.J. & STANGENBERGER, A.G.; 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298: 156-159.
- POST, W.M. & KWON, K.; 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6: 317-328.
- SCHULZE, E.-D.; WIRTH, C. & HEIMANN, M.; 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289: 2058-2059.
- STEVENSON, F.J.; 1982. *Humus chemistry*. Wiley & Sons. New York.
- USSIRI, D.A. & JOHNSON, C.E.; 2003. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods. *Geoderma* 111: 123-149.
- VESTERDAL L. & RAULUND-RASMUSSEN, K.; 1998. Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient. *Can. J. For. Res.* 28: 1636-1647