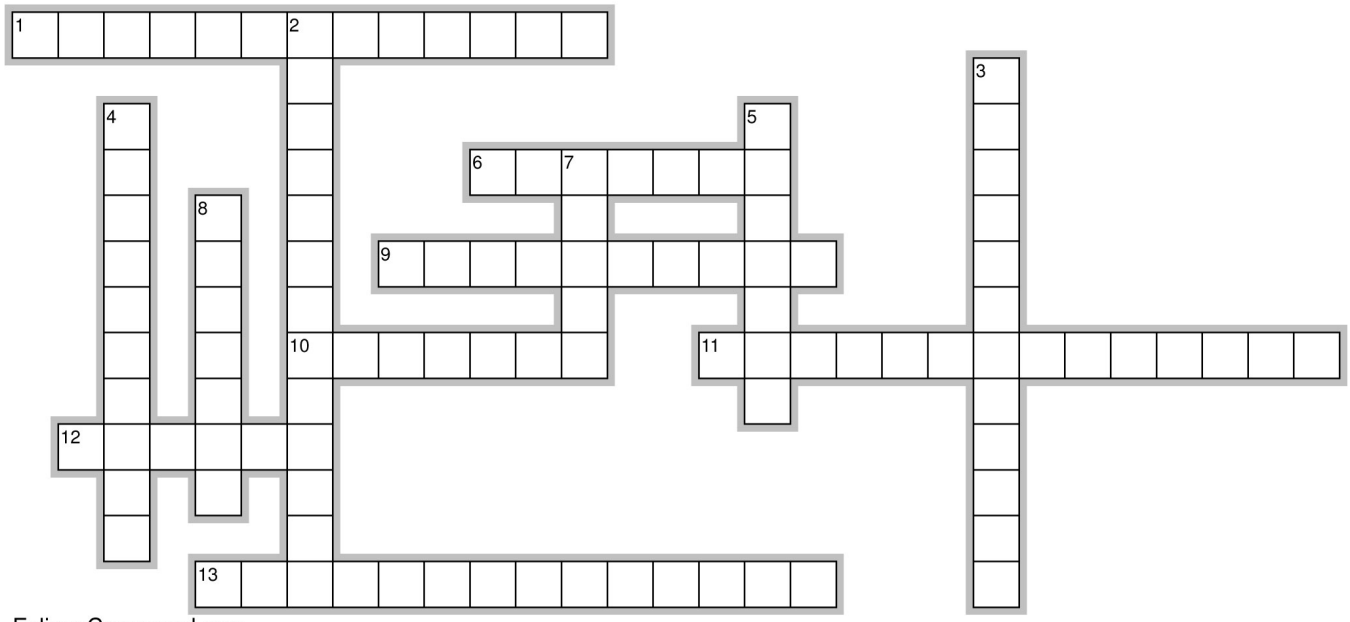
El secuestro forestal del carbono

20/03/2026

ÁRBOLES Y DECABORNIZACIÓN

A. REQUENA & VALLE DE ELDA, © 2026



EclipseCrossword.com

HORIZONTALES

1. Investigaciones recientes, sugieren que la hipótesis del secuestro forestal estable podría estar así, si no se consideran las pérdidas de carbono en el suelo profundo.
6. Los suelos bajo éstos maduros contenían aproximadamente la mitad del carbono presente en suelos que permanecieron como pastizales.
9. La biomasa aérea puede almacenar carbono durante décadas o incluso siglos, dependiendo de ésta de la especie.
10. Es en el suelo donde se juega el destino a largo plazo de éste.
11. Pero éste no se limita a la madera. Una fracción significativa del carbono capturado se transfiere al suelo a través de caída de hojas (hojarasca), exudados radiculares, muerte y renovación de raíces o restos orgánicos en descomposición.
12. La glucosa se polimeriza para formar celulosa, hemicelulosa y lignina, principales componentes de ésta.
13. El carbono profundo no es necesariamente inerte. Si cambian la humedad, la temperatura , la estructura radicular y la oxigenación, puede activarse ésta.

VERTICALES

2. Los pastizales poseen sistemas radiculares densos y finamente distribuidos, con alta renovación anual. Esto aporta carbono constantemente a capas de este tipo y medias del suelo.
3. Mediante ésta, los árboles capturan dióxido de carbono (CO2) atmosférico y lo transforman en biomasa: madera, hojas y raíces, retirándolo así del ciclo atmosférico activo.
4. Cuando los árboles aportan compuestos orgánicos frescos al suelo, estos estimulan esta actividad.
5. Tradicionalmente se pensaba que el carbono en suelos profundos era más así debido a su menor exposición a microorganismos y oxígeno. Sin embargo, los estudios recientes cuestionan esta premisa.
7. El problema no reside en la capacidad fotosintética de los árboles, que es incuestionable, sino en la estabilidad química y biogeoquímica del carbono almacenado, especialmente en el éste.
8. La plantación masiva de éstos se ha convertido en una de las estrategias más promovidas para mitigar el cambio climático.

La plantación masiva de árboles se ha convertido en una de las estrategias más promovidas para mitigar el cambio climático. La lógica parece sencilla, ya que mediante la fotosíntesis, los árboles capturan dióxido de carbono (CO_2) atmosférico y lo transforman en biomasa: madera, hojas y raíces, retirándolo así del ciclo atmosférico activo. Sin embargo, investigaciones recientes lideradas por el profesor Jens-Arne Subke (Universidad de Stirling), junto con Thomas C. Parker del The James Hutton Institute, y estudios encabezados por François-Xavier Joly (INRAE), sugieren que la hipótesis del secuestro forestal estable podría estar sobreestimada si no se consideran las pérdidas de carbono en el suelo profundo. Estos trabajos han sido publicados en revistas como Global Change Biology y el Journal of Environmental Management.

El problema no reside en la capacidad fotosintética de los árboles, que es incuestionable, sino en la estabilidad química y biogeoquímica del carbono almacenado, especialmente en el suelo. La cuestión central es ¿permanece el carbono capturado en formas estables durante siglos o milenios, o retorna a la atmósfera en escalas temporales relativamente cortas?

Desde el punto de vista químico, la fotosíntesis transforma CO_2 y agua en glucosa:

$$6CO_2 + 6H_2O + luz \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

La glucosa se polimeriza para formar celulosa, hemicelulosa y lignina, principales componentes de la madera. La biomasa aérea puede almacenar carbono durante décadas o incluso siglos, dependiendo de la longevidad de la especie.

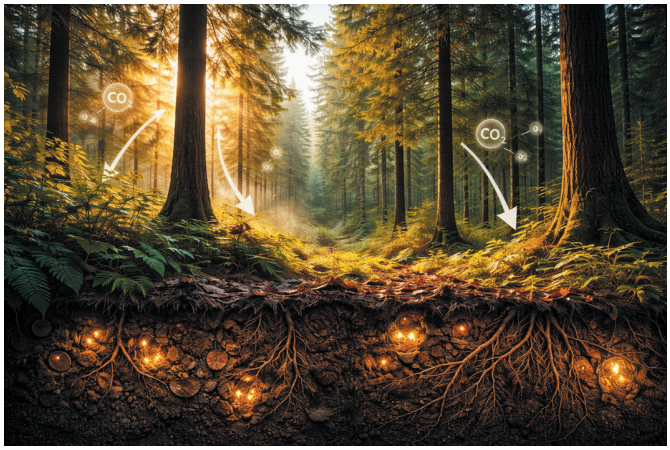
Pero el almacenamiento no se limita a la madera. Una fracción significativa del carbono capturado se transfiere al suelo a través de caída de hojas (hojarasca), exudados radiculares, muerte y renovación de raíces o restos orgánicos en descomposición. Es en el suelo donde se juega el destino a largo plazo del carbono.

El carbono del suelo no es homogéneo. Se divide en distintas fracciones con diferente estabilidad: materia orgánica particulada (POM) de restos relativamente recientes y fácilmente degradables; carbono asociado a minerales (MAOM), que es el carbono adsorbido en superficies de arcillas y óxidos metálicos y el carbono recalcitrante de las estructuras complejas como lignina modificada o compuestos aromáticos condensados.

La estabilidad depende de la complejidad molecular, la protección física en agregados del suelo, la adsorción química en minerales y la accesibilidad microbiana. Tradicionalmente se pensaba que el carbono en suelos profundos era más estable debido a su menor exposición a microorganismos y oxígeno. Sin embargo, los estudios recientes cuestionan esta premisa.

El estudio de Joly et al. (2025) mostró que en Escocia, al convertir pastizales templados en plantaciones de coníferas, el contenido de carbono mineral del suelo disminuía significativamente con el tiempo. Los suelos bajo bosques maduros contenían aproximadamente la mitad del carbono presente en suelos que permanecieron como pastizales.

¿Por qué ocurre esto? Los pastizales poseen sistemas radiculares densos y finamente distribuidos, con alta renovación anual. Esto aporta carbono constantemente a capas superficiales y medias del suelo. Las coníferas, en cambio tienen raíces más profundas pero menos densas, generan menor aporte constante en superficie y producen hojarasca más rica en lignina y compuestos fenólicos.



Cuando los árboles aportan compuestos orgánicos frescos al suelo, estos estimulan la actividad microbiana. Este fenómeno, conocido como priming effect, implica que los microorganismos no solo degradan el nuevo carbono, sino también el carbono antiguo previamente estabilizado.

Desde el punto de vista bioquímico los exudados radiculares contienen azúcares y aminoácidos; estos activan enzimas extracelulares, las enzimas degradan compuestos orgánicos complejos y se libera CO_2 por respiración microbiana. El resultado es una oxidación acelerada del carbono previamente almacenado.

Las coníferas suelen acidificar el suelo mediante la producción de ácidos orgánicos y la acumulación de hojarasca ácida. La acidificación disuelve complejos

organo-minerales, reduce la capacidad de adsorción de arcillas y libera carbono asociado a minerales. El carbono que estaba protegido químicamente puede quedar expuesto a degradación microbiana.

El carbono profundo no es necesariamente inerte. Si cambian la humedad, la temperatura , la estructura radicular y la oxigenación, puede activarse la descomposición. La introducción de raíces profundas modifica la dinámica redox del suelo y puede aumentar la disponibilidad de oxígeno, favoreciendo reacciones de oxidación.

Hoy sabemos que la estabilidad no depende solo de la complejidad molecular. Incluso compuestos "recalcitrantes" pueden degradarse si pierden protección física o mineral. En suelos forestales jóvenes, la reestructuración del perfil edáfico puede romper agregados y liberar carbono previamente encapsulado.

Al final, el balance neto de carbono, es un problema contable. El estudio escocés encontró que la pérdida de carbono del suelo equivalía aproximadamente a un tercio del carbono capturado por los árboles. Esto significa que la biomasa aumenta, pero el suelo pierde carbono y el balance neto es menor de lo estimado. Si además el carbono restante es menos estable, el riesgo de futura liberación aumenta.

El carbono almacenado en madera puede liberarse por incendios, tala, plagas y eventos climáticos extremos. El carbono del suelo puede liberarse por aumento de temperatura (aceleración metabólica microbiana), sequías prolongadas o cambios en uso del suelo. Desde el punto de vista termodinámico, la oxidación de compuestos orgánicos hacia CO_2 es energéticamente favorable. El suelo actúa como reservorio dinámico, no como almacén permanente.

Programas como el Woodland Carbon Code se basan en estimaciones de captura neta. Si no se incorporan pérdidas edáficas profundas se sobrestiman los créditos de carbono, se generan incentivos financieros distorsionados y se asume una permanencia que puede no existir. La investigación de Subke y Parker sugiere que la contabilidad del carbono debe integrar cambios en el carbono mineral, estabilidad a largo plazo y riesgo de reversión. ¿Significa esto que plantar árboles no sirve?
No. Los bosques regulan el ciclo hidrológico, aumentan biodiversidad, reducen erosión y mejoran microclimas. Pero no constituyen un "sarcófago" para la descarbonización.

Desde una perspectiva química y ecológica, el secuestro forestal es, condicional dependiente del tipo de suelo y dependiente del ecosistema previo. En muchos casos, preservar pastizales ricos en carbono puede ser tan o más eficaz que forestarlos.

En suma, la hipótesis de que plantar árboles constituye una solución directa y estable para descarbonizar la atmósfera debe matizarse. Los procesos químicos y biogeoquímicos del suelo muestran que el carbono no es simplemente capturado y almacenado de forma indefinida. Está sujeto oxidación microbiana, desestabilización mineral, cambios estructurales y retroalimentaciones climáticas.

El carbono del suelo es dinámico, no estático. La plantación de árboles puede aumentar la biomasa, pero simultáneamente desencadenar procesos que liberen carbono previamente almacenado. Por ello, la descarbonización efectiva requiere reducción directa de emisiones, transición energética, protección de ecosistemas ricos en carbono e investigación profunda sobre estabilidad edáfica.

La química del suelo nos recuerda que el ciclo del carbono no responde a soluciones simplistas. La naturaleza opera en equilibrios complejos, donde cada intervención tiene consecuencias no siempre intuitivas. La plantación de árboles puede ser parte de la solución, pero solo si entendemos con precisión científica qué ocurre bajo nuestros pies.

¿Cómo se explica entonces la formación del petróleo si el carbono puede liberarse con facilidad?
La aparente contradicción es muy interesante, porque si el carbono orgánico en suelos puede oxidarse y volver fácilmente a la atmósfera como CO_2, ¿cómo es posible que existan enormes reservas de petróleo formadas hace millones de años? La clave está en que la formación del petróleo ocurre bajo condiciones geológicas muy específicas, radicalmente distintas de las que dominan en los suelos forestales modernos.

El petróleo no procede principalmente de árboles, sino sobre todo de fitoplancton marino, microalgas y bacterias fotosintéticas. Estos organismos capturan CO_2 mediante fotosíntesis, igual que los árboles. Pero el destino posterior del carbono es diferente.

La condición crítica es el enterramiento rápido en ambientes anóxicos. En los suelos forestales hay oxígeno, hay intensa actividad microbiana hay ciclos húmedo-seco y el carbono se oxida fácilmente.
En cambio, el petróleo se forma cuando la materia orgánica se deposita en fondos marinos o lacustres, queda rápidamente enterrada y permanece en ambientes pobres en oxígeno (anóxicos).

Sin oxígeno, la oxidación completa:

Corgánico + O2 □ CO2
no puede producirse eficientemente.

Durante el enterramiento se compactan los sedimentos, aumenta presión y temperatura, se expulsan agua y gases ligeros y la materia orgánica se transforma en querógeno. El querógeno es una macromolécula compleja, rica en carbono, altamente polimerizada y químicamente más estable que la materia orgánica superficial. Este proceso se llama diagénesis.

A mayor profundidad (2–4 km aproximadamente), la temperatura entre 60°C y 150°C, hay ruptura térmica de enlaces y formación de hidrocarburos líquidos y gaseosos. Las reacciones dominantesson la descarboxilación, deshidratación y cracking térmico. Aquí se generan cadenas de hidrocarburos relativamente estables (alcanos, cicloalcanos, aromáticos). Este proceso tarda millones de años.

La diferencia fundamental con el carbono del suelo se recoge en la tabla siguiente
Suelos forestales
Formación de petróleo
Presencia de oxígeno
Ambiente anóxico
Microorganismos activos
Actividad biológica reducida

Temperaturas bajas
Altas presiones y temperaturas
Ciclos dinámicos
Aislamiento geológico
Escala: décadas–siglos
Escala: millones de años

El carbono del suelo es un reservorio dinámico. El petróleo es un reservorio geológicamente aislado.

La oxidación del carbono orgánico hacia CO□ es energéticamente favorable en presencia de oxígeno.
Pero en ambientes anóxicos profundos no hay aceptores de electrones abundantes, la degradación se frena y la materia orgánica puede preservarse. El enterramiento actúa como un "sarcófago geológico", algo que no ocurre en suelos forestales superficiales.

La formación masiva de petróleo coincide muchas veces con periodos de alta productividad oceánica, eventos anóxicos globales y cuencas sedimentarias con rápida subsidencia. Son situaciones excepcionales en la historia de la Tierra, no la norma ecológica.

Entonces, ¿por qué hoy no se está formando petróleo en gran cantidad? Porque los océanos modernos están mayoritariamente oxigenados, la materia orgánica suele reciclarse y las condiciones de enterramiento masivo son menos frecuentes. La biosfera actual está en equilibrio dinámico, no en modo de acumulación fósil masiva.

Esto nos ayuda a entender algo crucial que es que el carbono que capturan los árboles no queda enterrado en condiciones geológicas profundas, no sufre diagénesis ni catagénesis y permanece en sistemas abiertos y oxigenados. Por eso puede liberarse nuevamente. Para que el carbono sea verdaderamente estable durante millones de años necesita aislamiento físico, falta de oxígeno, enterramiento profundo y tiempo geológico. La plantación de árboles no reproduce esas condiciones.

No existe contradicción. El carbono en suelos forestales es biogeoquímicamente activo y el petróleo es carbono fosilizado bajo condiciones geológicas extremas. El primero pertenece al ciclo corto del carbono, mientras que el segundo pertenece al ciclo geológico profundo. Y esa diferencia de escala, química, física y, es la clave para comprender por qué el secuestro forestal no equivale a la fosilización natural del carbono.

ÁRBOLES Y DECABORNIZACIÓN

