



**2025** | **16-20**  
**GIJÓN** | **JUNIO**

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1826**

Actas del Noveno Congreso Forestal Español  
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**  
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





## Secuestro de carbono en el suelo como resultado de la forestación: cambios en la densidad aparente y en los carbonatos

ROVIRA CASTELLÀ, P. (1), JORDI GARCIA-PAUSAS (2), PERE CASALS-TORTRAS (2)

1. Suelos y Fertilizantes. Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)
2. Ecología Silvopastoral, Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

### Resumen

La forestación de terrenos baldíos o zonas agrícolas abandonadas resulta en una captura de carbono en el suelo. Dada la gran extensión en España de zonas agrícolas en fase de abandono, cuantificar adecuadamente esta captura es esencial de cara a futuros mercados del carbono a nivel internacional. Sin embargo, esta cuantificación puede estar seriamente sesgada por problemas no tenidos en cuenta por los investigadores. En este trabajo comentamos dos de ellos: (i) la captura de carbono puede quedar subestimada por ignorar los cambios en la compactación del suelo por los trabajos de forestación o simplemente por la disminución en su densidad aparente, debida al aumento del contenido de materia orgánica; (ii) en zonas calcáreas la captura de carbono puede ser sobreestimada si no se contabiliza la pérdida de carbonatos asociada a la acumulación de materia orgánica edáfica, y/o el cese del trabajo del suelo mediante el arado. En este trabajo analizamos los procesos fisicoquímicos y biológicos subyacentes a estos dos problemas, evaluamos el sesgo que pueden generar en la estimación del potencial de secuestro de carbono y, cuando es posible, proponemos métodos para corregirlo.

### Palabras clave

captación de carbono (368), forestación/reforestación (2461), carbono orgánico del suelo (2691), desarrollo de metodología (2157)

### 1. Introducción

Los suelos forestales suelen acumular un stock de carbono muy superior al de los suelos agrícolas; por ello la forestación de terrenos baldíos y/o zonas agrícolas abandonadas es vista generalmente como una oportunidad para el secuestro de carbono en el suelo, tanto si la forestación es activa (plantación forestal) como pasiva (desarrollo de un bosque subespontáneo). Una buena aproximación para estimar el potencial de secuestro es el estudio de cronosecuencias de forestación: una colección de parcelas forestales cuya edad puede conocerse al menos con aproximación suficiente. Idealmente la colección de parcelas debería incluir también parcelas representativas del tiempo 'cero': campos de cultivo, o terrenos baldíos representativos de la situación inicial. También es ideal disponer de bosques maduros en la zona, como referencia para estimar un estado final al cual debería llegarse a medio o largo plazo. Las buenas cronosecuencias no son fáciles de hallar, porque no es fácil que la colección de parcelas encontradas cumpla con las exigencias de homogeneidad en cuanto a su fisionomía, especie arbórea dominante, ubicación geográfica en un ámbito coherente y restringido, substrato geológico o – detalle crucial – uso previo de la parcela. Sin embargo, una buena cronosecuencia de forestación es una fuente magnífica de información, no sólo en lo referente al secuestro de carbono en el suelo – tema principal de este trabajo –



sino también sobre la recuperación de su fertilidad natural, propiedades fisicoquímicas, biota y, en resumen, la restauración natural del suelo en tanto que ecosistema en sí mismo.

Para el estudio del secuestro de carbono en el suelo, debe tenerse en cuenta el desarrollo del mantillo – horizontes de hojarasca:  $O_L$ ,  $O_F$  y  $O_H$  –, ausentes en general de los suelos de cultivo, y que deben ser objeto de muestreo y cuantificación aparte. Para el suelo mineral, ubicado debajo de los horizontes de hojarasca, la aproximación usual es el muestreo del suelo hasta una profundidad predeterminada, la cuantificación del stock de carbono acumulado correspondiente a esta profundidad, y la comparación sistemática de los stocks de carbono en las parcelas estudiadas. Es típico, también, el ajuste de curvas de acumulación de carbono, con el fin de fijar tasas anuales de captura. Por supuesto, esta aproximación tiene sus dificultades: problemas estadísticos como decidir el número de perfiles edáficos o catas que se deben tomar para obtener una estimación fiable del stock de carbono en cada parcela, o la elección de una curva adecuada para describir la acumulación de carbono en el suelo. En conjunto, sin embargo, se trataría de dificultades técnicas esperables.

Sin embargo, otros problemas pueden resultar en errores serios en la estimación del secuestro de carbono en el suelo, real o potencial, como resultado de la forestación. Este texto se focaliza en problemas raramente considerados, menos obvios que los anteriormente mencionados, pero muy reales, cuyo descarte *a priori* puede dar pie a sesgos relevantes en la estimación del potencial de secuestro de carbono en el suelo como resultado de la forestación, y en general como resultado del cambio de uso.

## 2. Objetivos

En este trabajo abordamos dos problemas metodológicos que afectan el cálculo del secuestro de carbono. Si bien centraremos el análisis en situaciones de forestación de suelos agrícolas abandonados, en realidad el análisis propuesto puede aplicarse a cualquier situación de cambio de uso.

- Los cambios en la densidad aparente del suelo, generalmente debidos al mismo aumento del contenido en carbono orgánico; y
- Los cambios en la riqueza en carbonatos del suelo, en áreas en que los suelos tienen un contenido de carbonatos apreciable.

La no consideración de estos problemas puede dar lugar a sesgos importantes en el cálculo del secuestro de carbono en el suelo, en ambos sentidos (ganancia/pérdida).

## 3. Nota metodológica previa

Para la comprensión de los problemas tratados en este trabajo es necesario un breve repaso de la metodología de cuantificación de stocks de carbono orgánico ( $C_o$ ) en el campo. Como mencionamos en un artículo previo (Rovira et al. 2015), mientras que cuantificar la concentración de  $C_o$  en una muestra de suelo es algo bastante trivial, calcular el stock total en un suelo no lo es.

El estudio de un perfil edáfico incluye la definición de una serie de capas ('horizontes'), que se describen y muestrean individualmente. Para cada horizonte se da, idealmente, (i) el grosor en cm, (ii) la densidad aparente de la tierra fina, en  $g\ cm^{-3}$ , y (iii) la pedregosidad grosera, por estimación visual. La muestra de suelo obtenida se lleva al laboratorio, donde se seca al aire y se tamiza a 2 mm, para obtener la *tierra fina* (< 2 mm), que será objeto de los análisis ulteriores. Al tamizar



se obtienen también los materiales groseros (> 2 mm): la *grava* cuyo peso debe cuantificarse, y los *fragmentos orgánicos groseros*, mayormente raíces muertas, que también deberían cuantificarse.

Finalmente, en la tierra fina se analiza – tras trituración en mortero – el carbono orgánico, por oxidación crómica o análisis elemental (Nelson & Sommers 1996). A partir de toda la información recabada, podemos calcular el stock de carbono en cada horizonte 'i':

$$C = Da \times (c / 100) \times (10000 \times Gr) \times (1 - P) \times (1 / 1000)$$

Siendo

C Stock de carbono orgánico total, en  $\text{kg m}^{-2}$ ;

Da Densidad aparente de la tierra fina, en  $\text{g cm}^{-3}$ ;

c Concentración de carbono orgánico, en %;

Gr Grosor del horizonte, en cm;

P Fracción (0 a 1) del volumen del horizonte ocupado por piedras y grava.

Si bien tiene muchas variantes, esta ecuación es universal, fácil de aplicar y al fin y al cabo bastante obvia. Algunos de sus parámetros, sin embargo, pueden ser muy problemáticos. Así, la medida *in situ* de la densidad aparente (Da) es difícil y laboriosa, y de hecho generalmente no se lleva a cabo. Puede estimarse mediante funciones *pedotransfer* (Honeysett & Ratkowski 1989, Barahona & Santos 1981, Manrique & Jones 1991, Rodríguez-Murillo 2001), que tendrán siempre un margen de error. También es problemática la estimación del volumen de piedras y grava: el volumen de piedras se estima *in situ*, por comparación con patrones visuales, pero las gravas se suelen obtener por peso al tamizar a 2 mm, y deben convertirse a volumen midiendo su densidad, algo tampoco usual en la práctica. Por supuesto, se pueden aplicar densidades estándar tomadas de la bibliografía para diversos tipos de roca (calizas, esquistos, areniscas, etc.), pero al no ser nunca estos valores exactamente la densidad de la grava que se está midiendo, el cálculo tendrá también un margen de error.

Los cambios en los stocks de carbono orgánico deben estudiarse en rangos de profundidad: un stock de, por ejemplo, 5 kg de carbono por metro cuadrado es más bien bajo si nos referimos a 1 m de profundidad, pero es alto si nos referimos a sólo 20 cm. Al estudiar los cambios en los stocks de carbono debe especificarse a qué profundidad se va a trabajar. Es común centrarse en la parte superior del suelo mineral (*topsoil*), típicamente los 30 cm superficiales, según recomendó en su momento el IPCC (1997). Esta aproximación asume que la parte profunda del perfil (de 30 a 100 cm, o similar) sufre escasos cambios como resultado de los cambios de uso, mientras que en la parte alta y media del perfil los cambios serán detectables: específicamente, el secuestro neto de carbono.

El establecimiento de 30 cm como profundidad estándar razonable de muestreo tiene como consecuencia que cavar calicatas profundas (*perfiles*) puede ser innecesario. El *perfil* clásico, tradicional en edafología, es bastante destructivo si se realiza en una parcela pequeña – algo común en zonas de relieve abrupto, montañosas –, por lo que el muestreo mediante sonda se impone a menudo. Para el



estudio de los cambios en los stocks de carbono son ideales las sondas que extraen del suelo una cata (cilíndrica o prismática) intacta, que respete la estructura original del suelo y que pueda subdividirse *in situ* en sectores de profundidad (por ejemplo, 0-5, 5-15 y 15-30 cm) (Figura X). A continuación, cada sector de cada cata es almacenado individualmente en una bolsa para su traslado al laboratorio, donde se disgrega para facilitar su secado y se seca al aire. Las muestras secas son entonces sometidas al procedimiento estándar en edafología: pesado de la muestra global, tamizado a 2 mm, y separación de tres grandes tipos de material: (1) tierra fina (material < 2 mm), (2) piedras y grava (> 2 mm), y (3) *necromasa*, fragmentos orgánicos (sobre todo raíces) > 2 mm. Para cada una de estas fracciones se obtiene el peso seco.

La fracción (1), la tierra fina, es la que más nos interesa, porque es sobre ella que se van a realizar los análisis. Específicamente, el análisis del carbono orgánico. Si obtenemos el C orgánico de una capa determinada (por ejemplo, 0-5 cm), podemos cuantificar inmediatamente el stock de carbono a esta profundidad:

$$C = M \times (c / 100) \times (10000 / \text{área}) \times (1 / 1000)$$

Siendo

C stock de carbono orgánico para esta capa, en  $\text{kg m}^{-2}$ ;

M masa de tierra fina (< 2 mm) para esta capa, en gramos, obtenida al tamizar;

c concentración de carbono orgánico de la tierra fina de esta capa, en %;

área área cubierta por la sonda, en  $\text{cm}^2$ .

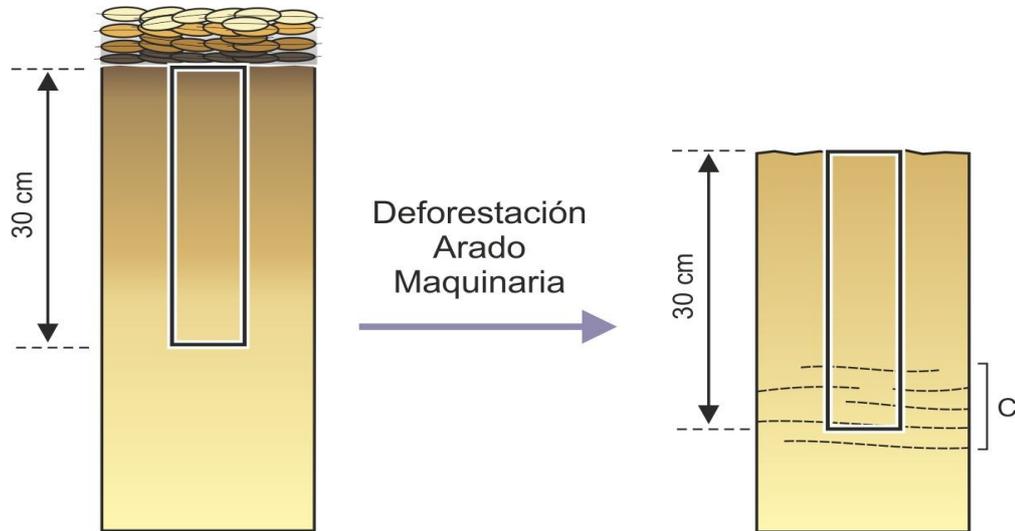
Obviamente, el stock de C orgánico total será la suma de todas las capas, hasta la profundidad deseada, 30 cm en nuestro caso. Obsérvese que en este método el stock de C queda automáticamente corregido por la pedregosidad, dado que el material > 2 mm se descarta y la tierra fina se cuantifica exactamente. Tampoco es necesario medir la densidad aparente de la tierra fina. Esta metodología puede considerarse ideal para cuantificar los stocks de carbono a nivel de parcela experimental. Por supuesto, no está exenta de problemas: no es útil para suelos extremadamente pedregosos, en los cuales la entrada de la sonda puede ser muy difícil. Quedan también detalles por resolver, como por ejemplo el número de catas necesario para tener una buena estimación del carbono (o de cualquier otro parámetro), que obviamente dependerá de la extensión de la parcela y su variabilidad espacial. Este tema, empero, queda fuera del alcance de este trabajo.

#### 4. Cambios en la densidad aparente del suelo

##### *Definición del problema*

El problema de la densidad aparente ( $D_a$ ), resumido en la Fig. 1, es inherente a la cuestión del secuestro de carbono en el suelo: la densidad aparente es inversamente proporcional al contenido de materia orgánica. Como resultado, el aumento de la concentración de carbono en los horizontes superficiales – resultado típico de la forestación – se traduce en un aumento de su grosor, lo que implica que sus 30 cm superficiales pueden no corresponder a los 30 cm superficiales del suelo original. Por otro lado, los suelos agrícolas pueden sufrir una compactación

notable – y, por tanto, un aumento de su densidad aparente – a consecuencia de prácticas como, por ejemplo, el paso reiterado de maquinaria pesada (tractor, cosechadora).



*Figura 1. Aumento de la densidad aparente del suelo como resultado de la deforestación, conversión a cultivo, y prácticas agrícolas agresivas (arado, maquinaria pesada). C: capa de compactación ('suela de cultivo'). El rectángulo interior sería una sonda introducida a 30 cm de profundidad.*

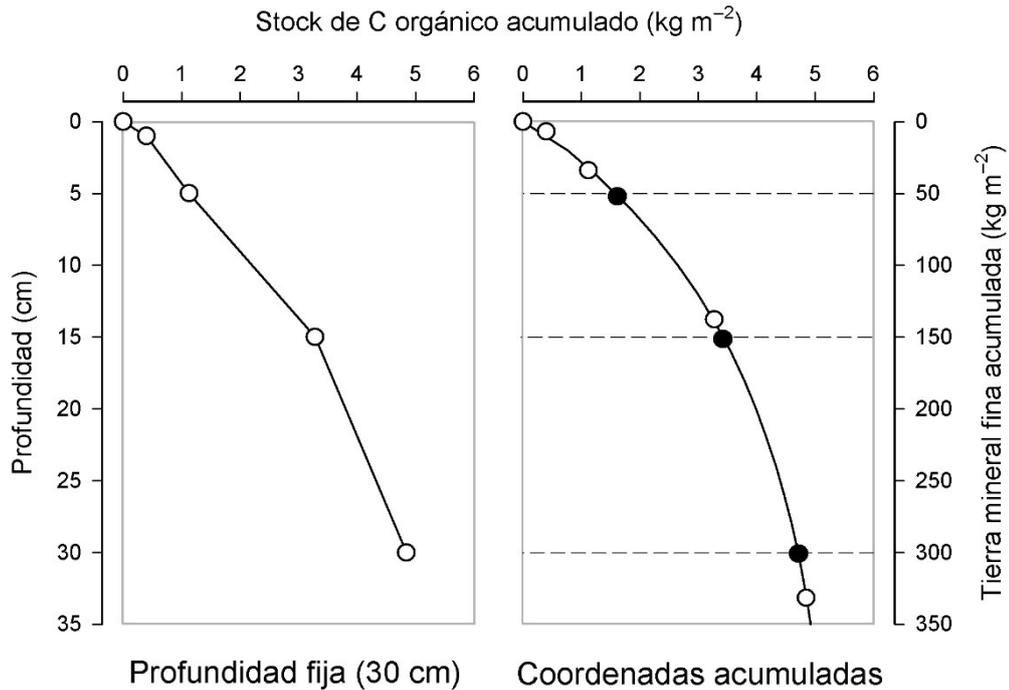
Como se sugiere en la figura 1, la consecuencia es que para los diversos suelos que tratemos de comparar, sus 30 cm superficiales no serán directamente comparables: por tanto, el simple cálculo de las diferencias entre los stocks de carbono a esta profundidad puede generar sesgos importantes en el cálculo del carbono secuestrado.

#### *Algunas soluciones al problema*

Este problema es conocido desde hace décadas, y han sido varias las soluciones propuestas, todas coincidentes en sustituir la profundidad fija (30 cm, o la que fuere) por otro criterio de comparación. Jenkinson (1971) fue pionero al proponer comparar los stocks de carbono en base a una masa fija de materia mineral, lo que llevaba al concepto de *profundidad equivalente*: el grosor necesario para llegar a una cantidad fijada de tierra fina mineral ('ignited fine soil'), grosor que obviamente podía variar de un suelo a otro. Gifford & Roderick (2003) retomaron la idea, tomando la 'igualdad de masa global' como criterio, incluyendo tanto las piedras como la materia orgánica, pero excluyendo los fragmentos gruesos de raíces. Wuest (2009) modificó este criterio, excluyendo las piedras, lo que le permitió comparar de modo muy elegante los stocks hídricos de suelos de cultivo afectados por diferencias de porosidad y grosor.

#### *Método de las coordenadas acumuladas (CCA)*

El método de las coordenadas acumuladas (Rovira et al 2015, 2022) se basa en los anteriores, en el sentido de comparar los stocks de carbono en base a una masa fija de material del suelo. Este material es la *materia fina mineral*, < 2 mm: excluyendo materia orgánica y piedras, en lo que difiere de las propuestas de Gifford & Broderick (2003) y Wuest (2009). En el fondo retoma la idea original de Jenkinson (1971), sólo que la exclusión de la materia orgánica se realiza por corrección a partir del C orgánico; por otra parte utiliza una aproximación lineal para realizar el ajuste.



*Figura 2. Mientras el método estándar (profundidad fija) compara el CO acumulado hasta una profundidad prefijada (30 cm), el método de las coordenadas acumuladas lo compara en base a una cantidad estándar de tierra fina mineral acumulada, lo que permite corregir los cambios en la compactación del suelo.*

El método está especialmente bien adaptado al trabajo con catas de suelo, por lo que en el ejemplo que damos a continuación supondremos que partimos de datos obtenidos de tales catas. A partir de los datos obtenidos para una cata en concreto, y para cada profundidad (0-5, 5-15, 15-30 cm) obtenemos la materia fina total (MF), la materia orgánica total (MO) y la materia mineral fina (MM), todas en kg m<sup>-2</sup>:

$$MF = M \times (10000 / \text{área})$$

$$MO = C \times 1.724$$

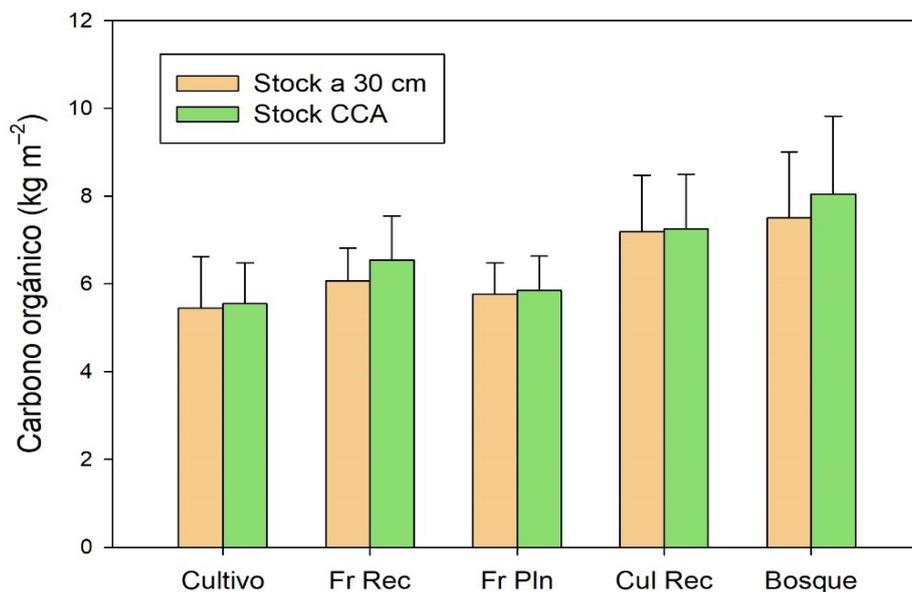
$$MM = MF - MO$$

(Véase el párrafo 3 para el significado de M, C y área). A partir de los contenidos de carbono y materia mineral fina para cada profundidad (C y MM, respectivamente) podemos calcular los contenidos acumulados (0-5, 0-15, 0-30), y obtener la curva del carbono acumulado en función de la masa mineral fina acumulada (Fig. 2). Suele obtenerse una curva exponencial simple o doble, con un ajuste excelente (a

menudo perfecto,  $R^2 = 1$ ), que permite calcular el carbono acumulado correspondiente a una cantidad predeterminada de materia mineral fina acumulada ( $MM_{AC}$ ). La elección de este valor predeterminado de  $MM_{AC}$  es crucial, porque puede determinar el resultado de las comparaciones.

*Ejemplo: cronosecuencia de forestación en Banyoles (Girona)*

Un ejemplo de la aplicación del método CCA puede encontrarse en Juvinyà et al. (2021), donde una cronosecuencia de forestación en Banyoles (Girona) fue estudiada simultáneamente por el procedimiento estándar (stocks hasta 30 cm de profundidad) y por el método de las coordenadas acumuladas (CCA), lo que permite obtener una visión bastante completa de la evolución del stock de C orgánico a lo largo del proceso de forestación.



*Figura 3. Cronosecuencia de forestación en Banyoles (Girona). Stocks de C orgánico para una profundidad fija (30 cm) o para una cantidad fija de materia mineral fina ( $425 \text{ kg m}^{-2}$ ) (método CCA). Tipos de uso: cultivos actuales (Cultivo), Frutales abandonados recolonizados por bosque (Fr Rec), Frutales abandonados con plantación forestal (Fr Pln), cultivos abandonados recolonizados por bosque secundario (Cul Rec), y Bosque maduro (Bosque). Las barras verticales son promedio de  $n = 5$  parcelas para Cultivo y Bosque,  $n = 3$  en los demás casos.*

En este estudio se compararon los stocks de C edáfico en (i) cultivos actuales, cultivados con cereal; (ii) bosques jóvenes, desarrollados en terrenos agrícolas abandonados; y (iii) bosques maduros, aparentemente nunca cultivados. Los bosques jóvenes pueden ser de varios tipos (plantados o subespontáneo, sobre antiguos cultivos arbóreos o sobre antiguos campos de cereal).

En este estudio tomamos la secuencia cultivo bosques jóvenes bosques maduros como base, lo que implica que la cantidad de materia mineral acumulada en los primeros 30 cm de los suelos de cultivo deben tomarse como punto de partida. La



aplicación del método CCA a los suelos bajo cultivo en este estudio dio una cantidad de  $425 \text{ kg m}^{-2}$  de materia mineral fina para una profundidad de 30 cm. Este valor se tomó como referencia: por el método de las coordenadas acumuladas se calculó el stock de C correspondiente a  $425 \text{ kg m}^{-2}$  de materia mineral fina para todos los grupos: los propios cultivos y los bosques, jóvenes y maduros.

Los stocks de C orgánico hasta 30 cm de profundidad (criterio: profundidad fija) y para los primeros  $425 \text{ kg m}^{-2}$  de materia mineral fina (criterio: masa equivalente) se muestran en la Figura 3. Las secuencias de aumento del stock de carbono son parecidas en ambos enfoques, pero bajo el criterio de la masa equivalente los stocks de C son consistentemente (pero no notablemente) superiores.

Los bosques maduros eran ya bosques crecidos en 1956, según las fotografías del Vuelo Americano de 1956, por lo que es razonable pensar que su stock de C edáfico se encuentra cerca del estado estable. En base a esta asunción, la comparación de los stocks de C hasta 30 cm de profundidad da una capacidad potencial de secuestro de carbono de  $2.05 \text{ kg m}^{-2}$ , que es la diferencia entre los stocks más bajos (cultivos:  $5.45 \text{ kg m}^{-2}$ ) y los más altos (bosques maduros:  $7.50 \text{ kg m}^{-2}$ ). Por el contrario, el método de las coordenadas acumuladas da una capacidad potencial de secuestro de carbono de  $2.50 \text{ kg m}^{-2}$ , diferencia entre los stocks más bajos (cultivos:  $5.55 \text{ kg m}^{-2}$ ) y los más altos (bosque maduro:  $8.05 \text{ kg m}^{-2}$ ) para los primeros  $425 \text{ kg m}^{-2}$  de materia mineral fina. Así, aun cuando en la Figura 3 las diferencias entre los stocks calculados por los dos métodos no parezcan substanciales, cuando se convierten a potenciales de secuestro de carbono dan pie a diferencias considerables. Lo que indica que ignorar los cambios en la densidad aparente del suelo resulta, en este ejemplo, en una subestimación del secuestro potencial de C del 20 %, lo que no es irrelevante.

## 5. Cambios en los carbonatos

### *Definición del problema*

Hasta el momento se ha hablado sólo de la acumulación de carbono orgánico ( $C_o$ ) en el suelo, y de hecho cuando se habla de secuestro de carbono en suelos se sobreentiende (casi siempre, al menos) que se habla de aumentar el stock de carbono orgánico. Sin embargo, en zonas calcáreas (caliza, margas, conglomerados calizos, sedimentos carbonatados, etc.), los suelos pueden ser ricos en carbonatos, y de hecho el stock de carbono inorgánico ( $C_i$  en adelante) puede superar ampliamente el stock de carbono orgánico.

Fue común durante mucho tiempo asumir que el stock de  $C_i$  era bastante inerte y estable, y que por tanto apenas sería afectado por los cambios en el stock de  $C_o$ : Schlesinger (1982) asumía que el turnover del  $C_i$  era del orden de millones de años. Pero estudios recientes han mostrado que los carbonatos del suelo pueden responder de modo rápido (aumentando o disminuyendo) a cambios de origen antrópico en las condiciones ambientales: por ejemplo, el aporte masivo de fertilizantes nitrogenados en forma amoniacal provoca picos masivos de nitrificación, proceso bioquímico que libera acidez al suelo y la consiguiente destrucción masiva de carbonatos (Raza et al. 2020).

Un proceso similar – aun cuando a menor escala – podría darse como consecuencia simple del aumento de materia orgánica en el suelo, aunque por otras vías:

- Los exudados radiculares contienen ácidos orgánicos de bajo Pm (málico, acético, cítrico, oxálico) que pueden atacar a los carbonatos en la interfaz

- raíz/suelo.
- La materia orgánica del suelo tiene un carácter ligeramente ácido (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos), y es concebible un efecto destructivo sobre los carbonatos, lento pero continuado, para obtener humatos y fulvatos cálcicos a costa de liberar  $\text{CO}_2$ .
  - Puede existir también un efecto indirecto: el aumento del contenido de materia orgánica, alimento para la microflora del suelo, se traduciría en un aumento de la biomasa microbiana y un aumento también de su actividad, con el consiguiente aumento de la liberación de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera del suelo, así como  $\text{HCO}_3^-$  en la solución, que resultaría – en especial en períodos de actividad intensa, por ejemplo tras un episodio lluvioso – en una disolución masiva de los carbonatos del suelo, parte de los cuales se liberarían a la atmósfera como  $\text{CO}_2$ .

No es evidente, por tanto, que los carbonatos del suelo deban permanecer inalterados durante la agradación del stock de  $\text{C}_0$  que se produce a medida que el bosque subespontáneo (o la plantación forestal) se desarrolla. En zonas geográficas calcáreas, el estudio de las cronosecuencias de forestación debe incluir el análisis de los carbonatos del suelo en su diseño experimental.

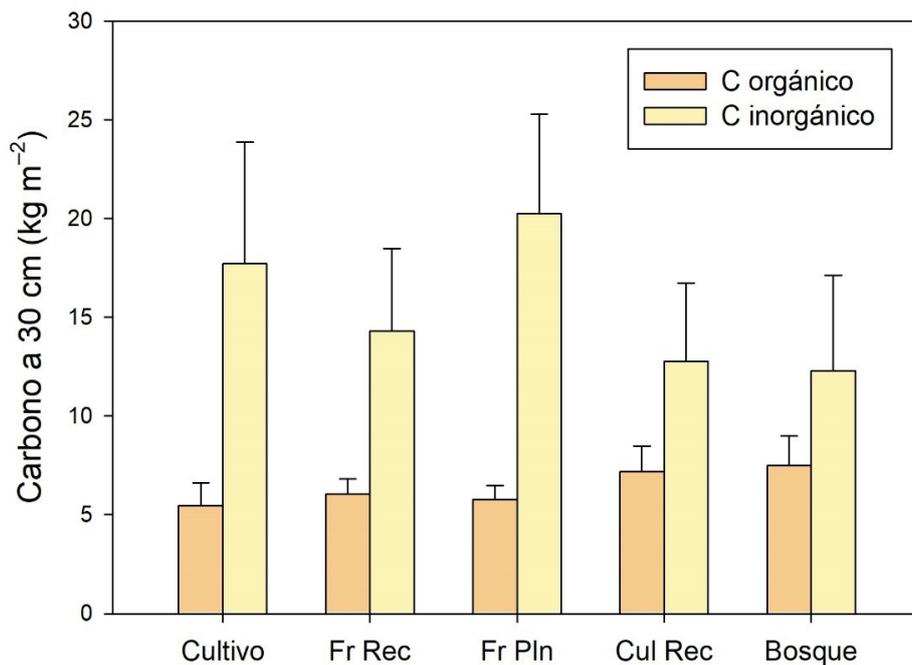


Figura 4. Stocks de C orgánico (materia orgánica) e inorgánico (carbonatos), hasta una profundidad de 30 cm. Más detalles en la leyenda de la Fig. 3.

*Ejemplo: cronosecuencia de forestación en Banyoles (Girona)*

La cronosecuencia de Juvinyà et al. (2021), que hemos utilizado como ejemplo para el secuestro de C orgánico, se encuentra en terrenos margosos, con elevado contenido de carbonatos. Es, pues, ideal para testar la idea anterior.

La Figura 4 muestra los contenidos de carbono orgánico e inorgánico hasta una



profundidad de 30 cm. Puede comprobarse cómo la agradación del stock de  $C_0$  parece quedar compensado (y de hecho anulado) por la pérdida progresiva de  $C_1$ . Obsérvese que la secuencia cultivo bosque maduro se traduce en una ganancia de  $2.05 \text{ kg CO m}^{-2}$ , la pérdida de carbono inorgánico es de  $17.73 - 12.28 = 5.45 \text{ kg C}_1 \text{ m}^{-2}$ . Lo que indica una pérdida neta de  $5.45 - 2.05 = 3.40 \text{ kg C}_1 \text{ m}^{-2}$  en la secuencia: es decir, que por cada kg de  $C_0$  secuestrado se pierden  $2.66 \text{ kg C}_1$  por descarbonatación. El balance neto de carbono en el suelo, debido a la forestación, sería negativo. Un resultado relevante, que merece un análisis a fondo.

En principio, una pérdida de más de 2.5 unidades de  $C_1$  perdidas por cada unidad de  $C_0$  secuestrada debería traducirse en una correlación negativa entre las concentraciones de  $C_0$  y CI en diferentes situaciones, pero no se detectó tal relación (Juvinyà et al. 2021, para una descripción detallada): para un tipo de parcela – cultivos activos, frutales reforestados, cultivos reforestados, bosque maduro – y para una profundidad concreta (0-5, 5-15 y 15-30 cm) no se detectó que un aumento de la materia orgánica se tradujera en una pérdida de carbonatos. Esto sugiere la posibilidad que la (aparente) enorme pérdida de carbonatos en la secuencia cultivos -> bosque maduro no tenga relación con el secuestro de carbono.

Una explicación alternativa es que lo que muestra la Figura 4 es, en realidad, una notable carbonatación de los suelos cultivados: no es que la forestación provoque una pérdida enorme de carbonatos, sino que el cultivo provoca una ganancia de carbonatos muy notable.

Mientras que prácticas agrícolas como la fertilización nitrogenada amoniacal (no nítrica) puede resultar en una descarbonatación notable del suelo (Raza et al 2020), otras prácticas pueden resultar en una carbonatación notable: por ejemplo, el arado. El arado supone una importante agresión física para la estructura del suelo: el surco generado es una vía para la pérdida masiva de  $\text{CO}_2$  procedente de la atmósfera del suelo (Reicosky et al. 2005, Reicosky & Archer 2007), y esta salida masiva de  $\text{CO}_2$  deberá traducirse en una precipitación masiva de carbonatos. Se trata de un episodio bien conocido de la química de los carbonatos en solución: los diferentes componentes del ciclo ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) coexisten en solución, en un delicado equilibrio, que se rompe cuando se produce una desgasificación, paulatina o súbita, por ejemplo debido al paso del arado: la desgasificación provoca la precipitación del  $\text{CaCO}_3$  en solución, paulatina o súbita (Salomons & Mook 1986; Rovira & Vallejo 2008). Los suelos sometidos a arado por métodos clásicos – tracción animal, arado mediterráneo – deberían enriquecerse en carbonatos de modo paulatino, en tanto que los suelos actualmente cultivados, trabajados con tractor y con arado de volteo, con surco más profundo y mayor volumen de suelo afectado, sufren una agresión física mucho mayor, susceptible de traducirse en una carbonatación masiva.

De acuerdo con este razonamiento, no parece probable que una descarbonatación tan drástica como la que sugiere la Fig. 4 sea real, concomitante con el secuestro neto de  $C_0$  a lo largo de la secuencia cultivos actuales bosques recientes bosques maduros. Más bien vemos creíble una secuencia compleja, con períodos sucesivos de carbonatación y descarbonatación sucesivas:

- A) Bosques maduros → Cultivos antiguos → Bosques recientes
- B) Bosques maduros → Cultivos antiguos → Cultivos recientes

La secuencia A refleja los pasos que razonablemente se han dado hasta llegar a los



boques recientes (recolonizados o plantados), en tanto que la secuencia B refleja los pasos que han llevado a los cultivos actuales. Todos los pasos de la secuencia se traducirían en un aumento de la carbonatación, salvo uno: el paso Cultivos antiguos Bosques recientes, en el cual el cese del arado y la recuperación de un bosque secundario (o el establecimiento de una plantación forestal) darían pie a una descarbonatación, más o menos intensa. Por el contrario, la secuencia Cultivos antiguos → Cultivos actuales, con el paso a una agricultura basada en el uso de maquinaria y un arado más enérgico, debería haberse traducido en una intensificación de la carbonatación.

Los campos de frutales replantados (Fr Pln) quedan fuera de este esquema, por su contenido en carbonatos, más alto incluso que el de los cultivos actuales. Hay que suponer que algún detalle de la gestión de estos cultivos – no identificada por el momento – podría haber resultado en un enriquecimiento anormal de los suelos en carbonatos.

En cualquier caso, que la descarbonatación drástica sugerida por la Fig. 4 sea probablemente irreal no significa que no pueda haber descarbonatación tras el abandono del cultivo y su sustitución por un bosque secundario o una plantación forestal. Nos parece poco creíble que los carbonatos del suelo permanezcan inalterados mientras el suelo se va enriqueciendo en materia orgánica, y de hecho nuestros muestreos en los primeros 5 cm muestran una relación negativa entre el enriquecimiento del suelo en  $C_0$  y el descenso del contenido de carbonatos (Rovira et al., en preparación), resultado que deberá estudiarse con atención.

## 6. Conclusiones

Hemos mostrado dos problemas a considerar en estudios acerca del secuestro de carbono en los suelos, como resultado de la forestación de suelos agrícolas abandonados. Para uno de los problemas (los cambios en la densidad aparente de los suelos) es posible proponer una solución que corrija los sesgos en la estimación del potencial de secuestro de carbono: el método de las coordenadas acumuladas (CCA). Como hemos visto, aun cuanto la adopción de este método no cambie de modo dramático la comparación de stocks entre diferentes usos del suelo, al trasladar la información numérica a potenciales de secuestro de carbono se observa que la subestimación de este potencial puede ser considerable.

Por el contrario, para el segundo de los problemas (incluir los carbonatos en el cómputo de los balances de carbono) queda aún camino por recorrer, fundamentalmente por la necesidad de comprender a fondo cómo reacciona el pool de carbono inorgánico a la acumulación de materia orgánica. En cualquier caso, es poco creíble que se comporte como un pool totalmente inerte, y es razonable suponer que pueden suceder pérdidas importantes, que implicarían sobreestimaciones importantes del secuestro de carbono en zonas calcáreas.

7. **Agradecimientos** El trabajo experimental referido en este artículo se realizó en el marco de los proyectos CRONOCARB y Terecova, financiados por el MICINN-MINECO.

## 8. Bibliografía

BARAHONA, E., SANTOS, E. 1981. Estudios de correlación y regresión de diversos parámetros analíticos de 52 perfiles de suelos del sector Montiel-Alcaraz-Bienservida (Ciudad Real-Albacete). An. Edafol. Agrobiol. 40, 761–773.



GIFFORD, R.M., RODERICK, M.L. Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression? *Glob. Chang. Biol.* 9, 1507–1514.

HONEYSETT, J.L., RATKOWSKI, D.A., 1989. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. *J. Soil Sci.* 40, 299–308.

IPCC, 1997. In: Houghton, J.T., MeiraFilho, L.G., Lim, B., Tréanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J., Callander, B.A. (Eds.), Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change. Meteorological Office, Bracknell, UK.

JENKINSON, D.S., 1971. The accumulation of organic matter in soil left uncultivated. In: Rothamsted Experimental Station Report for 1970, Part 2. Lawes Agricultural Trust, Harpenden, Herts, UK, pp. 113–137.

JUVINYÀ, C., LOTFIPARSA, H., SAURAS-YERA, T. & ROVIRA, P., 2021. Carbon sequestration in Mediterranean soils following afforestation of abandoned crops: Biases due to changes in soil compaction and carbonate stocks. *Land Degrad. Develop.* 32, 4300-4312.

MANRIQUE, L.A., JONES, C.A., 1991. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 476–481.

NELSON, D.W., SOMMERS, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* ASA-SSSA, Madison, USA, pp. 961–1010.

RAZA, S., MIAO, N.A., WANG, P., JU, X., CHEN, Z., ZHOU, J., KUZYAKOV, Y., 2020. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands. *Glob Change Biol.* 26, 3738–3751.

RODRIGUEZ-MURILLO, J.C., 2001. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biol. Fertil. Soils* 33, 53–61.

ROVIRA, P., VALLEJO, V.R., 2008. Changes in  $d^{13}C$  composition of soil carbonates driven by organic matter decomposition in a Mediterranean climate: A field incubation experiment. *Geoderma* 144, 517-534.

SALOMONS, W., MOOK, W.G., 1986. Isotope geochemistry of carbonates in the weathering zone. In: Fritz, P., Fontes, J.Ch. (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. The Terrestrial Environment*, B, vol. 2. Elsevier, Amsterdam, pp. 239–269.

SCHLESINGER, W.H., 1982. Carbon storage in the caliche of arid soils: a case study from Arizona. *Soil Sci.* 133, 247–255.

WUEST, S.B., 2009. Correction of bulk density and sampling method biases using soil mass per unit area. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 312–316.