



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

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 a corto plazo de la gestión forestal sobre la mineralización y nitrificación del N en el suelo

LULL NOGUERA, C.¹, BAUTISTA CARRASCOSA, I.¹, GONZÁLEZ-SANCHIS, M.², DEL CAMPO GARCÍA, A.D.² y LIDÓN CEREZUELA, A.¹

¹ Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). Universitat Politècnica de València.

² Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València.

Resumen

En los sistemas forestales mediterráneos la disponibilidad de nitrógeno está directamente relacionada con la cantidad y calidad de los restos orgánicos que llegan al suelo y su velocidad de transformación. Los tratamientos selvícolas no solo suponen cambios en la entrada de restos, sino que provocan alteraciones en el microclima del suelo, que pueden afectar a algunos de los procesos relacionados con el ciclo del N. Se estudiaron los efectos a corto plazo que tuvo un tratamiento de aclareo sobre la mineralización del N en el suelo. El tratamiento, con reducción del 74% de área basal, se realizó en 2012 en una masa de pino carrasco del Parque Natural de la Sierra Calderona (Valencia) regenerada tras un incendio ocurrido en 1992 y no tratada posteriormente. Transcurrido un año del tratamiento, se estudió la dinámica del nitrógeno en la capa superficial de suelo (0-15 cm) empleando la técnica de los tubos con resina. El tratamiento aumentó tanto la mineralización neta anual de nitrógeno como la nitrificación anual, pero no modificó la lixiviación de nitrógeno mineral en la capa estudiada. La dinámica temporal muestra valores mínimos de estos procesos en el período de otoño-invierno y valores máximos en el periodo de primavera-verano.

Palabras clave

Mineralización, nitrificación, lixiviación, N mineral, aclareo, *Pinus halepensis*.

1. Introducción

El monte mediterráneo de zonas semiáridas se caracteriza por ser un monte estructuralmente complejo. Ello es debido en gran medida a las condiciones ambientales en las que se desarrolla (baja pluviometría, suelos pedregosos y superficiales, episodios de precipitación intensa, riesgos de erosión) y a la presión humana a la que se ve sometido con alta incidencia de incendios forestales, lo que hace que sea especialmente vulnerable (Sardans and Peñuelas, 2013). Una manera adecuada de reducir su vulnerabilidad es realizar una gestión de la masa forestal basada en la ecohidrología que conllevaría el aumento de la resiliencia de los ecosistemas frente a sequías, la reducción del riesgo de incendios y una mejora del crecimiento y vigor de los árboles, así como un aumento en la riqueza de especies arbustivas.

Para evaluar la sostenibilidad de los tratamientos selvícolas, es necesario conocer cómo éstos afectan a la dinámica de los nutrientes en los bosques. La masa arbórea y arbustiva proporciona protección física y contribuye al contenido en materia orgánica de los suelos, aumentando por tanto su capacidad de retención de agua y su fertilidad. La modificación del dosel puede afectar a los aportes de nutrientes al suelo incidiendo en la cantidad y calidad del mantillo (Prescott, 2002). A su vez puede influir en la descomposición de los residuos orgánicos al modificar el microclima del suelo (Cortina y Vallejo, 1994). Además, puede afectar a la composición y actividad de los

microorganismos que llevan a cabo tanto la descomposición de los residuos orgánicos que llegan al suelo como de la materia orgánica del suelo mineral debido a las alteraciones del microclima y de la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Entre los efectos de los tratamientos selvícolas sobre el ciclo de nutrientes, es fundamental evaluar aquellos que afectan al N ya que este es a menudo el nutriente más limitante para el crecimiento forestal (Fisher y Binkley, 2000; Davidson et al., 2004). Bai et al. (2017), indican que en el estudio de aclareo que llevaron a cabo en un bosque de *Aims Corymbia* spp el N del suelo no fue un factor limitante, sin embargo, el N foliar fue impulsado principalmente por el N total soluble en agua indicando una posible limitación de N al largo plazo en parcelas sometidas a tratamientos de aclareo de alta intensidad.

Las plantas absorben N principalmente en formas inorgánicas que pueden ser obtenidas a partir del N orgánico del suelo a través del proceso de mineralización. Debido a la importancia del N en los ecosistemas forestales, la investigación del ciclo de nutrientes a menudo incluye la determinación de las tasas de transformación del N en el suelo, así como como índices de disponibilidad potencial y pérdidas de N en el ecosistema (Bonilla y Rodá, 1992; Knoop y Swank, 2002). La evaluación de las tasas de mineralización neta del N, la nitrificación neta y la lixiviación del N del suelo es importante porque esos procesos determinan la absorción de N de la planta, la lixiviación de N y las pérdidas de N gaseoso. Hoy en día se sabe que la mineralización neta del N no tiene por qué ser necesariamente el proceso limitante para el suministro de N a las plantas, sino que es un indicador de la disponibilidad del mismo (Schimel y Bennet, 2004). El estudio de la dinámica de los procesos relacionados con el N en el suelo es importante para explicar la magnitud y duración de la respuesta al aclareo. Algunos estudios a corto plazo sobre los efectos del tratamiento de aclareo en la mineralización del N no mostraron incrementos en la tasa de mineralización del N después de la intervención (Carlyle 1995; Son et al. 1999; Thibodeau et al. 2000). Grady y Hart (2006) encontraron que el tratamiento de aclareo tenía tasas anuales de mineralización neta del N en el suelo mineral in situ más bajas que los rodales no manejados; sin embargo, muchos otros estudios han encontrado que a corto plazo (1 a 2 años) el aclareo generalmente conlleva aumentos en las tasas del ciclo del N (Kaye y Hart, 1998). Bautista et al. (2021a) observaron, trece años después de llevar a cabo aclareos de distintas intensidades, un aumento del doble en las tasas netas de mineralización y nitrificación con respecto a las parcelas control, explicando los resultados en términos de las diferentes calidades de la hojarasca, que son el resultado de la proporción de material procedente de *Pinus halepensis* Mill. frente a los residuos más descomponibles del sotobosque. Este aumento en las tasas de determinados procesos del ecosistema ha sido atribuido a una mayor temperatura del suelo, una mayor descomposición de las raíces y a una menor competencia entre los microorganismos del suelo y las plantas por los nutrientes del suelo.

2. Objetivos

Nuestros objetivos fueron determinar los efectos de la práctica de aclareo sobre las transformaciones del N en el suelo durante un período anual y evaluar la dinámica de la mineralización y nitrificación durante dicho período. La hipótesis de partida es que, a corto plazo, las tasas netas de mineralización y nitrificación aumentan en la parcela tratada debido a cambios en el suministro de carbono, así como a la variación en la temperatura y la humedad del suelo, lo que conduce a una mayor disponibilidad de N.

3. Metodología

El trabajo se llevó a cabo en el Parque Natural de la Sierra Calderona (Valencia), en una zona de pino carrasco regenerada tras un incendio ocurrido en 1992 y no tratada posteriormente. La zona ($39^{\circ}42'29''\text{N}$, $0^{\circ}27'25''\text{W}$, 790 m.s.n.m.), definida como semiárida, registra unos valores medios anuales de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial de 14°C , 342 mm y 837 mm, respectivamente. El suelo es relativamente superficial, dependiendo de la pendiente, de textura franca, pH básico, elevado contenido en carbonato cálcico y porcentaje de materia orgánica en torno al 10% en los primeros 5 cm de suelo (del Campo et al., 2018; Bautista et al., 2021b). En otoño de 2012 se realizó un tratamiento de aclareo en la zona regenerada que presentaba una densidad de 15000 árboles ha^{-1} , cortando el 94% de los árboles (74% del área basal), excepto en una parcela de 40 x 40 m que se utilizó como control (C). Adyacente a ésta, se delimitó una parcela tratada (T) de tamaño similar. Los árboles cortados se trituraron dejando los restos sobre el suelo (del Campo et al., 2018). Ambas parcelas (T tratada y C sin tratar), orientadas al NW y con pendientes que varían entre el 20 - 40 %, se dividieron en tres bloques de tamaño similar perpendiculares a la pendiente.

La dinámica del nitrógeno se ha estudiado empleando la técnica de los tubos con resina (DiStefano y Gholz, 1986) adaptada a condiciones de elevada pedregosidad (Bautista et al., 2021a). Consiste en la incubación in situ de suelo introducido en tubos que llevan acoplados bolsas con resina de intercambio iónico en la parte inferior para interceptar el N mineral (amonio y nitrato) que pueda perderse por lixiviación. Para cada fecha de muestreo (periodicidad bimensual, en este caso), se toma en cada punto de medida una muestra de suelo para analizar su contenido de N mineral (contenido inicial). Con una alícuota de la misma muestra de suelo se llena un tubo con la resina acoplada que se vuelve a colocar en un lugar cercano a donde se cogió la muestra. Transcurridos dos meses de periodo de incubación, el tubo con resinas es recogido y transportado al laboratorio para analizar el contenido de N mineral (amonio y nitrato) del suelo (contenido final) y de la resina. La nitrificación neta se obtiene como la suma del N nítrico final más el contenido en la resina sustrayendo el N nítrico inicial. De similar forma, la mineralización neta se obtiene como la suma de nitrógeno mineral final más el nitrógeno mineral de la resina menos el nitrógeno mineral inicial (Hart et al., 1994).

El ensayo transcurrió entre septiembre de 2013 y septiembre de 2014, realizándose en dicho período anual siete muestreos correspondientes a seis incubaciones. En cada fecha y bloque se muestreaban 3 puntos (en total 9 puntos por parcela). Los tubos eran de PVC de 15 cm de longitud y diámetro interno de 4.75 cm y biselados en su extremo inferior para facilitar su inserción en el suelo. Las bolsas de resina se construyeron empleando anillos de goma unidas a tela de nylon mediante silicona y colocando 5 g por bolsa de una mezcla preparada con un 50 % de resina catiónica (Dowex 50W-X8 H^{+} (saturada con K^{+}) malla 50-100, Fluka Analytical, Sigma-Aldrich, St Louis, USA) y aniónica (Dowex 1-X8 Cl^{-} malla 100-200).

Las muestras de suelo se tamizaron por 2 mm y se conservaron refrigeradas hasta la extracción del nitrógeno mineral. La extracción del N-NO_3^{-} y el N-NH_4^{+} se efectuó con KCl 2M agitando durante 1 hora. Cada muestra de suelo se extrajo y analizó por duplicado, empleando la técnica de análisis por inyección de flujo (FIA). La determinación de nitrato se basa en la reducción de éste a nitrito en una columna de Cd y posterior determinación colorimétrica con N-(1-Naftil)-

etilendiaminadichlorhidrato y sulfanilamida, midiendo la absorbancia de la mezcla obtenida a 540 nm (Tecator Application Note AN 5201, 1984). La determinación del amonio se basa en la determinación colorimétrica del amonio liberado tras reaccionar la muestra de agua con hidróxido sódico. El amoniaco gaseoso se difunde a través de una membrana permeable dentro de una mezcla de indicadores ácido-base y se mide la absorbancia de la mezcla a 590 nm (Tecator Application Note AN 5226, 1984). Se empleó un analizador FIA (FIAS 5000, Foss Tecator, Höganäs, Suecia). Las bolsas de resinas de los tubos se conservaron refrigeradas y se sometieron a una extracción secuencial del N mineral mediante tres extracciones de 33 mL de KCl 2M de 1h de duración cada una de ellas. El contenido de amonio y nitrato en los extractos procedentes de las resinas se determinó empleando el analizador FIA.

A los datos de mineralización y nitrificación netas anuales y lixiviación anual, obtenidos como el sumatorio de estas variables en los seis periodos bimensuales medidos, se les aplicó ANOVA de doble vía con el tratamiento selvícola y el bloque como factores. Cuando el análisis de la varianza indicó diferencias significativas se utilizó el test de LSD de Fisher con intervalo de confianza del 95% para establecer diferencias entre los valores medios de cada uno de los niveles de cada factor. Los datos de las tres variables fueron transformados (como log) para cumplir con el requisito de normalidad de los datos.

4. Resultados

Considerando todos los puntos muestreados los tres procesos del ciclo del N evaluados a nivel anual promediaron valores más altos en la zona tratada que en la zona control. Sin embargo, la variabilidad observada fue muy alta, con coeficientes de variación que oscilaron entre el 85 - 115% en la parcela control y del 71 - 82% en la parcela tratada. Cuando se analizó el comportamiento de estos procesos por bloques (establecidos según la pendiente), se observaron diferencias entre ellos, siendo el bloque I y II diferentes del III. La presencia de una discontinuidad litológica que cruza en diagonal la zona experimental dando como resultado dos tipos de suelo diferentes en cuanto a textura y materia orgánica, puede ser la causa de no encontrar diferencias significativas debidas al tratamiento. Como se muestra en la Figura 1, existe una relación entre los procesos de transformación del N en el suelo y el contenido de carbono orgánico, más evidente en el caso de la mineralización del N.

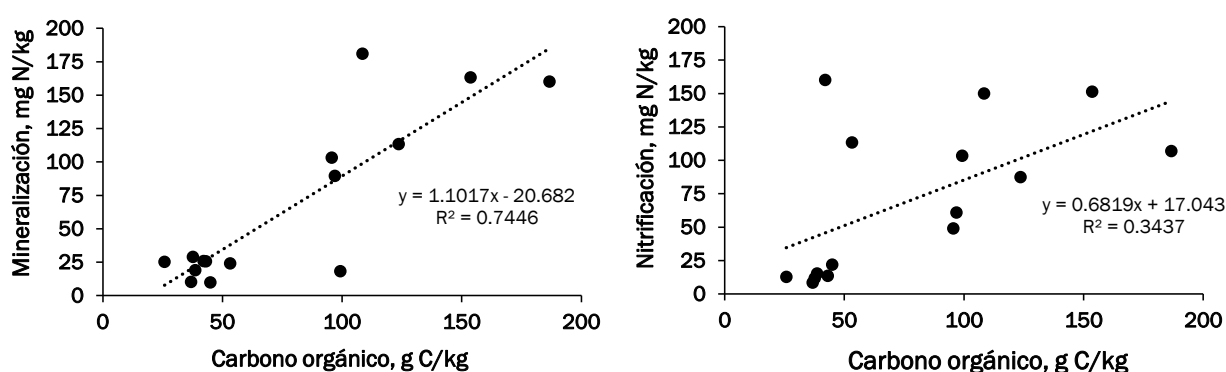


Figura 1. Relación del carbono orgánico del suelo con la mineralización (izquierda) y con la nitrificación (derecha).

Esta discontinuidad litológica provocó que el número de puntos experimentales muestreados en cada tipo de suelo fuera diferente en la parcela tratada (6 del suelo 1 y 3 del suelo 2) y en la parcela control (4 del suelo 1 y 5 del suelo 2), provocando diferencias en el contenido de carbono orgánico dentro el bloque II entre el tratamiento (121 g C/kg suelo) y el control (65 kg C/kg suelo), lo que no ocurría ni en el bloque I (120 y 135 g C/kg, respectivamente), ni en el bloque III (35 y 40 g C/kg, respectivamente). Puesto que esta descompensación de puntos muestreados la provocaba claramente el bloque II, para poder evaluar si existían diferencias en los procesos del ciclo del N en el suelo en la zona tratada y no tratada, se decidió realizar un ANOVA excluyendo los puntos experimentales de dicho bloque. Bajo esta premisa, la mineralización neta anual promedió en la parcela control unos 69 mg N/kg suelo, equivalente a unos 140 kg N/ha, mientras que en la parcela tratada la mineralización neta anual fue de unos 86 mg N/kg suelo (173 kg N/ha), resultando afectada por el tratamiento y por el bloque, siendo la interacción de ambos factores no significativa (Tabla 1). Los valores de mineralización neta anual fueron mayores en la parcela tratada y en el bloque situado en la parte superior de la pendiente, coincidiendo con los niveles más altos de carbono orgánico. El mismo comportamiento fue observado para la nitrificación neta anual, que promedió unos 43 mg N/kg en el caso de la parcela control y unos 67 mg N/kg en el caso de la parcela sometida a aclareo. Estos valores suponen una transformación anual del nitrógeno amoniacal a nitrógeno nítrico del 62% en la parcela C y del 78% en la parcela T. La nitrificación también resultó afectada por el tratamiento y el bloque de forma similar a la mineralización neta (Tabla 1). El porcentaje de nitrógeno mineral lixiviado por debajo de 15 cm supuso un 14% del nitrógeno mineralizado (10 mg N/kg) en la parcela control y un 17% (14 mg N/kg) en la parcela tratada, no existiendo en este caso diferencias significativas debidas al tratamiento de aclareo, pero si por la situación en la parcela, siendo más alta en la parte superior de la zona experimental (Tabla 1).

Tabla 1. Valores anuales de mineralización, nitrificación y lixiviación (media \pm desviación estándar) en la parcela control y tratada y significación de los factores tratamiento y suelo y su interacción considerando los bloques I y III (n=6).

Parcela	Mineralización anual (mg N kg ⁻¹ suelo)	Nitrificación anual (mg N kg ⁻¹ suelo)	Lixiviación anual (mg N kg ⁻¹ suelo)
Control	69.2 \pm 64.7	43.2 \pm 45.5	10.0 \pm 8.4
Tratada	85.5 \pm 71.6	66.6 \pm 67.6	14.2 \pm 11.4
Factor	P-valor	P-valor	P-valor
Tratamiento	0.0311	0.0404	0.0611
Bloque	0.0000	0.0000	0.0001
T x B	0.0899	0.2738	0.2860

Si bien la tasa bimensual de mineralización neta alcanza en la parcela control un valor medio de 11.5 mg N/kg suelo, la dinámica a lo largo del año muestra un rango que oscila entre 3.5 – 19.9 mg N/kg suelo, correspondiendo el valor mínimo al período de septiembre – noviembre, y el valor máximo al período de mayo – julio, con una tendencia creciente de otoño a verano (Figura 2). Similar comportamiento a lo largo del año tuvo la mineralización neta en la parcela tratada, con una tasa bimensual promedio de 14.3 mg N/kg suelo, con un valor mínimo en septiembre - noviembre (5.1 mg N/kg suelo) y un máximo en el período mayo – julio (21.8 mg N/kg suelo), si bien en este caso la tasa no siempre fue creciendo de otoño a verano, produciéndose un ligero descenso en el período de marzo a mayo (Figura 2).

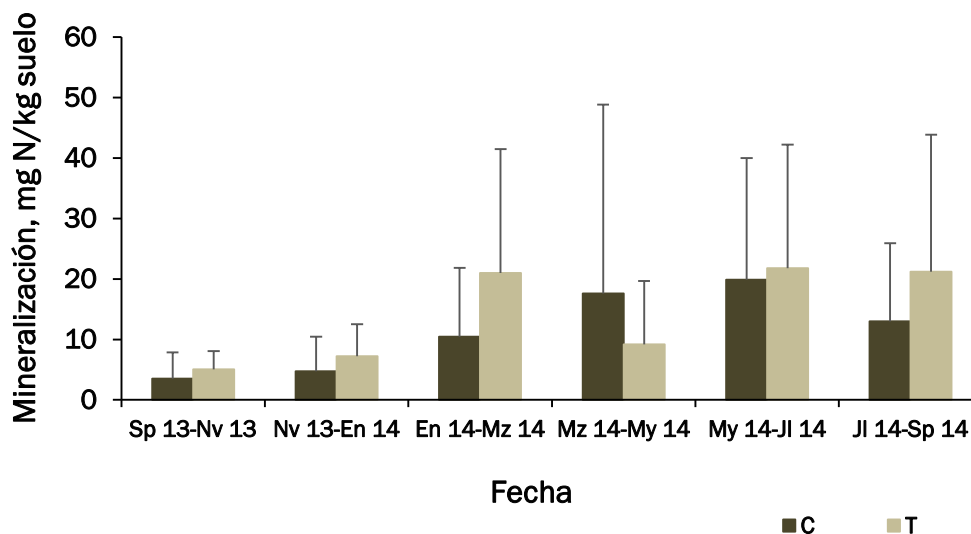


Figura 2. Evolución bimensual de la mineralización neta en función del tratamiento selvícola (C = control; T = tratada; $n = 6$ para cada período).

La tasa de nitrificación neta presentó una dinámica similar a la de la mineralización, con valores mínimos en el período de septiembre a noviembre y máximos en primavera o verano (Figura 3). La tasa media bimensual promedió 7.2 mg N/kg suelo en la parcela no tratada, correspondiendo el valor más bajo al período septiembre – noviembre (2.5 mg N/kg suelo) y el más alto al de mayo – julio (10.8 mg N/kg suelo). En la parcela tratada la tasa media de nitrificación fue de 11.1 mg N/kg suelo, con un valor mínimo en el período de septiembre – noviembre (2.6 mg N/kg suelo) y un máximo en el período de julio - septiembre (21.9 mg N/kg suelo).

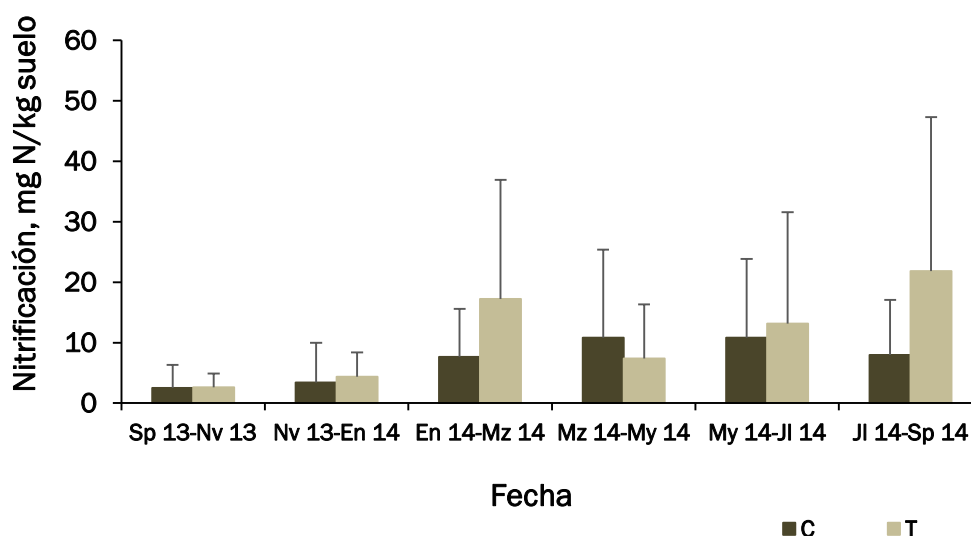


Figura 3. Evolución bimensual de la nitrificación neta en función del tratamiento selvícola (C = control; T = tratada; $n = 6$ para cada período).

La lixiviación fue mínima en el período de noviembre a enero, con valores similares en la parcela tratada y no tratada (0.68 y 0.54 mg N/kg, respectivamente) (Figura 4). El valor más alto en la parcela control se produjo en el período de marzo a mayo (2.95 mg N/kg), coincidiendo con el valor más alto de nitrificación en esa parcela, mientras que en la parcela tratada la lixiviación máxima se produjo entre enero y marzo (3.95 mg N/kg) coincidiendo también con un valor alto de nitrificación en ese período. La lixiviación fue mayor en la zona tratada en todos los períodos muestreados, excepto en el período de mayo – julio, en la que la lixiviación registrada en la zona control fue ligeramente superior.

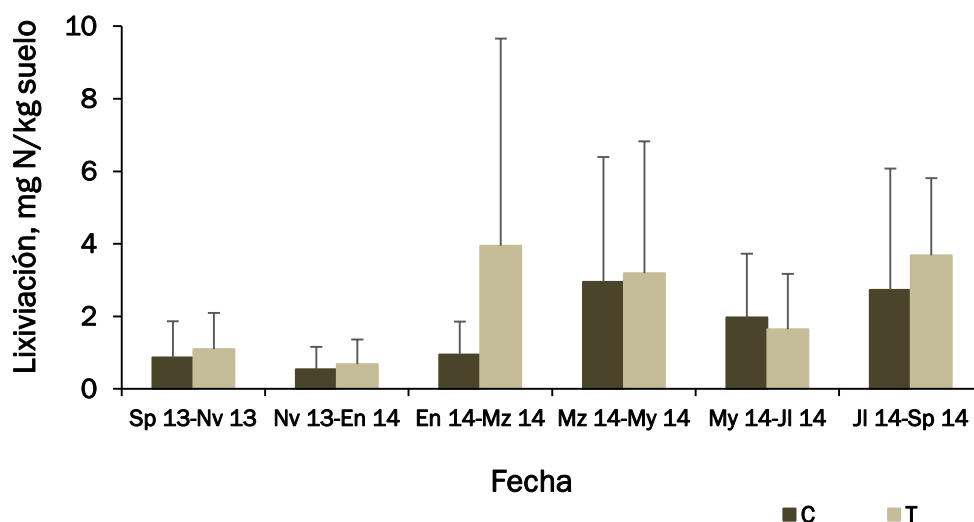


Figura 4. Evolución bimensual de la lixiviación en función del tratamiento selvícola (C = control; T = tratada; n = 6 para cada período).

5. Discusión

No hay un acuerdo unánime sobre el efecto a corto plazo del tratamiento de aclareo sobre los procesos de transformación del N en el suelo y su dinámica en el tiempo. Así, mientras algunos trabajos muestran que a corto plazo no se incrementa la tasa de mineralización de N (Carlyle 1995, Son et al. 1999; Thibodeau et al. 2000) ni la disponibilidad de N del suelo (Bai et al., 2017), otros indican cambios en la tasa de mineralización en ambas direcciones, es decir, disminuyéndola (Grady y Hart, 2006) o aumentándola (Kaye y Hart, 1998). Estas diferencias en los resultados están relacionadas en parte con la especie dominante, la intensidad del tratamiento y la manera en la que se gestionan los restos de la corta y su incorporación o no al suelo. La menor absorción de las plantas y los aumentos en la temperatura y la humedad del suelo debido a las acciones de aclareo podrían estimular la mineralización neta de N y las tasas de nitrificación, creando un pulso retardado de nitrato. En cualquier caso, los efectos parecen diluirse a corto o medio plazo (Overby y Hart, 2016; Ganzlin et al., 2016). Los mecanismos a través de los cuales podría tener lugar esta atenuación de la dinámica del N se han atribuido a la disminución de los flujos de mineralización-inmovilización que se producen inmediatamente después del aclareo, a las pérdidas de N por lixiviación, erosión o desnitrificación, o a la adsorción de N por compuestos fenólicos (Ganzlin et al., 2016).

Los valores de mineralización neta obtenidos en la zona de La Calderona fueron ligeramente superiores a los obtenidos en otras parcelas tratadas de *Pinus halepensis* en la zona semiárida mediterránea por Bautista et al. (2021a), los cuales oscilaron entre 44 – 51 mg N/kg suelo, si bien estos valores fueron obtenidos en una zona más fría de la Comunidad Valenciana y en el medio plazo (13 años desde que se realizó el tratamiento). En nuestro caso las tasas anuales de mineralización y nitrificación dos años después de efectuado el tratamiento aumentaron ligeramente con el tratamiento, lo que podría estar relacionado con un aumento de la temperatura del suelo como consecuencia del aclareo (Bautista et al., 2021b), lo que estaría apoyado también por la similar dinámica de los procesos medidos en ambos casos. El incremento respecto del control fue del 24% en el caso de la mineralización y del 54% en el caso de la nitrificación. Los elevados porcentajes de nitrificación observados tanto en la parcela control como en la parcela tratada indican que éste es un proceso dominante en la zona mediterránea como consecuencia del efecto diferencial de la temperatura en la tasa de nitrificación y del menor efecto del contenido de carbono orgánico del suelo, a diferencia de lo que ocurre con la mineralización que es más dependiente de dicho contenido, tal y como se podía apreciar en la Figura 1. La similitud en las pérdidas de nitrógeno mineral por lixiviación en la parcela control y en la aclarada estaría indicando que existe un flujo de agua y una concentración de N mineral en ambas zonas del mismo orden a la profundidad a la que la lixiviación fue estimada. Por tanto, la disponibilidad de N mineral para las plantas fue mayor en el caso de la parcela tratada ya que se produjo una mayor entrada de N por mineralización que en la parcela control mientras que la salida fue similar en ambas.

6. Conclusiones

La evaluación de las tasas de mineralización neta del N, nitrificación neta y lixiviación del N del suelo es importante porque esos procesos determinan en gran medida la disponibilidad de N por la planta. En este trabajo se han evaluado el efecto que tiene a corto plazo la realización de un tratamiento selvícola de aclareo sobre dichas tasas. Dos años después de realizado el tratamiento, la mineralización neta anual y la nitrificación anual estuvieron influenciadas por el tratamiento de aclareo. La mineralización anual fue un 24% superior en la parcela tratada que en la parcela control, mientras que en la nitrificación este porcentaje fue del 54%. Las pérdidas anuales por lixiviación de N no se vieron afectadas por el tratamiento, por lo que la disponibilidad de N en la capa superficial del suelo sería mayor en la zona aclarada. La dinámica anual obtenida mediante incubaciones bimensuales muestra claramente la tendencia estacional de los procesos de transformación del nitrógeno en el suelo, que se incrementan gradualmente desde el otoño al verano.

7. Agradecimientos

Este estudio ha sido soportado por los proyectos HYDROSIL (CGL2011-28776-C02-02) y SILWAMED (CGL2014-58127-C3-2) financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación y los fondos FEDER, y apoyados por los proyectos CEHYRFO-MED (CGL2017-86839-C3-2-R), RESILIENT-FORESTS (LIFE17 CCA/ES/000063) y SilvAdapt.net (RED2018-102719-T), permitiendo el mantenimiento de las parcelas experimentales. Los autores agradecen a la Generalitat Valenciana, a VAERSA y al Parque Natural "Sierra Calderona" su apoyo para permitirnos disponer de las zonas experimentales y su ayuda en el trabajo de campo para su establecimiento.

8. Bibliografía

BAI, S. H.; DEMPSEY, R.; REVERCHON, F.; BLUMFIELD, T. J.; RYAN, S.; CERNUSAK, L. A.; 2017. Effects of forest thinning on soil-plant carbon and nitrogen dynamics. *Plant and Soil*, 411(1-2): 437-449.

BAUTISTA, I.; LADO-MONSERRAT, L.; LULL, C.; LIDÓN A. 2021a. Mid-term effects of forest thinning on N mineralization in a semi-arid Aleppo pine forest. *Forest*. 12: 1470.

BAUTISTA, I.; LIDÓN, A.; LULL, C.; GONZÁLEZ-SANCHIS, M.; DEL CAMPO, A. D.; 2021b. Thinning decreased soil respiration differently in two dryland Mediterranean forests with contrasted soil temperature and humidity regimes. *European Journal of Forest Research*, 140(6), 1469-1485.

BONILLA, D.; RODÀ, F.; 1992. Soil nitrogen dynamics in a holm oak forest. *Vegetatio*, 99(1): 247-257.

CARLYLE, J. C. (1995). Nutrient management in a *Pinus radiata* plantation after thinning: the effect of thinning and residues on nutrient distribution, mineral nitrogen fluxes, and extractable phosphorus. *Can. J. For. Res.* 25(8): 1278-1291.

CORTINA, J.; VALLEJO, V. R.; 1994. Effects of clearfelling on forest floor accumulation and litter decomposition in a radiata pine plantation. *For. Ecol. Manage.* 70(1-3): 299-310.

DAVIDSON, E. A.; REIS DE CARVALHO, C. J.; VIEIRA, I. C. g.; FIGUEIREDO, R. D. O.; MOUTINHO, P.; YOKO ISHIDA, F.; PRIMO DOS SANTOS, M. T.; GUERRERO, J. B.; KALIF, K.; TUMA, R.; 2004. Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. *Ecol. Appl.* 14(sp4), 150-163.

DEL CAMPO, A. D.; GONZÁLEZ-SANCHIS, M.; LIDÓN, A.; CEACERO, C. J.; GARCÍA-PRATS, A.; 2018. Rainfall partitioning after thinning in two low-biomass semiarid forests: Impact of meteorological variables and forest structure on the effectiveness of water-oriented treatments. *Journal of hydrology*, 565: 74-86.

DISTEFANO, J.F.; GHOLZ, H.L. 1986. A proposed use of ion exchange resins to measure nitrogen mineralization and nitrification in intact soil cores. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 989-998.

FISCHER, R. F.; BINKLEY, D.; 2000. Ecology and management of forest soils, Wiley. New York.

GANZLIN, P. W.; GUNDALE, M. J.; BECKNELL, R. E.; CLEVELAND, C. C.; 2016. Forest restoration treatments have subtle long-term effects on soil C and N cycling in mixed conifer forests. *Ecol. Appl.* 26(5), 1503-1516.

GOBERNA, M.; SÁNCHEZ, J.; PASCUAL, J.A.; GARCÍA, C.; 2007. Pinus halepensis Mill. plantations did not restore organic carbon, microbial biomass and activity levels in a semi-arid Mediterranean soil. *Appl. Soil Ecol.* 36(2-3): 107-115.

GRADY, K. C.; HART, S. C.; 2006. Influences of thinning, prescribed burning, and wildfire on soil processes and properties in southwestern ponderosa pine forests: a retrospective study. *For. Ecol. Manage.* 234 (1-3): 123-135.

HART, S. C.; STARK, J. M.; DAVIDSON, E. A.; FIRESTONE, M. K.; 1994. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification. En: Weaver, R. W.; Scott A.; Bottomley, P.; Bezdicsek, D.; Smith, S.; Tabatabai, A.; Wollum, A. (eds.): *Methods of Soil Analysis: Part 2—Microbiological and Biochemical Properties -SSSA Book Series*, no. 5. 985-1018. Soil Science Society of America.

KAYE, J. P.; HART, S. C.; 1998. Ecological restoration alters nitrogen transformations in a ponderosa pine–bunchgrass ecosystem. *Ecol. Appl.* 8(4), 1052-1060.

KNOEPP, J.D.; SWANK, W.T.; 2002. Using soil temperature and moisture to predict forest soil nitrogen mineralization. *Biol. Fertil. Soils*, 36: 177–182.

OVERBY, S. T.; HART, S. C.; 2016. Short-term belowground responses to thinning and burning treatments in southwestern ponderosa pine forests of the USA. *Forests*. 7(2): 45.

PRESCOTT, C. E.; 2002. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree physiology*, 22(15-16): 1193-1200.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J., 2013. Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: Impacts of climatic change. *Plant Soil* 365, 1–33.

SCHIMEL, J. P.; BENNETT, J.; 2004. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85(3): 591-602.

SON, Y.; LEE, W. K.; LEE, S. E.; RYU, S. R.; 1999. Effects of thinning on soil nitrogen mineralization in a Japanese larch plantation. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30 (17-18): 2539-2550.

TECATOR Ltd UK; 1984. Application Note AN 5226. Determination of ammonium in 2M KCl soil extracts by FIAstar 5000.

TECATOR Ltd UK; 1984. Application Note AN 5201. Determination of the sum of nitrate and nitrite in water by FIAstar 5000.

THIBODEAU, L.; RAYMOND, P.; CAMIRÉ, C.; MUNSON, A. D.; 2000. Impact of precommercial thinning in balsam fir stands on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, decomposition, and foliar nutrition. *Can. J. For. Res.*, 30(2): 229-238.