



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Efecto del porcentaje de mezcla en la acumulación de carbono en suelo y hojarasca en masas de pino-haya

GETINO, M.^{1,6}, BRAVO, F.^{2,6}, SAN-MARTIN, R.^{3,6}, PACH, M.⁴, UHL, E.⁵, y TURRIÓN, M.B.^{1,6}

¹ Dpto. Ciencias Agroforestales, ETSIIAA Palencia, Universidad de Valladolid (España).

² Dpto. Producción Vegetal y Recursos Forestales, ETSIIAA Palencia, Universidad de Valladolid (España).

³ Dpto. Estadística e Investigación Operativa, ETSIIAA Palencia, Universidad de Valladolid (España).

⁴ Department of Forest Ecology and Silviculture, Faculty of Forestry, University of Agriculture, Krakow (Poland).

⁵ Chair of Forest Growth and Yield Science, School of Life Sciences Weihenstephan, Technical University of Munich, Freising (Germany).

⁶ Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible, UVa-INIA. ETSIIAA Palencia (España).

Resumen

El estudio de los bosques mixtos está alcanzando gran relevancia debido a las evidencias de que pueden suministrar numerosos servicios ecosistémicos de manera más eficiente, entre ellos, su función como sumidero de CO₂ atmosférico. En este estudio evaluamos el secuestro de carbono en suelo y hojarasca en masas mixtas frente a masas puras de *Pinus sylvestris* L. y *Fagus sylvatica* L. Para ello, se estudiaron 9 parcelas (3 por tipo de masa; pino, haya, mixta) localizadas en Niepołomice (Polonia) y Schobenhausen (Alemania). Se establecieron 40 subparcelas de muestreo, cubriendo un amplio rango de porcentaje de mezcla de especies, donde se recogieron los primeros 40 cm de suelo y la hojarasca, posteriormente separada en 3 fracciones: fresca, fragmentada y humificada. Se determinó el carbono y nitrógeno total en todas las muestras y se calculó el stock de carbono y la relación C/N en suelo y hojarasca. Aunque no hubo diferencias en el Cstock total, se observó un efecto significativo del porcentaje de mezcla sobre la cantidad y calidad en las fracciones de hojarasca. En el suelo mineral, el C orgánico total fue la única variable que varió con el porcentaje de mezcla, presentando valores mínimos entorno al 50% de mezcla.

Palabras clave

Bosques mixtos, Secuestro de carbono, Materia orgánica edáfica, *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*.

1. Introducción

Los suelos sanos son el segundo sumidero de C en la Tierra, y este sumidero podría permanecer cientos o incluso miles de años como materia orgánica estable del suelo (MOS). En este contexto, los suelos forestales juegan un papel muy importante en la mitigación del cambio global atesorando entorno al 70% las reservas mundiales de carbono orgánico edáfico (COS) (Osei et al., 2021; Schleuß et al., 2014). No obstante, en función del manejo aplicado, los sistemas forestales pueden ver favorecida su capacidad de acumulación de COS, pudiendo aumentar considerablemente, o llegar a ser fuentes de CO₂ que retorne a la atmósfera. Por otro lado, se sabe que el suelo y la vegetación están íntimamente relacionados (Cornwell et al., 2008). El establecimiento de un tipo de vegetación u otro dependerá de las características del suelo, pero al mismo tiempo, las características del suelo pueden verse modificadas por la vegetación presente. En los suelos forestales, la principal fuente de materia orgánica y nutrientes proviene de los restos vegetales, principalmente en forma de hojarasca. Dependiendo de las especies forestales presentes, la producción y composición de la hojarasca será diferente y, por lo tanto, la calidad y cantidad de la materia orgánica que llega a los suelos (Lucas-Borja et al., 2012; Berg & McClaugherty, 2020).

En las últimas décadas la gestión de masas mixtas ha tomado gran relevancia, y la investigación forestal en este tipo de masas se ha intensificado debido a las sólidas evidencias de que los bosques mixtos pueden suministrar numerosos servicios ecosistémicos (ecológicos,

económicos y socioculturales) de forma más eficiente (Pretzsch et al., 2015; Gamfeldt et al., 2013; Bravo-Oviedo et al., 2014). Aunque cada vez hay más estudios que se centran en el efecto de las mezclas sobre el carbono orgánico del suelo (López-Marcos et al., 2018; Osei et al., 2021; Cremer et al., 2016), es necesario aumentar el conocimiento en relación a la cantidad y calidad de su MOS, y su evolución cuando se modifican las características de la mezcla, aspecto pobremente estudiado. Llenar este vacío de conocimiento es esencial para proponer alternativas de manejo que preserven o aumenten las reservas de COS en los suelos forestales, y contribuir así en la mitigación del cambio climático.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es evaluar el efecto del porcentaje de mezcla de especies forestales, concretamente *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica*, sobre la cantidad y calidad del carbono acumulado en suelo y hojarasca, contribuyendo, de esta forma, a aumentar el conocimiento sobre la dinámica del C en masas mixtas. Esta evaluación permitirá proveer de la información necesaria que facilite una gestión forestal sostenible de estos bosques, de tal forma que se favorezca el que sus suelos actúen como fijadores de carbono a medio y largo plazo.

Como objetivos específicos, este estudio pretende evaluar el efecto del porcentaje de mezcla sobre (1) la acumulación y descomposición de la hojarasca, (2) la distribución del carbono a lo largo del perfil edáfico, y (3) la calidad de la materia orgánica acumulada.

3. Metodología

Para este estudio se seleccionaron tres tripletes (9 parcelas forestales) conformados cada uno de ellos por una masa mixta y sendas masas puras de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y de haya (*Fagus sylvatica*). Dichas parcelas forman parte del proyecto EuMIXFOR (European Network on Mixed Forests), el cual cuenta con una red europea de tripletes con parcelas puras y mixtas de las especies objeto de estudio. Las parcelas de cada triplete seleccionado presentan condiciones similares de sitio (suelo, clima, relieve), edad, densidad, manejo y no se ha realizado ninguna intervención silvícola en los últimos diez años (Heym et al., 2017).

Dos tripletes (Pol_4 y Pol_5) se encuentran en el bosque de Niepołomice (Figura 1), localizado en el sur de Polonia a unos 25km al este de la ciudad de Cracovia. El bosque de Niepołomice cubre una extensión aproximada de 110 km², dominados principalmente por pinares de *Pinus sylvestris*, solos o en mezcla con otras especies forestales (Bell, 1986). Presenta un clima oceánico-continental (Dfb según clasificación Köppen), la precipitación media anual oscila entre 650-670 mm y temperatura media anual entre 8,2-8,4 °C (Kapusta et al., 2019; Stanek & Stefanowicz, 2019). Las parcelas se encuentran a una altitud de 191-231 msnm. Sus suelos son podzoles (Rozen et al., 2004) desarrollados sobre arenas del Pleistoceno, de textura arenosa o franco-arenosa y pH ácido (3,2 - 4,5). El tercer triplete (Ger_1) se encuentra a las afueras de la localidad alemana de Schrobenhausen (Figura 1). Las parcelas de Schrobenhausen se encuentran a una altitud media de 460 msnm, tienen un clima oceánico-continental (Cfb según clasificación Köppen), precipitaciones medias anuales entre 700-900 mm y temperatura media anual entre 7,5-8,5 °C (Heym et al., 2017). Sus suelos son clasificados como podzoles, y se desarrollan sobre sedimentos terciarios de arena gruesa y fina. Presentan una textura arenosa o franco-arenosa y pH ácido (3,8 - 4,5).

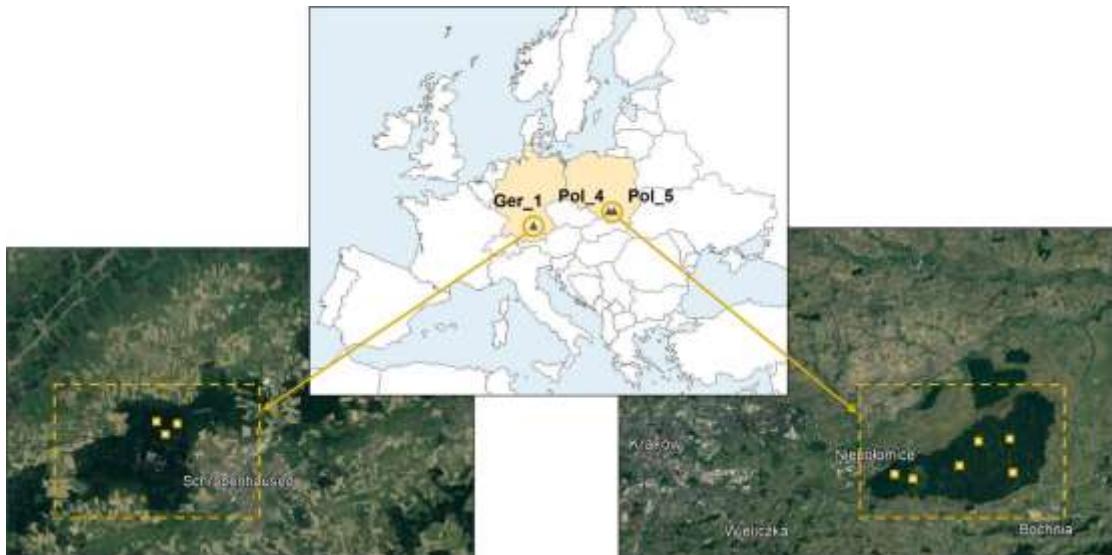


Figura 1. Localización de las zonas de estudio: Niepołomice, Polonia (dcha.) y Schrobenhausen, Alemania (izq.).

Las parcelas estudiadas presentaron las características que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de las parcelas forestales. ID: identificador de parcela; Masa: composición arbórea dominante; Edad: edad media del rodal (años); N: densidad arbórea (pies/ha); AB: Área basimétrica (m^2/ha); Dm: diámetro medio (cm); Ho: Altura dominante (m).

Sitio	ID	Masa	Edad	N	AB	Dm	Ho
Cracovia - Niepołomice	Pol_4P	Pino	57	671,9	27,4	22,6	24,6
	Pol_4H	Haya	57	531,1	17,6	19,8	20,0
	Pol_4M	Mixta	57	609,2	34,2	24,4	28,7
	Pol_5P	Pino	55	440,5	32,6	30,2	27,2
	Pol_5H	Haya	55	438,6	22,8	24,7	27,8
	Pol_5M	Mixta	55	555,2	31,0	25,0	26,6
Múnich - Schrobenhausen	Ger_1P	Pino	65	264,6	25,9	34,7	28,8
	Ger_1H	Haya	53	952,4	27,4	17,6	27,2
	Ger_1M	Mixta	50	1056,8	37,4	19,4	26,5

Con el fin de estudiar el efecto del porcentaje de mezcla sobre distintas propiedades edáficas, se establecieron subparcelas circulares (5 m de radio) dentro de las parcelas anteriormente descritas cumpliendo dos condiciones: (1) evitar la superposición entre subparcelas y (2) diferente porcentaje de mezcla de especies. Para ubicar las subparcelas se calculó el área de influencia de cada árbol mediante polígonos de Thiessen (método para analizar proximidad y vecindad), el cual establece la mediatrix entre un árbol y sus vecinos más cercanos, creando un polígono (área de influencia) para cada individuo (Butler et al., 2014). Así pues, el porcentaje de mezcla de especies en cada subparcela se calculó como la relación entre la suma de las áreas de pino silvestre y el área total de la subparcela, y se expresó como porcentaje de pino. Bajo estas premisas, se estableció un total de 40 subparcelas, cubriendo un amplio porcentaje de mezcla de especies (Figura 2).

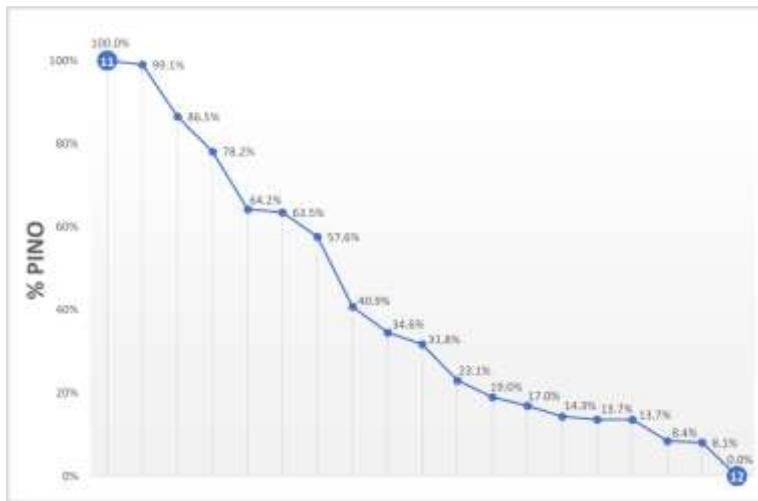


Figura 2. Porcentajes de pino de las 40 subparcelas de muestreo.

Con el fin de describir y caracterizar el perfil del edáfico de los rodales estudiados, en 9 de las 40 subparcelas establecidas (1 por cada tipo de masa y triplete) se realizó una calicata de al menos 60 cm de profundidad. Los nueve perfiles fueron descritos en campo y se tomaron muestras, alteradas e inalteradas en cada horizonte mineral, así como la hojarasca (horizonte orgánico) acumulada sobre él. En las 31 subparcelas restantes se muestrearon horizontes orgánicos y minerales hasta una profundidad de 40 cm. Para que las muestras fueran representativas, se tomaron muestras en 3 puntos a 1 m de distancia desde el centro de cada subparcela. Posteriormente se mezclaron creando una sola muestra compuesta para cada horizonte en cada subparcela. Las muestras de hojarasca fueron separadas en tres fracciones atendiendo al estado de descomposición: fresca (FsL), fragmentada (FgL) y humificada (HmL). En cada fracción se determinó el contenido en C y N, y se calculó la biomasa (B) seca ($Mg\ ha^{-1}$) y el stock de C ($Mg\ C\ ha^{-1}$). Aunque las muestras de suelo se recogieron y analizaron (contenido en C y N) por horizontes, posteriormente los datos fueron transformados a espesores en tramos de 10cm (0-10, 10-20, 20-30, ...). De esta forma se facilita el análisis, pudiendo establecer comparaciones entre profundidades en suelos distintos. Finalmente se calculó el stock de carbono ($C_{stock10}$, $C_{stock20}$, ...) y la relación C/N en cada profundidad.

Tras analizar todas las parcelas, se decidió excluir del estudio la parcela Pol_5P, ya que el perfil presentaba valores extraños y muy distintos al resto. Aunque no tenemos constancia de ello, se sospecha que los suelos de esa parcela fueron removidos, mezclando y alterando el orden natural de los horizontes edáficos.

Métodos estadísticos

Para analizar las variables respuesta (B, COT, N, C/N y C_{stock}) se ajustaron modelos lineales mixtos por separado para el suelo y la hojarasca, ambos con la siguiente ecuación:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + S_j + D_k + (b_1 + b_{1k}) \cdot X + (b_2 + b_{2k}) \cdot X^2 + \xi_{ijk}$$

Donde μ representa media global de la variable estudiada, T_i el efecto fijo del Triplete, S_j el efecto aleatorio de las subparcelas dentro de cada parcela, D_k el efecto de medidas repetidas en las diferentes profundidades/fracciones de cada subparcela (4 profundidades en el suelo y 2 fracciones en la hojarasca), X indica el porcentaje de pino en cada subparcela, b_1 y b_2 son los coeficientes de la covariable X y su cuadrado, b_{1k} y b_{2k} son las desviaciones, de cada una de las profundidades, respecto de las pendientes generales y ξ_{ijk} es el término aleatorio del error del modelo.

Para el término aleatorio de las subparcelas se ajustaron varianzas diferentes para cada uno de las parcelas, y para el efecto de medidas repetidas se ajustó una estructura de covarianzas autorregresiva de orden 1 (ar(1)). Para conseguir la convergencia de los modelos todas las varianzas fueron obtenidas mediante máxima verosimilitud restringida (REML).

4. Resultados

Horizonte orgánico (Hojarasca)

La fracción de hojarasca fresca representó un porcentaje muy bajo tanto en la biomasa total (< 3%) como en el stock de C (< 1%). Además, no estuvo presente en muchas muestras analizadas. Por estos motivos, aunque se tuvo en cuenta en la biomasa y Cstock total, fue excluida en los análisis estadísticos. La cantidad total de hojarasca acumulada varió entre 13,6 y 17,5 Mg ha⁻¹. A pesar de que no hubo diferencias con el porcentaje de pino en los totales, si se encontraron diferencias significativas ($p<0,001$) al estudiar la biomasa de cada fracción de hojarasca. La acumulación de biomasa de la hojarasca fragmentada y la humificada mostraron una tendencia opuesta con la variación en la proporción de pino (Figura 3a). La biomasa de la hojarasca fragmentada aumentó con la proporción de pino alcanzando un máximo de alrededor del 25% de pino en la mezcla, disminuyendo considerablemente a partir de ese valor. Por el contrario, biomasa de la hojarasca humificada disminuyó hasta el 25% y luego aumentó, llegando a representar, esta fracción más humificada y estable, más del 80% de la hojarasca acumulada en las subparcelas con mayor porcentaje de pino.

Con respecto al carbono orgánico total (COT), la hojarasca fragmentada presentó valores significativamente ($p<0,05$) mayores (445,6 mg C g⁻¹) que la humificada (405,4 mg C g⁻¹), y no mostró diferencias significativas con el porcentaje de pino (Tabla 2).

Se encontró un efecto significativo en la interacción entre la proporción de pino y las fracciones de hojarasca, sobre el contenido en N, la relación C/N y la acumulación de C (Cstock). La concentración de nitrógeno en la hojarasca fragmentada aumentó hasta alcanzar un contenido máximo de 16,8 mg N g⁻¹ en mezclas con un 25-50% de pino, disminuyendo posteriormente (Figura 3b). En general, el contenido de N fue mayor en la fracción humificada (18,6 mg N g⁻¹), no obstante, en mezclas intermedias el contenido en N de ambas fracciones se igualó (pino 25-50%: N_{FgL} = N_{HmL}). La relación C/N de la hojarasca fragmentada disminuyó con la proporción de pino, hasta un 25-50%, y luego aumentó alcanzando valores casi 2 veces superiores a los de rodales con bajas presencia de pino (Figura 3c). Los valores más bajos en la relación C/N se alcanzaron en mezclas intermedias (25-50%) donde, además, no hubo diferencias entre las fracciones. La acumulación de C varió en función del porcentaje de pino de forma distinta en cada fracción ($p<0,001$). Cuando la proporción de pino fue inferior al 50%, la fracción fragmentada acumuló más C que la humificada, aportando entorno al 70% del C total acumulado. Por el contrario, en las masas con mayor proporción de pino el comportamiento fue opuesto, siendo el 92% del C acumulado aportado por la fracción humificada (Figura 3d).

Tabla 2. Resultados estadísticos del modelo mixto aplicado en el estudio de la hojarasca.

p-valores	Triplete	Fracción	%Pino	%Pino* Fracción	%Pino ²	Pino ^{2*} Fracción
Biomasa	ns	**	ns	***	ns	***
COT	**	**	ns	ns	ns	ns
N	**	**	*	**	**	**
C/N	ns	**	**	**	**	**
Cstock	**	**	ns	***	ns	***

Nota: Biomasa (Mg ha⁻¹); COT – carbono orgánico total (mg C g⁻¹); N – contenido nitrógeno (mg N g⁻¹); C/N – relación C/N; Cstock – acumulación de C (Mg C ha⁻¹). Niveles de significancia: ***: ($p<0.001$); **: ($p<0.05$); *: ($p<0.1$); ns: no significativo.

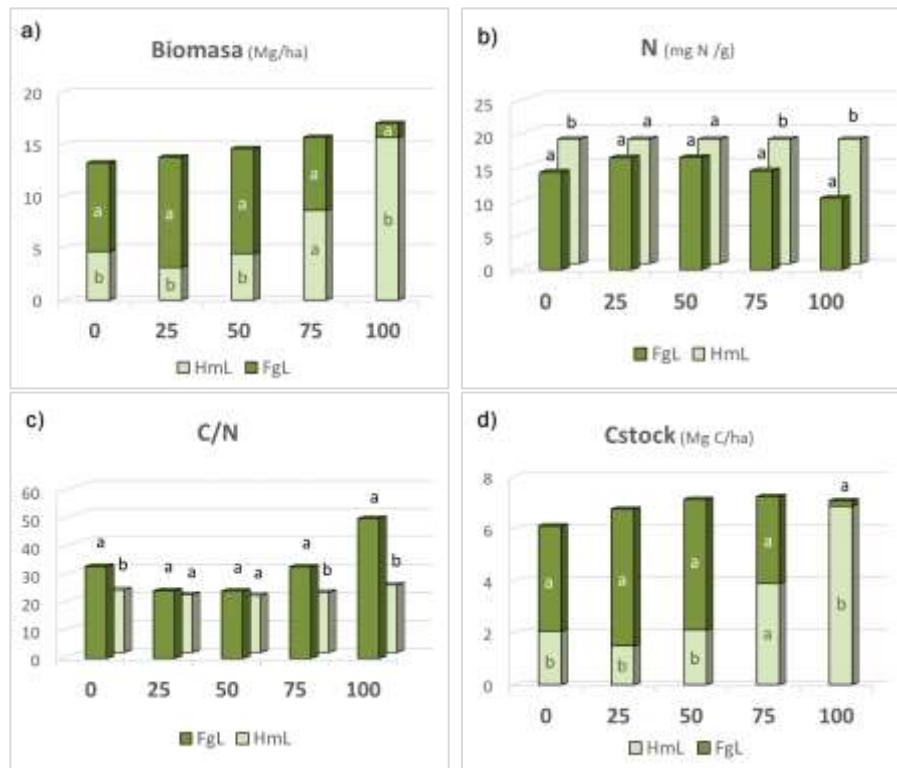


Figura 3. Análisis de la hojarasca en función del porcentaje de mezcla (0%, 25%, 50%, 75% y 100%): a) Biomasa ($Mg\ ha^{-1}$), b) Contenido de nitrógeno total ($mg\ N\ g^{-1}$), c) Relación C/N y d) Stock de C ($Mg\ C\ ha^{-1}$). Nota: FgL - fracción fragmentada; HmL: fracción humificada. * Diferentes letras muestran diferencias significativas entre fracciones.

Suelo mineral

Como era de esperar, los primeros 10 cm del suelo presentaron los valores más altos en todas las variables estudiadas (COT, N, C/N y Cstock), disminuyendo drásticamente a medida que aumentó la profundidad.

El COT en el perfil varió entre 33,4 y 230,3 $mg\ C\ g^{-1}$ en los suelos estudiados con un valor medio de $102,5\ mg\ C\ g^{-1}$. Entorno al 70% del COT se localizó en los primeros 10 cm del suelo mineral ($p<0,001$). El efecto cuadrático del porcentaje de pino fue significativo (Tabla 3: $Pine^2\ p<0,1$) no siéndolo su interacción con la profundidad. Así pues, el efecto del porcentaje de pino sobre el COT en todas las profundidades mostró el mismo comportamiento, disminuyendo a medida que aumenta el pino en la mezcla, hasta alcanzar un valor mínimo en las masas con un 60% de pino, y aumentando ligeramente en las masas con porcentajes de pino superiores (Figura 4a). Para la relación C/N y el Cstock, se detectaron diferencias significativas entre profundidades ($p<0,05$; $p<0,001$), pero no se observó ningún efecto del porcentaje de pino (Figuras 4b y 4c). Al igual que en el COT, la acumulación de Cstock fue mayor en los diez primeros centímetros de suelo, representando de media el 64% del carbono total acumulado en los perfiles, y presentó una tendencia decreciente a medida que aumenta la proporción de pinos, pero esta no fue significativa.

La evolución del contenido en N solo pudo ser estudiada en los primeros 10cm del suelo, debido a que su concentración en capas más profundas fue prácticamente inexistente. No obstante, no se observó ningún efecto del porcentaje de pino sobre el contenido en N del suelo mineral superficial.

Tabla 3. Resultados estadísticos del modelo mixto aplicado en el estudio del suelo mineral (0-40cm).

p-valores	Triplete	Profundidad	%Pino	%Pino* Profundidad	%Pino ²	Pino ² * Profundidad
COT	**	***	*	ns	*	ns

N (0-10cm)	**	-	ns	-	ns	-
C/N	**	**	ns	ns	ns	ns
Cstock	**	***	ns	ns	ns	ns

Nota: COT – carbono orgánico total (mg C g^{-1}); N – contenido nitrógeno (mg N g^{-1}); CN – relación C/N; Cstock – acumulación de C (Mg C ha^{-1}). Niveles de significancia: ***: ($p<0.001$); **: ($p<0.05$); *: ($p<0.1$); ns: no significativo.

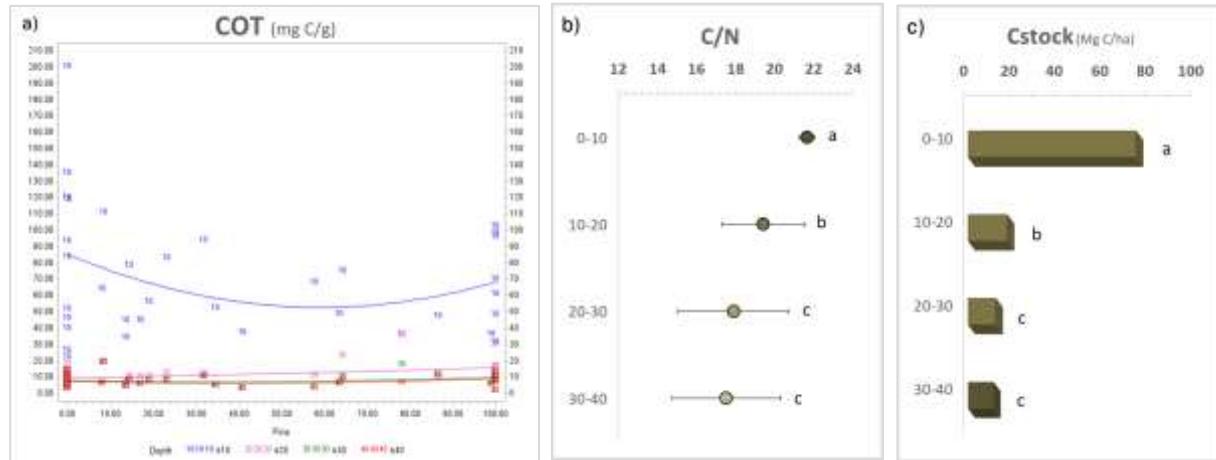


Figura 4. Análisis del suelo mineral: a) Carbono orgánico total (mg C g^{-1}), c) Relación C/N y d) Stock de C (Mg C ha^{-1}). * Diferentes letras muestran diferencias significativas entre fracciones.

5. Discusión

Respecto a la acumulación de hojarasca, no se observó un efecto del porcentaje de mezcla sobre de biomasa total acumulada. A pesar de que en la Figura 3a se aprecia una tendencia al incremento de la biomasa total a medida al aumentar el porcentaje de pino, esas diferencias no fueron significativas. Es posible que la ausencia de diferencias sea debida a que las parcelas presentan un área basimétrica muy similar, numerosos autores han observado un efecto positivo y significativo del AB sobre la producción de hojarasca y su acumulación en el suelo (Lado-Monserrat et al., 2015; Bueis et al., 2017). No obstante, si se encontraron diferencias en el grado de descomposición de la hojarasca.

La hojarasca humificada representó más del 80% de la biomasa acumulada en la hojarasca en las masas con alta presencia de pino. Este comportamiento puede deberse a que la hojarasca de pino presenta una mayor recalcitrancia (Berg & McClaugherty, 2020), dificultando una mayor descomposición, acumulándose grandes cantidades la fracción humificada que no llegan a integrarse en el suelo (López-Marcos et al., 2018). En las mezclas con una proporción de pino inferior al 50%, más del 60% de la biomasa se correspondió a la fracción fragmentada, es decir, se encontraba en un estado de descomposición parcial o intermedio. En general, la hojarasca fragmentada se asocia un menor grado de estabilidad que la humificada, siendo más probable que el carbono acumulado en dicha fracción retorne a la atmósfera en el proceso de mineralización. No obstante, los resultados de este estudio muestran que los valores más bajos en la relación C/N se alcanzaron en mezclas intermedias (porcentajes de pino entre 25-50%) donde, además, no hubo diferencias entre las fracciones. Valores bajos en la relación C/N (entre 25 y 30) indican un alto nivel de humificación y, por lo tanto, una mejor calidad y estabilidad de la materia orgánica del suelo (Berg & McClaugherty, 2020). Estos resultados sugieren por tanto que, en porcentajes de mezcla intermedios (25-50%), aunque a nivel físico una parte de la hojarasca haya sido diferenciada o como hojarasca fragmentada o humificada, a nivel químico presentan grado de humificación similar (relación C/N no significativamente diferente).

En las mezclas dominadas por pino el 92% del stock de C en la hojarasca se encontraba en formas humificadas, es decir, de mayor calidad. Sin embargo, esta reserva podría ser vulnerable ante

cambios futuros en las condiciones ambientales que favorezcan su mineralización y, por tanto, la pérdida del C acumulado. Resultados similares fueron mostrados por Laganière et al. (2013) al estudiar el efecto de la composición de las masas forestales en el stock de C y su estabilidad en bosques de Canadá.

Respecto al suelo mineral, en la relación C/N y el stock de C solo se detectaron diferencias entre profundidades, presentando valores más altos en los primeros 10 cm y disminuyendo bruscamente a medida que aumenta la profundidad, no observándose efecto del porcentaje de pino. Entorno al 69% del COT del perfil se localizó en los primeros 10 cm de suelo (51,6 – 85,2 mg C g⁻¹; valor medio 64,3 mg C g⁻¹). De igual modo, el 64% del C acumulado a lo largo del perfil se concentró en los primeros 10 cm. Estos resultados son lógicos debido a que la primera capa de suelo recibe un mayor aporte de materia orgánica procedente de la descomposición de la hojarasca. El COT fue la única variable que varió con el porcentaje de mezcla. El contenido medio de C alcanzó valores máximos en masas con baja proporción de pino, y valores mínimos entorno al 50% de mezcla.

Nuestros resultados muestran que el porcentaje de mezcla de especies influyó principalmente en la cantidad y la calidad de la materia orgánica existente en la hojarasca forestal que al suelo mineral. Y corroboran los resultados obtenidos por Vesterdal et al (2013), en el que estos autores mostraron que las reservas de C del suelo mineral parecían estar más influenciadas por el tipo de suelo o el clima que por las especies arbóreas a escala regional o nacional, mientras que el efecto de las especies arbóreas en las reservas de C en la hojarasca fue más consistente en los estudios realizados a gran escala.

6. Conclusiones

Los resultados de esta investigación muestran que el porcentaje de mezcla de especies en las masas forestales determinan, en gran medida, la cantidad y la calidad de la materia orgánica presente en la hojarasca, pero no llega a influir en la existente en suelo mineral. Los niveles más altos de humificación de la hojarasca se encontraron en las masas con porcentajes de pino entre el 25-50%, indicando una mejor calidad y estabilidad de la materia orgánica acumulada en este reservorio. Además, en estas masas, no se detectaron diferencias en la relación C/N de la hojarasca fragmentada y humificada, indicando que ambas fracciones alcanzan un nivel de humificación similar.

Respecto a la gestión forestal, estos resultados ponen de manifiesto que tener en cuenta en porcentaje de mezcla de especies es esencial para favorecer la cantidad y calidad de la materia orgánica acumulada en su hojarasca.

7. Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias a las personas que participaron en el proyecto EuMIXFOR (European Network on Mixed Forests), estableciendo los tripletes experimentales que fueron muestreados en este estudio. La recogida de muestras en Polonia y Alemania fue posible gracias a dos estancias de investigación financiadas por el CARE4C project (funded by European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 778322). Esta investigación ha sido apoyada por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España financiando el contrato predoctoral de la primera autora a través de las ayudas para contratos predoctorales para la Formación de Profesorado Universitario (Convocatoria 2016 - BOE 17-01-2017).

8. Bibliografía

BELL, J. N. B. 1986. Forest ecosystems in industrial regions. In *Agriculture, Ecosystems & Environment* (Vol. 16, Issues 3-4). [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(86\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0167-8809(86)90012-5)

BERG, B., & MCCLAUUGHERTY, C. 2020. Plant Litter. In *Plant Litter.* <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59631-6>

BRAVO-OVIEDO, A., PRETZSCH, H., AMMER, C., ANDENMATTEN, E., BARBATI, A., BARREIRO, S., BRANG, P., BRAVO, F., COLL, L., CORONA, P., DEN OUDEN, J., DUCEY, M. J., FORRESTER, D. I., GIERGICZNY, M., JACOBSEN, J. B., LESINSKI, J., LÖF, M., MASON, W. L., MATOVIC, B., ... ZLATANOV, T. 2014. European Mixed Forests: definition and research perspectives. *Forest Systems*, 23(3), 518. <https://doi.org/10.5424/fs/2014233-06256>

BUEIS T, BRAVO F. PANDO V., TURRIÓN M.B. 2017. Effects of stand density on litterfall and its turnover in pine plantations in northern Spain. *Bosque* 38(2): 401-407, 2017 DOI: 10.4067/S0717-92002017000200017

CREMER, M., KERN, N. V., & PRIETZEL, J. 2016. Soil organic carbon and nitrogen stocks under pure and mixed stands of European beech, Douglas fir and Norway spruce. *For-Ecol-Manag-* 367, 30–40. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2016.02.020>

GAMFELDT, L., SNÄLL, T., BAGCHI, R., JONSSON, M., GUSTAFSSON, L., KJELLANDER, P., RUIZ-JAEN, M. C., FRÖBERG, M., STENDAHL, J., PHILIPSON, C. D., MIKUSÍNSKI, G., ANDERSSON, E., WESTERLUND, B., ANDRÉN, H., MOBERG, F., MOEN, J., & BENGTSSON, J. 2013. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nat. Commun.*, 4(1), 1340. <https://doi.org/10.1038/ncomms2328>

HEYM, M., RUÍZ-PEINADO, R., DEL RÍO, M., BIELAK, K., FORRESTER, D. I., DIRNBERGER, G., BARBEITO, I., BRAZAITIS, G., RUŠKYTKĘ, I., COLL, L., FABRIKA, M., DRÖSSLER, L., LÖF, M., STERBA, H., HURT, V., KURYLYAK, V., LOMBARDI, F., STOJANOVIĆ, D., DEN OUDEN, J., ... PRETZSCH, H. 2017. EuMIXFOR empirical forest mensuration and ring width data from pure and mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) through Europe. *Ann. For.Sci.* 74(3). <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0660-z>

KAPUSTA, P., STANEK, M., SZAREK-ŁUKASZEWSKA, G., & GODZIK, B. 2019. Long-term moss monitoring of atmospheric deposition near a large steelworks reveals the growing importance of local non-industrial sources of pollution. *Chemosphere*, 230, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.058>

LADO-MONSERRAT L, LIDON A, BAUTISTA I. 2015. Litterfall, litter decomposition and associated nutrient fluxes in *Pinus halepensis*:influence of tree removal intensity in a Mediterranean forest. *Eur. J.For.Res.* 134(5):833-844. DOI: 10.1007/s10342-015-0893-z.

LAGANIÈRE, J., PARÉ, D., BERGERON, Y., CHEN, H. Y. H., BRASSARD, B. W., & CAVARD, X. 2013. Stability of Soil Carbon Stocks Varies with Forest Composition in the Canadian Boreal Biome. *Ecosystems*, 16(5), 852–865. <http://www.jstor.org/stable/23501444>

LÓPEZ-MARCOS, D., MARTÍNEZ-RUIZ, C., TURRIÓN, M.-B., JONARD, M., TITEUX, H., PONETTE, Q., & BRAVO, F. 2018. Soil carbon stocks and exchangeable cations in monospecific and mixed pine forests. *Eur. J. For. Res.*, 137(6), 831–847. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1143-y>

LUCAS-BORJA, M. E., CANDEL, D., JINDO, K., MORENO, J. L., ANDRÉS, M., & BASTIDA, F. 2012. Soil microbial community structure and activity in monospecific and mixed forest stands, under Mediterranean humid conditions. *Plant Soil*, 354(1–2), 359–370. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1072-8>

OSEI, R., TITEUX, H., BIELAK, K., BRAVO, F., COLLET, C., COOLS, C., CORNELIS, J. T., HEYM, M., KORBOULEWSKY, N., LÖF, M., MUYS, B., NAJIB, Y., NOTHDURFT, A., PACH, M., PRETZSCH, H., DEL RIO, M., RUIZ-PEINADO, R., & PONETTE, Q. 2021. Tree species identity drives soil organic carbon storage more than species mixing in major two-species mixtures (pine, oak, beech) in Europe. *For. Ecol. and Manag.*, 481(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118752>

PRETZSCH, H., DEL RÍO, M., AMMER, C., AVDAGIC, A., BARBEITO, I., BIELAK, K., BRAZAITIS, G., COLL, L., DIRNBERGER, G., DRÖSSLER, L., FABRIKA, M., FORRESTER, D. I., GODVOD, K., HEYM, M., HURT, V., KURYLYAK, V., LÖF, M., LOMBARDI, F., MATOVIĆ, B., ... BRAVO-OVIEDO, A. 2015. Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. *Eur. J-For. Res.*, 134(5), 927–947. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0900-4>

ROZEN, A., SOBCZYK, KAPUSTA, P., & NIKLIŃSKA, M. 2004. Heavy metal concentrations in Enchytraeidae (Oligochaeta) in the Niepołomice Forest. *Ecotoxicol. Environ.Saf.* 57(1), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.08.006>

SCHLEUß, P.-M., HEITKAMP, F., LEUSCHNER, C., FENDER, A.-C., & JUNGKUNST, H. F. 2014. Higher subsoil carbon storage in species-rich than species-poor temperate forests. *Environ. Res. Lett.* 9(1), 014007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/1/014007>

STANEK, M., & STEFANOWICZ, A. M. 2019. Invasive *Quercus rubra* negatively affected soil microbial communities relative to native *Quercus robur* in a semi-natural forest. *Sci. Total Environ.*, 696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133977>

WESTERDAL, L.; CLARKE, N.; SIGURDSSON, B.D.; GUNDERSEN, P. 2013. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *For Ecol Manage* 309:4–18. doi: 10.1016/j.foreco.2013.01.017