

ACUMULACIÓN DE CARBONO EN SUELO ÁCIDO DIEZ AÑOS DESPUÉS DEL ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA SILVOPASTORAL CON *PINUS RADIATA*

Rocío Cuiña-Cotarelo, María Rosa Mosquera-Losada y Antonio Rigueiro-Rodríguez

Departamento de Producción vegetal. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. 27002-LUGO (España). Correo electrónico: mrosa.mosquera.losada@usc.es; antonio.rigueiro@usc.es

Resumen

Los sistemas agroforestales son reconocidos como un tipo de estrategia de secuestro de carbono en programas de reforestación tanto en tierras agrícolas como forestales. La implementación de prácticas agroforestales incrementa el contenido de carbono del suelo en comparación con sistemas exclusivamente agrícolas. El secuestro de carbono en el suelo puede ser modificado por el tipo de técnica de gestión (encalado, fertilización) aplicada para favorecer la productividad potencial del pasto y del arbolado. El objetivo de este estudio ha sido evaluar el efecto producido por la aplicación en cobertera de 2,5 Mg·ha⁻¹ de CaCO₃ y de dos dosis de lodo de depuradora urbana: 50 y 100 kg N total·ha⁻¹ sobre la capacidad de secuestro de carbono de un sistema silvopastoral establecido en suelo ácido y repoblado con *Pinus radiata*. El resultado obtenido refleja un incremento del contenido de carbono en el suelo diez años después del establecimiento del sistema silvopastoral en función de la tasa de mineralización de la materia orgánica en cada tratamiento aplicado.

Palabras clave: *Materia orgánica, Fertilización, Enmiendas calizas, Lodo de depuradora urbana*

INTRODUCCIÓN

La acumulación de dióxido de carbono y de otros gases de efecto invernadero en la atmósfera está directamente relacionada con el cambio climático. Los sistemas agroforestales han sido reconocidos por el Protocolo de Kyoto como una estrategia de mitigación de estos gases de efecto invernadero, debido al potencial de almacenamiento de carbono que presentan los diferentes componentes que los conforman: árbol, pasto y suelo (FERNÁNDEZ-NÚÑEZ et al., 2010). De hecho, es ampliamente reconocido el importante papel de los suelos sobre el balance global de carbono en la atmósfera, siendo el destino final de la mayor parte del carbono fijado por la fotosíntesis en los

ecosistemas terrestres (DRESNER et al., 2007) en donde puede residir cientos de años (BOUWMAN, 1990). Sin embargo, los cambios de uso de la tierra (forestaciones versus deforestaciones), los incendios forestales, las variaciones de temperatura y precipitaciones, las características edáficas, tanto a escala temporal como espacial, la heterogeneidad del territorio, la condición de tratarse de masas de coníferas o de frondosas, son factores con efectos sobre el contenido y flujo de carbono desde los suelos a la atmósfera y viceversa (PARDOS-CARRIÓN, 2010). En Galicia, los suelos de monte presentan una baja fertilidad debido a su fuerte acidez, la cual se puede reducir mediante el empleo de enmiendas calizas (LÓPEZ-MOSQUERA, 1995). La fertilización con lodos de depuradora

urbana en terrenos forestales está promovida por la UE (86/278/CEE) y la legislación española (RD 1310/90) debido a las mejoras físicas que causa en el suelo. El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el efecto residual del encalado y de dos dosis de depuradora urbana sobre la capacidad de acumulación de carbono en suelo diez años después del establecimiento de un sistema silvopastoral repoblado con *Pinus radiata*.

MATERIAL Y MÉTODOS

La experiencia fue realizada en el monte comunal de San Breixo, perteneciente a Parga, en el municipio de Guitiriz (Lugo), situado a una latitud de 43° 0,92', longitud de 7° 46,9' y a una altitud de 550 m sobre el nivel del mar. En el año 1998 se realizó una plantación con *Pinus radiata* D. Don a una densidad de 1667 árboles por hectárea (marco 3 x 2 m), tras efectuar una corta a hecho de árboles de la misma especie con una edad aproximada de 30 años. El estrato arbustivo de esta repoblación estaba constituido por un brezal, siendo las especies más abundantes *Erica cinerea* L., *Calluna vulgaris* L., *Pterospartum tridentatum* L., *Rubus* spp., etc., y algunas herbáceas como *Avenula sulcata* J. Gay ex Delastre, *Agrostis curtisii* Kerguelen, *Holcus mollis* L. etc., todas ellas frecuentes en nuestros montes. La experiencia se inició en octubre del año 1999 cuando la masa de *Pinus radiata* D. Don tenía la edad de un año, estableciéndose para ello 15 parcelas o unidades experimentales de 12 m x 8 m (96 m²) constituidas cada una por 25 árboles, dispuestos en un cuadrilátero de 5 x 5 árboles. El diseño experimental era de bloques al azar con tres réplicas. En octubre del año 1999 se procedió a la preparación del terreno mediante un desbroce mecanizado y un subsolado entre las líneas de plantación, ya que esta preparación sencilla había dado buen resultado en otras zonas de monte (RIGUEIRO-RODRÍGUEZ et al., 1998), y a continuación se aplicó la cal en cobertera al suelo en las parcelas en las que correspondía aplicar este tratamiento. Un mes después, en noviembre, se realizó una siembra a voleo de 25 kg·ha⁻¹ de *Lolium perenne* L. var. Brigantia, 4 kg·ha⁻¹ de *Trifolium repens* L. var. Huia y 10 kg·ha⁻¹ de *Dactylis glomerata* L. var. Artabro.

Se aplicaron 5 tratamientos en los que existe combinación de encalado (C) (2,5 Mg·ha⁻¹ de caliza dolomítica molida) y no encalado, con dos dosis de lodo de depuradora que implicaban 50 (B: baja) y 100 kg (A: alta) N total·ha⁻¹, aplicadas de forma continuada y en el mes de febrero durante los años 2000, 2001, 2002, 2003 y 2004. El lodo se aplicó de forma manual y en cobertera. Además, se estableció un tratamiento control (NF) que consistió en la ausencia de encalado y fertilización.

El lodo usado como abono nitrogenado en este ensayo fue facilitado por la planta depuradora de aguas residuales de Lugo (Gestagua, S.A.). Este fango está tratado y estabilizado de forma anaeróbica y cumple los requisitos necesarios para ser usado en agricultura (RD 1310/1990). El cálculo de las cantidades necesarias de lodo se realizó en función del contenido de nitrógeno que tenía el residuo en cada año. Para ello, se procedió a su análisis mediante el método microkjeldahl (CASTRO et al. 1990). Se hizo también el cálculo de la proporción de materia seca del lodo, ya que la aplicación fue realizada en fresco. Se realizó un análisis del contenido de N en el lodo antes de cada aplicación, ya que el nitrógeno es un elemento que presenta una gran variabilidad a lo largo del año (MOSQUERA-LOSADA & RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, 2002; MOSQUERA-LOSADA et al., 2009). Dosis más altas a las empleadas en este estudio merman el crecimiento forestal por aumentar la competencia entre el pasto y el arbolado y pueden generar, probablemente, contaminación por nitratos (EGIARTE et al., 2005).

En enero del año 2010 se procedió a la recogida de las muestras de suelo a cuatro profundidades diferentes del perfil edáfico: 25 cm, 50 cm, 75 cm y 100 cm. Los parámetros del suelo se analizaron a partir de las muestras recogidas a diferentes profundidades por medio de muestreos aleatorios en cada una de las unidades experimentales. Cada muestra es el conjunto de 3 muestreos tomados de forma aleatoria por parcela. Una vez obtenidas las muestras, éstas fueron llevadas al laboratorio, se dejaron secar al aire y se tamizaron empleando un tamiz de luz de 2 mm. La determinación del carbono se realizó mediante un analizador de la marca LECO y modelo CNS-2000, el cual se basa en la combustión dinámica de la muestra, reduciendo los gases formados para, poder pasar por un sistema

de triple detección (LECO, 1996). Al multiplicar el contenido total de carbono por el factor de Van Bemmelen (1,7249), se obtiene la materia orgánica. Con el contenido de carbono y la densidad del suelo se calculó la cantidad de carbono edáfico en $\text{Mg}\cdot\text{C}\cdot\text{ha}^{-1}$. Los resultados se analizaron mediante el uso del ANOVA, y las medias se separaron mediante el test LSD, para lo que se utilizó el paquete estadístico SAS (2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado del ANOVA obtenido nos indica que únicamente se encontró una respuesta significativa del porcentaje de carbono edáfico a las dosis de lodo aplicadas en este estudio ($p < 0,05$) a 25 cm de profundidad, no siendo significativa la respuesta encontrada en las restantes profundidades. Al comienzo de esta experiencia (año 1999) se realizó un análisis de una muestra inicial de suelo, en donde se obtuvo un porcentaje de carbono edáfico de 5,07 % ($139,42 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$) a 25 cm de profundidad, lo que nos indica que a la vista del contenido de C obtenido en enero del año 2010 a esta misma profundidad (Tabla 1), se produjo una acumulación de este parámetro en suelo en todos los tratamientos evaluados, coincidiendo con lo descrito por FERNÁNDEZ-NÚÑEZ *et al.* (2010) y HOWLETT *et al.* (2010) en sistemas silvopastorales establecidos sobre terrenos agrícolas reforestados con *Pinus radiata*. El contenido de carbono acumulado en el suelo del tratamiento control de nuestro estudio ($193,49 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$) fue superior al descrito por FERNÁNDEZ-NÚÑEZ *et al.* (2010) en suelo agrícola sin fertilizar para una edad de la masa de pino radiata de once años ($145,75 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ y a $130,48 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ a densi-

dades de $2500 \text{ pies}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $833 \text{ pies}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente), probablemente debido al mayor pH descrito en terreno agrícola, lo que favoreció la mineralización de la materia orgánica en el suelo, disminuyéndose por tanto el contenido de carbono edáfico en el mismo (EGIARTE *et al.*, 2005). Sin embargo, el contenido de carbono acumulado en los primeros 25 cm del perfil del suelo de nuestro estudio fue similar al descrito por CONANT *et al.* (2001) ($192 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$) para suelos forestales de Galicia de tipo Umbrisol (mismo tipo de suelo que en nuestro estudio).

No se obtuvieron diferencias significativas producidas por la aplicación de enmiendas calizas sobre el porcentaje de carbono encontrado en los primeros 25 cm del perfil del suelo de nuestro estudio (Figura 1), quizás porque el aporte de cal provocó un aumento de la tasa de mineralización, disminuyendo por lo tanto el contenido de carbono en el suelo. Sin embargo, se observa como la aplicación de dosis bajas de lodo, independientemente de que se combinen con cal, producen un incremento significativo del porcentaje de carbono edáfico en relación al contenido de carbono obtenido en las parcelas que recibieron dosis altas. El mayor porcentaje de carbono edáfico obtenido en las parcelas que recibieron dosis bajas de lodo de depuradora puede justificarse por la disminución de la relación C/N que producen la aplicación de dosis más altas, aumentando la tasa de mineralización de la materia orgánica (BUNKER *et al.*, 2005; KIRBY & POTVIN, 2007).

CONCLUSIONES

Se obtiene un incremento del contenido de carbono orgánico del suelo de las diferentes

Tratamientos		% C	$\text{Mg}\cdot\text{C}\cdot\text{ha}^{-1}$
CAL	B1	7,43	204,38
	A1	5,6	154,06
NO CAL	B1	8,06	221,77
	A1	5,93	163,12
NF		7,04	193,49

Tabla 1. Porcentaje de carbono edáfico y contenido de carbono acumulado en los primeros 25 cm del perfil del suelo ($\text{Mg}\cdot\text{C}\cdot\text{ha}^{-1}$) de los diferentes tratamientos aplicados en este estudio durante el año 2010. Donde: CAL: $2,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de CaCO_3 , B1: dosis bajas de lodo de depuradora urbana ($50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N total); A1: dosis altas lodo de depuradora urbana ($100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N total); NF: tratamiento control

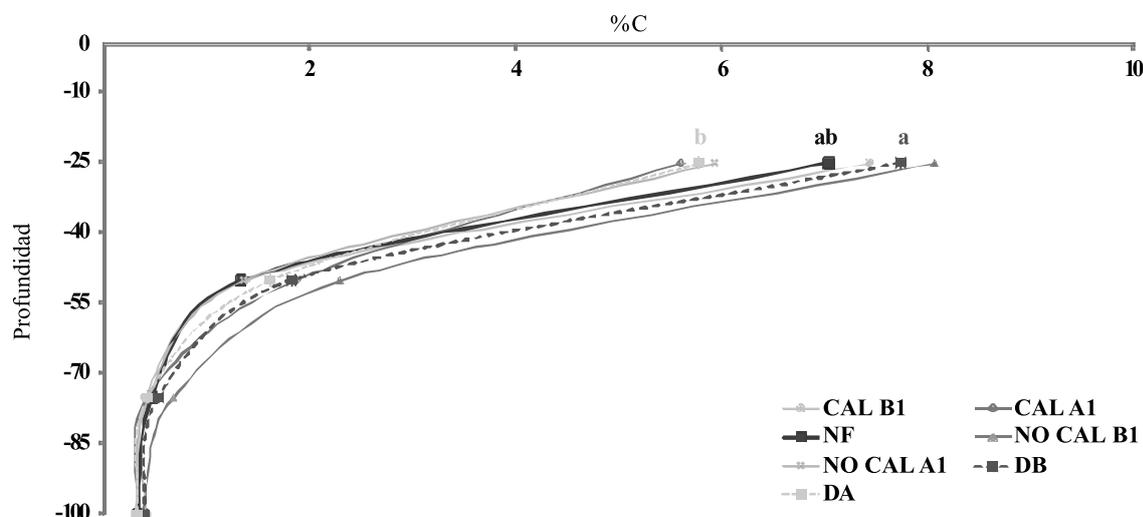


Figura 1. Porcentaje de carbono edáfico encontrado en el suelo de este estudio a diferentes profundidades (25, 50, 75 y 100 cm) durante el año 2010. Donde: B1: dosis bajas de lodo de depuradora urbana ($50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N total); A1: dosis altas de lodo de depuradora urbana ($100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N total); NF: tratamiento de control o No Fertilización; DB: media de las dosis altas de lodo de depuradora urbana aplicadas; DA: media de las dosis altas de lodo de depuradora urbana aplicadas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos

parcelas experimentales diez años después del establecimiento del sistema silvopastoral, en función del efecto de los diferentes tratamientos sobre la tasa de mineralización de la materia orgánica.

Agradecimientos

Los trabajos de investigación conducentes a la elaboración de este trabajo se realizaron con recursos económicos cofinanciados por el FEDER, a través de la ayuda concedida al grupo de investigación de Sistemas Silvopastorales de la Universidad de Santiago de Compostela en el marco de la convocatoria de la Xunta de Galicia de ayudas para la consolidación y estructuración de unidades de investigación competitivas del Sistema Universitario de Galicia.

BIBLIOGRAFÍA

- BOUWMAN, A.F.; 1990. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: A.F. Bouwman, (ed.), *Soils and the Green House Effect*: 61-127. Wiley. Chichester.
- BUNKER, D.E.; DECLERK, F.; BRADFORD, J.C.; COLWELL, R.K.; PERFECTO, I.; PHILLIPS, O.L.; SANKARAN, M. & NAEEM, S.; 2005. Species loss and above-ground carbon storage in a tropical forest. *Science* 310(5750): 1029-1031.
- CASTRO, P.; GONZÁLEZ, A., Y PRADA, D.; 1990. Determinación simultánea de nitrógeno y fósforo en muestras de pradera. *XXX Reunión científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 200-207.
- CONANT, R.T.; PAUSTIAN, K. & ELLIOTT, E.T.; 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecol. Appl.* 11(2): 343-355.
- DIRECTIVA 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. *DOCE* nº L 181 de 04/07/1986 0006: 12.
- DRESNER, S.; EKINS, P.; MCGEEVOR, K. & TOMEI, J.; 2007. Forest and climate change global understandings and possible responses. In: P.H. Freer-Smith, M.S.J. Boradmeadow & J.M. Lynch (eds.), *Forestry and climate change*: 38-48. CAB International. Wallingford.
- EGIARTE, G.; CAMPS, M.; ALONSO, A.; RUÍZ-ROMERA, E. & PINTO, M.; 2005. Effect of repeated applications of sewage sludge on the fate of N in soils under Monterey pine stands. *Forest Ecol. Manage.* 216: 257-269.

- FERNÁNDEZ-NÚÑEZ, E.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A. & MOSQUERA-LOSADA, M.R.; 2010. Carbon allocation dynamics one decade after afforestation with *Pinus radiata* D. Don and *Betula alba* L. under two stand densities in NW Spain. *Ecol. Eng.* 36(7): 876-890.
- HOWLETT, D.S.; MOSQUERA-LOSADA, M.R.; NAIR, P.K.R.; NAIR, V.D. & RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; 2011. Soil carbon storage in silvopastoral systems and treeless pasture in northwestern Spain. *J. Environ. Qual.* 40: 1-8.
- KIRBY, K.R. & POTVIN, C.; 2007. Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecol. Manage.* 246(2-3): 208-221.
- LECO, 1996; CNS-2000 *Elemental Analyzer - Instruction Manual*. LECO Corp., St. Joseph, MI.
- LÓPEZ-MOSQUERA, M.E.; 1995. *Enmiendas. Corrección de la acidez. Encalado. Gestión de la materia orgánica en explotaciones Agrícolas*. (Monografía docente). Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN; 1990. Real Decreto 1310/1990, de 29 de Octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. *BOE* 26: 32339-32340 (DE 1/11/1990).
- MOSQUERA-LOSADA, M.R. & RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; 2002. Variability of sewage sludge parameters. Implications on fertilization uses. *VII European Society for Agronomy Congress*: 393-394. Córdoba.
- MOSQUERA-LOSADA, M.R.; MUÑOZ-FERREIRO, N. & RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; 2009. Agronomic characterization of different types of sewage sludge: policy implications. *Waste Manage.* 30 (3): 492-503.
- PARDOS-CARRIÓN, J.A.; 2010. *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid.
- RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; SILVA-PANDO, F.J.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; CASTILLÓN-PALOMEQUE, P.A.; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P.; MOSQUERA-LOSADA, M.R.; ROMERO-FRANCO, R. & GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, M.P.; 1998. *Manual de sistemas silvopastorales*. Proyecto Columella. Escola Politécnica Superior (Lugo). <http://www.agrobyte.com/agrobyte/publicaciones/silvo/indice.html>
- SAS.; 2001. *SAS/ Stat User's Guide: Statistics*. Editorial SAS Institute Inc. USA.