



DOI: 10.29298/rmcf.v17i96.1654

Artículo de investigación

Efectos del manejo forestal en la relación carbono-nitrógeno del mantillo en bosques templados

Effects of forest management on the carbon-nitrogen ratio of litter in temperate forests

Bertha Patricia Zamora-Morales^{1*}, Aurelio Báez-Pérez², Marisela Cristina Zamora-Martínez¹, Leticia Bonilla-Valencia¹, Arian Correa-Díaz¹, Omar Santiago-Clemente³, Ismael Fernando Chávez-Díaz⁴

Fecha de recepción/Reception date: 27 de febrero de 2026.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 11 de mayo de 2026.

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (Cenid-Comef), INIFAP. México.

²Centro de Investigación Regional Centro (Circe), Campo Experimental Bajío, INIFAP. México.

³Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

⁴Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG), INIFAP. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: zamora.patricia@inifap.gob.mx

*Corresponding author; e-mail: zamora.patricia@inifap.gob.mx

Resumen

En los bosques templados, el almacenamiento de carbono se distribuye entre la biomasa, el suelo mineral y el mantillo. Este último actúa como fuente y sumidero de carbono, ya que acumula detritos vegetales que, mediante procesos de descomposición microbiana, promueven la formación de materia orgánica estable en el suelo y controlan la liberación gradual de compuestos orgánicos lábiles. En la presente investigación, se evaluó el impacto de diversos tratamientos silvícolas en la relación carbono-nitrógeno en el mantillo de bosques bajo manejo de *Pinus patula*, del ejido Emiliano Zapata, Chignahuapan, Puebla, México. Se establecieron unidades de muestreo circulares de 1 000 m², 18 distribuidas en rodales con tratamientos de Corta de Regeneración (CR), Corta de liberación (CL), Aclareo 2 (A2), y Aclareo 3 (A3); además de cinco en Corta de selección (CS). Se estimó el área basal de la masa arbórea y se muestreó el mantillo en dos capas (HO: hojarasca y FE: Fermentación); se midieron las variables edáficas de temperatura, humedad y pH. En laboratorio se determinaron el carbono orgánico (CO), nitrógeno total (NT) y la relación C:N se calculó para ambas capas, mediante modelos lineales generales con distribución gamma y los efectos con un modelo estructural de ecuaciones parciales. Se determinó que la relación C:N difiere entre HO y FE; el tratamiento con más apertura del dosel (CR) tuvo mayor influencia en el microclima del piso forestal. Por lo tanto, los tratamientos silvícolas modulan las condiciones edafoclimáticas, impactando la descomposición de la materia orgánica y el secuestro de carbono en el mantillo.

Palabras clave: Bosques templados, carbono orgánico, mantillo, nitrógeno total, relación C:N, tratamientos silvícolas.

Abstract

In temperate forests, carbon storage is distributed among biomass, mineral soil, and litter. The latter acts as both a carbon source and a carbon sink, as it accumulates plant debris that, through microbial decomposition, promotes the formation of stable organic matter in the soil and controls the gradual release of labile organic compounds. This study assessed the impact of various silvicultural treatments on the carbon-nitrogen ratio in the litter of managed *Pinus patula* forests in the *Emiliano Zapata ejido*, *Chignahuapan*, state of *Puebla*, Mexico. Circular sampling plots of 1 000 m² were established, 18 of them distributed across stands treated with Regeneration cutting (*RGC*), Release cutting (*RC*), Thinning 2 (*T2*), and Thinning 3 (*T3*), and five in stands with Selective logging (*SL*). The basal area of the tree stand was estimated, and the litter was sampled in two layers (LL: leaf litter and FE: fermentation); the soil variables of temperature, moisture, and *pH* were measured. In the laboratory, organic carbon (*OC*) and total nitrogen (*TN*) were determined, and the *C:N* ratio was calculated for both layers using general linear models with a gamma distribution and effects modeled using a Structural partial equation model. The *C:N* ratio was found to differ between LL and FE; the treatment with the most open canopy (*RGC*) had the greatest influence on the forest floor microclimate. Therefore, silvicultural treatments modulate soil and climate conditions, affecting the decomposition of organic matter and carbon sequestration in the litter layer.

Keywords: Temperate forests, organic carbon, litter, total nitrogen, *C:N* ratio, silvicultural treatments.

Introducción

Los bosques templados almacenan carbono, principalmente, en tres compartimentos: suelo, biomasa y mantillo (Galicia et al., 2016). Este último corresponde a la capa superficial del suelo (horizonte 0), formada por residuos orgánicos en diferentes etapas de descomposición, que acumula cantidades significativas de carbono, por lo que se le considera un importante reservorio de este elemento. El mantillo tiene un papel fundamental en el control de procesos ecosistémicos esenciales, como la protección del suelo contra la erosión hídrica, y contribuye a la infiltración de agua en el perfil edáfico. Además, representa la fuente primordial de nutrientes para las especies vegetales y es el componente básico para la formación de sustancias húmicas, formas de carbono recalcitrante, y de nitrógeno en el suelo (Galicia et al., 2016).

El ciclo de reciclaje del suelo es afectado por la interacción entre el carbono y otros elementos químicos, proceso que cambia según factores ecológicos concretos como las condiciones climáticas, la altitud y las propiedades del suelo (Paz-Pellat et al., 2015). En este contexto, la función del mantillo como regulador de la calidad y la

disponibilidad de nutrientes en el perfil del suelo se ha destacado en diversas evaluaciones sobre la dinámica del carbono en bosques templados, los que muestran como cambios en la temperatura y humedad afectan la dinámica de descomposición y la mineralización de esta capa orgánica del suelo (Pérez-Vázquez *et al.*, 2021).

El carbono (C) y el nitrógeno (N) son indicadores clave de la calidad de la materia orgánica, ya que influyen en la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la retención de agua y la actividad microbiana. El carbono edáfico participa en el ciclo global de este elemento, mientras que la disponibilidad de nitrógeno es un factor limitante principal de la productividad vegetal, debido a su papel como regulador del crecimiento de la vegetación. La cantidad de nitrógeno presente en el suelo está influenciada por condiciones ambientales, topografía, prácticas de manejo y tipo de vegetación, lo que determina, a su vez, la calidad de la materia orgánica.

En los bosques templados de América Latina, especialmente en ecosistemas dominados por pino y pino-oyamel, la literatura reciente sugiere que las prácticas de manejo pueden disminuir la volatilidad de la relación C:N al favorecer la entrada de materia orgánica de alta calidad y condiciones edáficas propicias para la estabilidad del carbono orgánico no mineralizable (Getino-Álvarez *et al.*, 2023). Sin embargo, los resultados varían según el diseño de la intervención (intensidad y frecuencia de la corta) y las condiciones edafoclimáticas regionales, lo que evidencia la existencia de una brecha en conocimiento respecto a la interacción causal del manejo forestal. En este sentido, aun cuando enfoques como el modelado de ecuaciones estructurales por partes (Lefcheck, 2016), han permitido aproximarse a estas relaciones complejas, su aplicación aún es limitada para capturar la variabilidad espacial y temporal, así como los efectos no lineales asociados a sistemas forestales manejados. Por ello, el fortalecimiento de estos enfoques, mediante la integración de dicha variabilidad, representa una oportunidad clave para mejorar la inferencia causal y avanzar hacia un entendimiento más robusto de los procesos que vinculan el manejo forestal con la dinámica del suelo (Lefcheck, 2016).

En este contexto, la evaluación de la relación C:N en el mantillo puede apoyar el monitoreo del impacto de las prácticas de manejo y el desarrollo de estrategias

orientadas a la sostenibilidad de los ecosistemas forestales (Fernández-Getino-García, 2024). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de los tratamientos en rodales sujetos a dos métodos de manejo: Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) sobre la relación $C:N$ en el mantillo. La hipótesis propone que la relación $C:N$ en el mantillo presenta una correlación negativa significativa con la temperatura y la humedad del suelo, y una correlación positiva con el pH del suelo; en consecuencia, aumentos de temperatura y humedad disminuirían la relación $C:N$, y valores más altos de pH lo aumentarían en función de los tratamientos silvícolas. El estudio busca contribuir al entendimiento de cómo las prácticas silvícolas influyen en los ciclos de carbono y nitrógeno, aspectos fundamentales para la sostenibilidad de los ecosistemas boscosos.

Materiales y Métodos

El sitio de estudio se localiza en el ejido Emiliano Zapata, municipio Chignahuapan, Puebla, México, entre los paralelos 19°39'42" y 19°58'48" de latitud norte y los meridianos 97°57'18" y 98°18'06" de longitud oeste, en donde prevalece un clima templado subhúmedo con lluvias en verano Cw (García, 2004), temperatura promedio anual de 13.4 °C y humedad relativa promedio anual de 85 %. La vegetación corresponde a un bosque de pino, con dominancia de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. y en menor proporción *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl.; en las partes altas (2 919 msnm) predomina *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. (Velasco-Bautista et al., 2025).

Se definió un diseño de muestreo cuasi-sistemático basado en el Programa de Manejo Forestal Maderable (PMFM) del ejido, en el cual se aplican dos métodos: Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), y el Método de Desarrollo Silvícola (MDS). El primero consiste en la corta de árboles por selección

que origina masas irregulares en edad, es decir incoetáneas. Es un método que puede implicar intervenciones frecuentes y aplicaciones silvícolas con demanda de trabajo intenso en el bosque. El MDS es representativo del manejo de masas arbóreas coetáneas; su objetivo es obtener el máximo potencial productivo del suelo mediante la aplicación de técnicas silvícolas adecuadas y programadas para cada condición del bosque (Ramírez-Maldonado, 2017).

Las unidades de muestreo (UM) se establecieron mediante una retícula de puntos equidistantes de 100 m, generada a partir de imágenes *Landsat 8* (sensor *OLI*). Se delimitaron 23 unidades de muestreo circulares de 1 000 m² (Figura 1), con base en la anualidad de los tratamientos silvícolas: tres en *CR*-Corta de Regeneración, cinco en *CL*-Corta de liberación, 10 en Aclareos (*A2* y *A3*) bajo el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), con un intervalo altitudinal de 2 757-2 855 m, y cinco en *CS*-Corta de selección correspondiente al Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), a una altitud de 2 877 a 2 919 m.

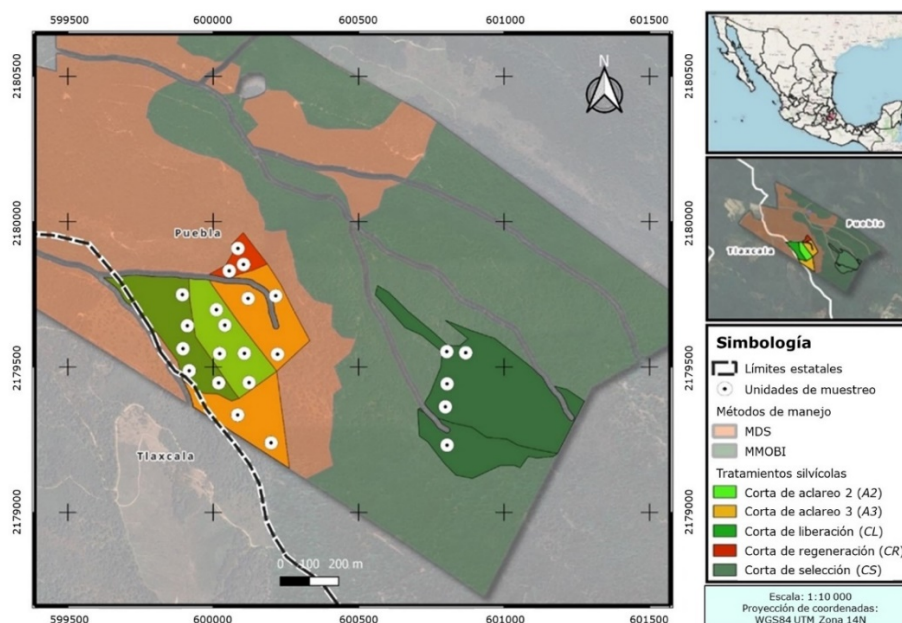


Figura 1. Área de estudio, ejido Emiliano Zapata, Chignahuapan, Puebla, México.

En cada UM se registraron las siguientes variables dasométricas en los árboles con diámetro ≥ 7 cm: edad (taladro *Pressler Haglöf*[®], diámetro interno de 5.15 mm), altura (Clinómetro *Suunto*[®] % y 0 a 90°), diámetro normal (Forcípula de aluminio, 95 cm, *Haglöf*[®] Mantax blue), cobertura de copa (cinta métrica *Truper*[®] de 50 m); además, se registró el estado físico del arbolado (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2017).

El muestreo del mantillo se realizó siguiendo la metodología del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Conafor, 2017) en cuatro subparcelas de 0.25 m² por UM (una en cada punto cardinal/cuadrante). El piso forestal se separó en las capas: hojarasca (HO) y fermentación (FE) (92 muestras por estrato). La capa total del piso forestal (*Tot*), fue obtenida por la suma de las capas HO y FE. La colecta se efectuó en la temporada húmeda (septiembre de 2023) y seca (mayo de 2024). En las UM, se registraron datos edáficos de temperatura (°C; termómetro de aguja análogo o de penetración, *AVALY*[®] TE VA-100), humedad (%) y pH (*Keway Soil Tester, Kel Instruments Co. Inc.*[®], Japón). Las mediciones se realizaron semanalmente (entre 10:00 y 11:00 a. m., a 20 cm de profundidad) durante cinco meses.

El análisis de las muestras de HO y FE se realizó en el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ubicado en el Campo Experimental Bajío, Celaya Guanajuato, México. La hojarasca se secó a 70 °C durante 72 horas en una estufa de aire forzado (*FELISA*[®] modelo FE-292AD); posteriormente, se pesó en una balanza electrónica, con precisión de centésimas de gramo (*OHAUS*[®] modelo PA3202), y se molió (molino *Willey-Arthur Thomas H. Co. Scientific Apparatus*[®]). Se determinó el contenido de carbono (CO %) por el método de digestión seca a 900 °C; el contenido de nitrógeno total (NT %) por el método *Kjeldahl*, con un equipo destilador-titulador *Velp Scientifica*[®] modelo UDK159 (Mamani et al., 2020). El contenido de carbono se obtuvo al multiplicar la concentración de C por la biomasa (peso total) de cada muestra. Con el índice de *Van Bemmelen* se estimó el carbono orgánico, asumiendo que la materia orgánica posee 58 % de carbono (López-Merlín et al., 2015; Pérez-Vázquez et al., 2021).

La relación $C:N$ se calculó a partir de los porcentajes de carbono y nitrógeno para ambas capas (HO y FE) del mantillo (Ecuación 1), la relación proporciona una estimación del grado de descomposición de la materia orgánica del suelo (Kirkby et al., 2011). Una relación $C:N$ alta, indica menor disponibilidad relativa de N (en ciertos casos, inmovilización de N), y una $C:N$ baja tiende a aumentar la disponibilidad de N :

$$\text{Relación } C:N = \frac{CO}{NT} \quad (1)$$

Donde:

CO = Carbono orgánico (%)

NT = Nitrógeno total (%)

A partir de las mediciones de diámetro a la altura del pecho (DAP), se estimó el área basal (Ecuación 2).

$$AB_i = \frac{\pi \cdot DAP_i^2}{4} \quad (2)$$

Donde:

AB_i = Área basal individual del árbol i (m^2)

DAP_i = Diámetro a la altura del pecho del árbol i (m)

π = Constante (3.1416)

El área basal por unidad de muestreo se obtuvo mediante la suma de las áreas basales individuales de todos los árboles registrados, y se expresó en $m^2 \text{ ha}^{-1}$ mediante el factor de expansión correspondiente al tamaño de la unidad de muestreo ($1\ 000 \text{ m}^2$).

Modelos lineales generalizados (GLM)

Se construyó una base de datos con 384 estimaciones de la relación $C:N$. La normalidad de los datos se evaluó con la prueba de *Shapiro-Wilk* ($W=0.95964$; $p=1.597\times 10^{-8}$) (Zar, 2010) y la homogeneidad de varianzas con la prueba de *Levene* ($p=9.278\times 10^{-9}$) que revelaron una distribución no *Gaussiana*; se aplicaron pruebas no paramétricas: *Kruskal-Wallis* para las diferencias en la relación $C:N$ entre las capas HO y FE, y *Wilcoxon-Holm* (Holm, 1979) para comparaciones entre los tratamientos silvícolas.

Para las variaciones interanuales se estimó el delta de cambio, definido como la diferencia entre la media de 2024 y la de 2023. La multicolinealidad se evaluó mediante las correlaciones de *Spearman* con la función *cor* del paquete *stats* en *R* versión 4.5.2 (R Core Team, 2024). Se mantuvieron las variables por debajo de un umbral de correlación de 0.70 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables utilizadas en los modelos lineales (solo se muestran las variables con una correlación menor a 0.7).

Acrónimo	Conjunto de variables	
Temp	Temperatura máxima julio Temperatura máxima agosto Temperatura máxima septiembre Temperatura máxima octubre Temperatura mínima julio Temperatura mínima agosto	Temperatura mínima septiembre Temperatura mínima octubre Rango de temperatura agosto Rango de temperatura septiembre Delta anual de Temperatura
<i>pH</i>	<i>pH</i> máximo julio <i>pH</i> máximo agosto <i>pH</i> máximo septiembre <i>pH</i> máximo octubre <i>pH</i> mínimo julio	<i>pH</i> mínimo agosto <i>pH</i> mínimo septiembre <i>pH</i> mínimo octubre Rango de <i>pH</i> julio Rango de <i>pH</i> septiembre Delta anual de <i>pH</i>
Hum	Humedad máxima julio Humedad máxima agosto Humedad máxima septiembre Humedad máxima octubre	Humedad mínima julio Humedad mínima agosto Humedad mínima septiembre Humedad mínima octubre Delta anual de Humedad
Silvícola	Corta de Liberación (<i>CL</i>) Corta de Aclareo 2 (<i>A2</i>) Corta de Regeneración (<i>CR</i>)	Corta de Aclareo 3 (<i>A3</i>) Corta de selección (<i>SE</i>)
Tipo_sustrato	Capa de fermentación (<i>FE</i>)	Capa de Hojarasca (<i>HO</i>)
Daso	Área basal <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham. Área basal <i>Alnus acuminata</i> Kunth Área basal <i>Arbutus xalapensis</i> Kunth Área basal <i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltld.	Área basal <i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl. Área basal <i>Pinus teocote</i> Schied. ex Schltld. & Cham. Área basal <i>Quercus crassifolia</i> Bonpl. Área basal <i>Quercus rugosa</i> Née
Época	Datos muestreados en 2023	Datos muestreados en 2024

Temp = Temperatura edáfica (máxima y mínima); *pH* = *pH* edáfico; Hum = Humedad edáfica; Silvícola = Tratamiento silvícola (*CR*-Corta de Regeneración, *CL*-Corta de Liberación, *A2*-Aclareo 2, *A3*-Aclareo 3 y *SE*-Corta de selección); Tipo_sustrato = % de C (Carbono) y % de N (Nitrógeno) en mantillo (Capa de fermentación [*FE*] y Capa de hojarasca [*HO*]); Época = Año de registro de variables (2023 y 2024).

La relación $C:N$ en las capas HO y FE se analizó mediante Modelos lineales generalizados (GLM) con distribución Gamma (log), dado que la variable respuesta es continua, positiva y asimétrica. Para evaluar los efectos significativos sobre la relación $C:N$, se ajustó un modelo global que incluyó todas las variables del Cuadro 1 y se ajustaron modelos independientes para HO y FE. Este enfoque permitió evaluar la capacidad predictiva y la estabilidad de las relaciones entre años.

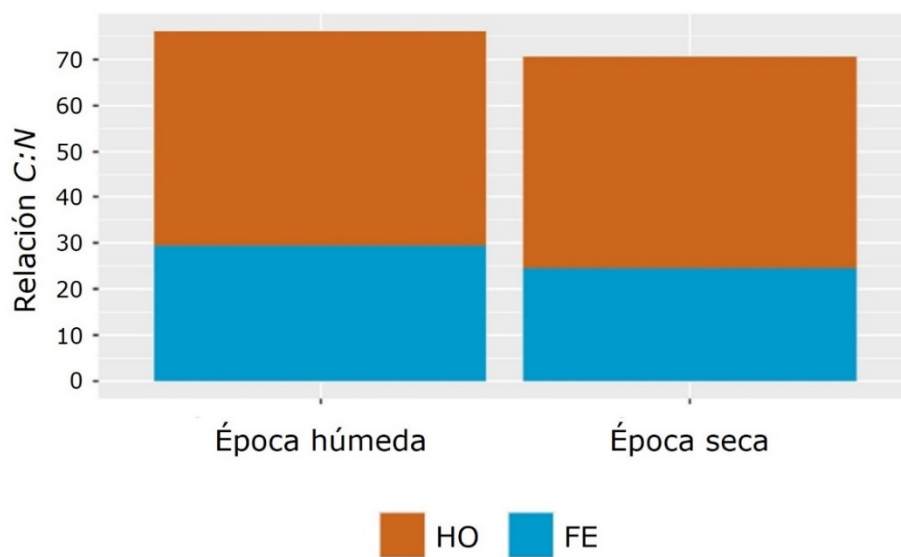
La selección de variables se realizó mediante la minimización del Criterio de Información de *Akaike* (*AIC*), utilizando la función *step* (dirección: "*both*") del paquete *stats*. Dado que la R^2 tradicional no es aplicable a GLM, se usó la pseudo- R^2 de *Nagelkerke* estimada con el paquete *bruceR*. La métrica osciló entre 0 y 1, lo que facilitó la evaluación comparativa del ajuste entre modelos y la contribución individual de cada predictor o variable (Bao, 2023).

Modelo de ecuaciones estructurales (PSEM)

Las relaciones directas e indirectas entre los tratamientos y las variables microambientales del suelo se determinaron con un modelo de ecuaciones estructurales por partes (*Piecewise structural equation model*, PSEM), en el *software R* 4.5.2 (R Core Team, 2024). Los tratamientos silvícolas fueron las variables predictoras y las de respuestas correspondieron a los cambios en la temperatura (*Temp_delta*), la humedad (*Hum_delta*) y el *pH* del suelo (*pH_delta*). La independencia del modelo se evaluó mediante la prueba de *Fisher* (Zar, 2010).

Resultados y Discusión

La relación $C:N$ del mantillo mostró una respuesta estacional diferenciada, particularmente en la fracción de fermentación (FE), mientras que la hojarasca (HO) se mantuvo relativamente constante entre estaciones (Figura 2). Este comportamiento sugiere que los cambios estacionales modulan los procesos de transformación/mineralización y, por tanto, la disponibilidad o retención de nitrógeno dentro de fracciones avanzadas en descomposición, mientras que el aporte funcional de HO se mantiene más estable (Davidson & Janssens, 2006). Es así que, la variación estacional de la relación $C:N$ puede interpretarse como el resultado de cambios en la actividad biológica y en la dinámica de descomposición en la fracción FE, con una influencia menor sobre HO (Manzoni *et al.*, 2012).



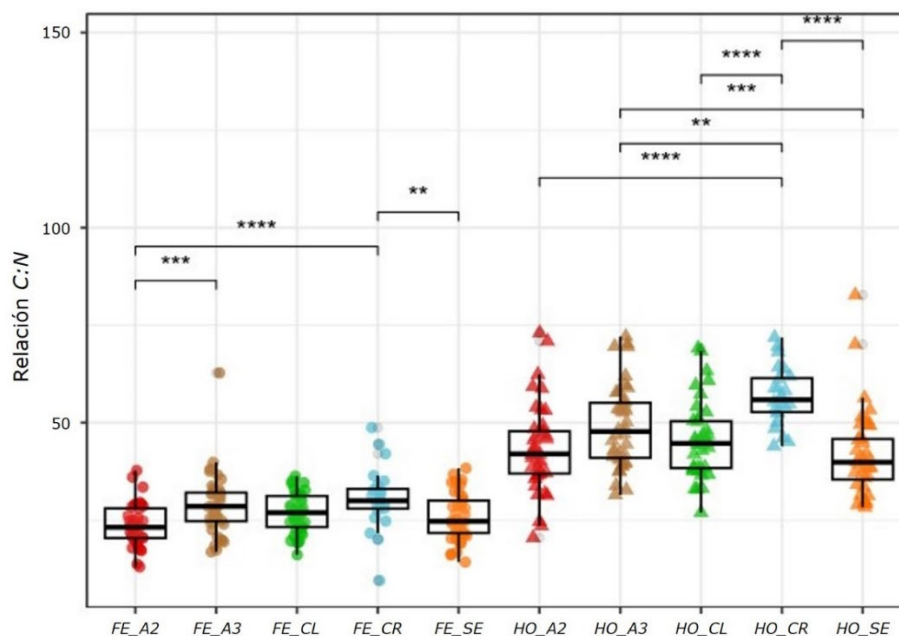
HO = Hojarasca; FE = Fermentación.

Figura 2. Efecto estacional sobre la relación $C:N$ en el mantillo en áreas bajo manejo forestal.

La prueba de *Kruskal-Wallis* fue significativa ($p < 0.001$), lo que sugiere diferencias en la relación *C:N* entre la capa de hojarasca (HO) y la de fermentación (FE). Este patrón fue consistente con los modelos lineales generalizados (GLM), que evidenciaron una dinámica distinta en las respuestas y efectos de la relación *C:N* entre ambas capas del mantillo. Ello se asocia a la constante mineralización de la materia orgánica cuando hay humedad (60-70 %) y altas temperaturas (~ 30 °C) (Spohn & Stendahl, 2024).

Efecto de los tratamientos silvícolas en la relación *C:N* en mantillo

En la capa de HO, la prueba de *Kruskal-Wallis* mostró diferencias significativas entre los tratamientos silvícolas ($X^2=22.35$, $df=4$, $p < 0.001$). La prueba de *Wilcoxon* identificó cinco pares significativamente distintos, lo que indica variabilidad entre tratamientos en la acumulación de *C* y *N*. La Corta de Regeneración (CR) mostró valores significativamente más altos de *C* y *N* en HO; mientras que las de Selección (SE) y Aclareo 2 (A2) presentaron los valores más bajos (Figura 3). La capa de fermentación (FE) registró valores bajos entre tratamientos. Así mismo, la prueba de *Kruskal-Wallis* fue significativa ($X^2=22.29$, $df=4$, $p < 0.001$), en pares de tratamientos (A2, A3, CL y CS) a nivel de capa de FE ($p < 0.001$) según la prueba de *Wilcoxon-Holm* (Holm, 1979).



FE_A2 = Capa de fermentación en el tratamiento silvícola de Aclareo 2; *FE_A3* = Capa de fermentación en el tratamiento silvícola de Aclareo 3; *FE_CL* = Capa de fermentación en el tratamiento silvícola Corta de liberación; *FE_CR* = Capa de fermentación en el tratamiento silvícola Corta de Regeneración; *FE_SE* = Capa de fermentación en el tratamiento silvícola Selección. *HO_A2* = Capa de hojarasca en el tratamiento silvícola de Aclareo 2; *HO_A3* = Capa de hojarasca en el tratamiento silvícola de Aclareo 3; *HO_CL* = Capa de hojarasca en el tratamiento silvícola de Corta de liberación; *HO_CR* = Capa de hojarasca en el tratamiento Corta de Regeneración; *HO_SE* = Capa de hojarasca en el tratamiento silvícola Selección.

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Figura 3. Diagrama de caja y bigote de la relación C:N en bosques templados bajo manejo, a nivel de tratamiento silvícola y mantillo (hojarasca [HO] y fermentación [FE]).

Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que la *CR* ejerció un efecto positivo al favorecer la acumulación de carbono en la capa FE. Las prácticas silvícolas de *SE* y *A2* mostraron patrones contrastantes para *N* (Figura 3), donde el *A2* presentó valores más bajos que la corta de *SE*. Estas diferencias se asocian a cambios en el microambiente del suelo derivados del tipo de tratamiento silvícola. La mayor acumulación de *C* en *CR* indica una menor descomposición del mantillo y una

disminución en la disponibilidad relativa de N ; resultados que coinciden con lo documentado en la literatura (Getino-Álvarez et al., 2023; Kuśmierz et al., 2023).

La relación $C:N$ es un indicador de la mineralización del nitrógeno disponible para las plantas y de la calidad de la materia orgánica (Prévost-Bouré et al., 2010). En este estudio, HO presentó valores de 41.8-48.7 y FE entre 21.3-28.5 según los tratamientos silvícolas, cifras similares a las registradas en suelos de bosques bajo manejo (Dai et al., 2001). El incremento de N se atribuye a la descomposición microbiana de la materia orgánica (Alhamd et al., 2004).

Dinámica entre capas y mecanismos

La variabilidad observada entre las capas HO y FE se explica por sus respuestas diferenciadas ante las prácticas silvícolas y a las variaciones microclimáticas. Aunque ambas capas reaccionan a los cambios inducidos por el manejo forestal, la magnitud y dirección de las respuestas difieren entre ellas (Cuadro 2); lo anterior subraya la necesidad de evaluarlas por separado (Cano-Flores et al., 2020).

Cuadro 2. Modelo global de la variable de tipo sustrato, así como los modelos para las capas de hojarasca (HO) y de fermentación (FE).

Modelo	AIC	Nagelkerke's R²	Variables	Estimador	Valor p
Global	2 566.388	0.655	<i>Temp_mín_oct</i>	-0.146	<0.001
			<i>delta_anual_Temp</i>	0.178	<0.001
			<i>pH_máx_jul</i>	-0.141	<0.001
			<i>pH_mín_jul</i>	0.146	<0.001
			<i>pH_máx_oct</i>	0.083	<0.001
			<i>Hum_máx_jul</i>	0.165	<0.001
			<i>Hum_mín_sep</i>	0.071	<0.001
			<i>Tipo sustrato</i>	0.547	<0.001
			<i>Época</i>	0.099	<0.001
Efecto interanual		0.705	<i>Temp_máx_sep</i>	-0.035	<0.001
			<i>Rango_Temp_sep</i>	0.046	<0.001
			<i>Tipo sustrato</i>	0.457	<0.001
			<i>CL</i>	0.145	<0.001
			<i>A3</i>	0.178	<0.001
			<i>CR</i>	0.131	<0.001

Temp_mín_oct = Temperatura mínima del mes de octubre; *delta_anual_Temp* = Cambios en la temperatura anual; *pH_máx_jul* = *pH* máximo del mes de julio; *pH_mín_jul* = *pH* mínimo del mes de julio; *pH_máx_oct* = *pH* máximo del mes de octubre; *Hum_máx_jul* = Humedad máxima del mes de julio; *Hum_mín_sep* = Humedad mínima del mes de septiembre; Tipo sustrato = Capa de mantillo (HO: Capa de hojarasca, FE: Capa de Fermentación); *Época* = Años 2023 y 2024; *Temp_máx_sep* = Temperatura máxima del mes de septiembre; *Rango_Temp_sep* = Rango de temperatura del mes de septiembre; *CL* = Corta de liberación; *A3* = Aclareo 3; *CR* = Corta de Regeneración (tratamientos silvícolas).

La FE registró una relación C:N menor a la determinada en la capa de HO, en donde hay mayor humedad y grado de descomposición. La primera fluctuó entre 8.6 y 12.3 Mg ha⁻¹, en la segunda varió de 32.2 a 61.1 Mg ha⁻¹ (Figura 3). La mayor relación C:N observada en la HO es consistente con la presencia de residuos recientemente

incorporados y con un menor grado de descomposición, mientras que los valores más bajos en FE reflejan un material más avanzado en su proceso de transformación biogeoquímica. Los materiales orgánicos presentes en la superficie del suelo mostraron alta heterogeneidad, tanto en cantidad como en distribución; no obstante, constituyen las principales fuentes de carbono para el sistema edáfico, y son relevantes en los procesos de acumulación y secuestro de carbono en los suelos forestales (Cano-Flores et al., 2020).

La reserva de carbono en la HO de los tratamientos silvícolas varió de 3.7 a 5.7 Mg ha⁻¹ (Figura 3), mientras que en la FE sus valores fueron de 11.6 a 16.5 Mg ha⁻¹. La mayor acumulación de carbono en la capa de fermentación (FE), junto con valores más bajos de la relación *C:N*, es consistente con procesos avanzados de descomposición y una mayor proporción relativa de nitrógeno en esta capa. Estos resultados concuerdan con estimaciones de reservorios de carbono en mantillos de otros tipos de bosques (Pérez-Vázquez et al., 2021) indicando que el proceso de descomposición/transformación no ocurre de manera homogénea a lo largo de la trayectoria HO→FE; más bien, el avance hacia FE se asocia con una disminución en el balance *C vs. N*. En este sentido se ha evidenciado que la evaluación de la dinámica de mineralización del mantillo en condiciones de campo es compleja debido a su composición heterogénea, conformada por residuos de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas con diferentes características químicas y estructurales (De Frenne et al., 2021). La descomposición de estos materiales es fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas, ya que controla las tasas de reciclaje de nutrientes esenciales y la dinámica del carbono en los suelos (Valladares-Samperio & Galicia-Sarmiento, 2021).

Variables ambientales y estacionalidad

La relación $C:N$ evidenció alta sensibilidad a las variaciones ambientales intraanuales, particularmente, durante periodos con condiciones extremas de temperatura o humedad (Cuadro 2). Sin embargo, la variabilidad interanual de la temperatura también desempeña un papel importante en la dinámica de la relación $C:N$, ya que las trayectorias de descomposición y mineralización pueden diferir entre años, incluso bajo condiciones climáticas similares a corto plazo (Gregorich et al., 2017).

En estudios recientes, se ha destacado que las tendencias temporales en la descomposición y la mineralización están vinculadas con la variabilidad climática interanual (Althuizen et al., 2018). Lo anterior respalda la idea de que escenarios climáticos futuros podrían modificar las correlaciones entre C y N en las capas superficiales, con implicaciones para las estimaciones del reservorio de carbono a largo plazo.

Predicción de la relación $C:N$ y los tratamientos silvícolas

Los modelos mostraron un buen ajuste al estimar la relación $C:N$ del año 2024 a partir de las variables registradas en 2023 (*Nagelkerke* $R^2=0.74$), lo que indica una alta capacidad explicativa del conjunto de predictores considerados. Este resultado sugiere que los tratamientos silvícolas y las condiciones microambientales asociadas contribuyen a la variación interanual de la relación $C:N$ en el mantillo (Leyva-Pablo et al., 2021). La temperatura fue una variable clave para explicar la dinámica interanual de la $C:N$, ello coincide con lo citado en la literatura respecto a que la variación térmica es un factor determinante en la predicción de la acumulación de carbono o nitrógeno en la capa de fermentación (Latterini et al., 2023).

Los tratamientos silvícolas y la relación $C:N$

El tratamiento Aclareo 2 (A2) fue el único con un efecto significativo; ello sugiere que ciertos tipos de intervención silvícola alteran la relación $C:N$ de forma detectable, cuando se considera su interacción con la temperatura (Cuadro 2). A2 presentó los valores de $C:N$ más bajos en comparación con CR, lo que indica una mayor disponibilidad de N y un mayor grado de descomposición del mantillo. En el caso de A2, la apertura del dosel asociada al aclareo modifica el microambiente del suelo, sugiriendo que la menor alteración del ambiente del piso forestal podría traducirse en una dinámica distinta de incorporación relativa de N frente al C durante la transformación del mantillo. Esto favorece la actividad microbiana y acelera los procesos de descomposición, promoviendo una mayor disponibilidad de N y, en consecuencia, valores más bajos de $C:N$. En ese sentido, la intensidad de corta actúa como modulador del microclima a nivel edáfico, el cual controla la descomposición/transformación del mantillo ($HO \rightarrow FE$) mediante cambios en la estructura química representada por $C:N$, por lo que las prácticas de manejo forestal de baja intensidad (A2 y SE) pueden favorecer la incorporación de materia orgánica de mayor calidad y mejoran las condiciones edáficas que sostienen la estabilidad del carbono orgánico no mineralizable (Spohn & Stendahl, 2024).

La relación $C:N$ del mantillo también depende del grado de descomposición de las capas HO y FE, en la que influyen tres factores principales: el clima, la calidad de la hojarasca y la abundancia de organismos degradadores (Rocha-Loredo & Ramírez-Marcial, 2009). En este estudio, las diferencias se reflejan en los valores más bajos de $C:N$ en la capa de fermentación (FE), lo que indica un mayor grado de descomposición en comparación con la hojarasca (HO). Asimismo, la variación observada entre tratamientos, particularmente en A2, sugiere que las modificaciones en el microambiente del suelo derivadas del manejo (temperatura y humedad) regulan la actividad microbiana y las tasas de descomposición. Además, la

descomposición incluye mecanismos físicos y químicos que transforman la materia orgánica en formas más estables (Rocha-Loredo & Ramírez-Marcial, 2009).

Dinámica por capa: HO y FE

Respecto a la predicción y la influencia de los tratamientos silvícolas, la mayor parte de la variación fue significativa para la relación *C:N* (Cuadro 2), lo cual se asocia a interacciones entre las prácticas de manejo y la temperatura. Cabe señalar que solo la *CR* mostró un efecto significativo ($p < 0.026$) en la capa HO, cuando se aplicaron los modelos lineales (Cuadro 3). Esto indica que la *CR* incide en la acumulación de carbono y nitrógeno en el corto plazo, especialmente, si se combina con la variación térmica o con cambios en el *pH* interanual que modulan la descomposición y la mineralización. En este contexto, el MMOBI y el MDS tienen potenciales efectos positivos al diversificar la disponibilidad de nutrientes y mantener la continuidad de la cobertura, lo que puede traducirse en una mayor incorporación de carbono orgánico de alta calidad y una menor tasa de descomposición de la fracción no mineralizable (Leyva-Pablo *et al.*, 2021).

Cuadro 3. Modelos lineales generalizados para determinar la dinámica asociada a los tratamientos silvícolas y la relación C:N a nivel de capa de mantillo.

Modelo	Tipo	Nagelkerke's R ²	Variables	Estimador	Valor p
General	HO	0.213	<i>pH_máx_jul</i>	-0.051	0.035
			<i>CR</i>	0.190	0.026
	FE	0.364	<i>Temp_máx_jul</i>	0.345	<0.001
			<i>Temp_máx_oct</i>	0.230	<0.001
			<i>Temp_mín_ago</i>	0.275	<0.001
			<i>Temp_mín_sep</i>	-0.744	<0.001
			<i>pH_máx_jul</i>	-0.250	<0.001
			<i>pH_máx_ago</i>	-0.428	<0.001
			<i>pH_máx_oct</i>	-0.648	<0.001
			<i>pH_mín_sep</i>	0.160	<0.001
			<i>pH_delta_anual</i>	-0.255	<0.001
			<i>Hum_máx_ago</i>	0.332	<0.001
			<i>Hum_mín_sep</i>	-0.686	<0.001
			<i>Época</i>	0.204	<0.001

pH_máx_jul = *pH* máximo del mes de julio; *CR* = Corta de Regeneración;

Temp_máx_jul = Temperatura máxima del mes de julio; *Temp_máx_oct* =

Temperatura máxima del mes de octubre; *Temp_mín_ago* = Temperatura mínima

del mes de agosto; *Temp_mín_sep* = Temperatura mínima del mes de septiembre;

pH_máx_jul = *pH* máximo del mes de julio; *pH_máx_ago* = *pH* máximo del mes de

agosto; *pH_máx_oct* = *pH* máximo del mes de octubre; *pH_mín_sep* = *pH* mínimo

del mes de septiembre; *pH_delta_anual* = Cambios en el *pH* anual; *Hum_máx_ago*

= Humedad máxima del mes de agosto; *Hum_mín_sep* = Humedad mínima del mes

de septiembre; *Época* = Años 2023 y 2024.

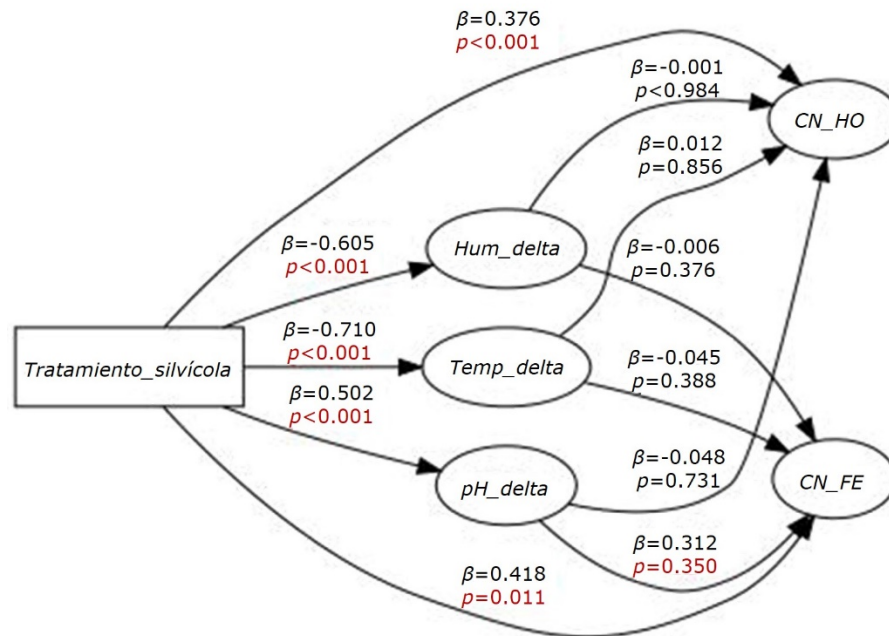
La acumulación de carbono y nitrógeno está sujeta a variaciones interanuales, esto apoya la idea de que en la dinámica de la relación C:N de la capa de FE inciden tanto patrones mensuales, como los cambios entre años (Althuisen et al., 2018; Zhang et al., 2015). En FE, la relación C:N puede explicar variaciones interanuales en el *pH*;

mientras que, en la HO, el valor máximo de *pH* en julio resultó ser una variable significativa (Cuadro 2). Entre las variables edáficas, destacó el *pH* máximo en julio como variable significativa ($p < 0.005$), en concordancia con la evidencia que identifica al *pH* interanual como un predictor significativo de la descomposición y mineralización en las capas superficiales del suelo (Kuśmierz *et al.*, 2023; Spohn & Stendahl, 2024).

Interacciones tratamientos-ambiente

Los GLM mostraron efectos significativos sobre la relación *C:N* en el tratamiento silvícola de *CR* para la capa de HO (Cuadro 2), en especial cuando se consideran sus interacciones con la variación térmica y del *pH* interanual (Figura 2). Existen dos posibles explicaciones para la relevancia limitada de los tratamientos silvícolas en los modelos aplicados: (I) Los tratamientos alteran de forma muy marcada los patrones de la relación *C:N*, de modo que en un modelo lineal no se logra capturarlos; y (II) Las variables ambientales, incluyendo el área basal por especie, podrían estar sobrerrepresentadas, lo que conlleva un ajuste excesivo (*overfitting*) (Cuadro 2 y 3).

El modelo de ecuaciones estructurales evidenció efectos directos significativos de las prácticas silvícolas y las variables edáficas. En particular, se observaron efectos directos y significativos en el cambio de temperatura (*Temp_delta*, $\beta = -0.710$, $p < 0.001$), así como en la humedad del suelo (*Hum_delta*, $\beta = -0.605$, $p < 0.001$) y en el *pH* (*pH_delta*, $\beta = 0.502$, $p < 0.001$) (Figura 4). Estos resultados sugieren que las intensidades bajas de corta (*A2* y *SE*), al modificar las condiciones edáficas superficiales favorecen una disminución en la temperatura e incremento del *pH*, por lo que se modifican los procesos ligados a la descomposición y a la mineralización de la materia orgánica (Gilliam *et al.*, 2004; Kuśmierz *et al.*, 2023).



CN_{FE} = Relación Carbono:Nitrógeno (C:N) en capa de Fermentación (FE); CN_{HO} = Relación Carbono:Nitrógeno (C:N) en capa de Hojarasca (HO); $Tratamiento_{silvicola}$ = Tratamiento silvícola; Hum_{delta} : Humedad; $Temp_{delta}$ = Temperatura; pH_{Delta} = pH . Coeficientes estandarizados (β) y valores de p . Las relaciones significativas se muestran en color rojo ($p < 0.05$).

Figura 4. Modelo estructural que determina el efecto de los tratamientos silvícolas sobre variables microambientales (temperatura y humedad) a nivel edáfico.

Al respecto, se ha documentado que la apertura del dosel forestal, por aclareos o alguna otra perturbación, reduce la densidad de cobertura y facilita la penetración de radiación solar directa y la superficie del suelo, lo que aumenta la irradiación y la ganancia de energía térmica en esa zona (Paul et al., 2022). Este incremento tiende a elevar la temperatura de la capa inferior de la atmósfera cercana al dosel, especialmente bajo condiciones de baja humedad relativa, cuando la evaporación y la transpiración no compensan el flujo de calor (Tong et al., 2024).

En este estudio, la magnitud del efecto de la temperatura en la capa de HO sugiere que, bajo condiciones de menor humedad, la interacción entre el calentamiento

superficial, la evaporación (a nivel de hojarasca) y la dinámica de transpiración, fueron probablemente intensificados en los sitios con mayor apertura del dosel (Tong *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

Por otro lado, los cambios en el *pH* mostraron una asociación significativa con la relación *C:N* tanto en HO ($\beta=0.376$, $p<0.001$) como en FE ($\beta=0.418$, $p=0.011$), indicaron modificaciones en el *pH*, inducidas indirectamente por los tratamientos silvícolas, lo que puede estar regulado por la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana, influyendo así en la dinámica del carbono y el nitrógeno, lo cual evidencia un efecto indirecto entre zonas microambientales (temperatura y humedad) a nivel de suelo y la dinámica del *C* (Kuśmierz *et al.*, 2023); es decir, que los cambios en el *pH* modifican las relaciones *C:N* en la hojarasca y en la capa de fermentación, por lo que esta variable y su variación interanual pueden utilizarse en el manejo del bosque para explicar y predecir las reservas de *C* y *N* del suelo (Spohn & Stendahl, 2024).

Conclusiones

Los tratamientos silvícolas evaluados, en particular la corta de Aclareo 2 (A2), modifican las condiciones superficiales del suelo (temperatura, humedad y *pH*), lo que se refleja en cambios indirectos en la descomposición de la hojarasca y en la dinámica del carbono y nitrógeno (*C:N*) en las capas de hojarasca y de fermentación. Estos efectos sugieren que la gestión forestal altera procesos microambientales clave con implicaciones para la resiliencia del ecosistema; sin embargo, los efectos dependen del diseño específico de la intervención (intensidad, tipo de la corta, esquema de regeneración) y de las condiciones edafoclimáticas regionales. Por ello, las prácticas de manejo requieren adaptación local y monitoreo para mitigar los impactos negativos en la relación *C:N*.

Se confirma una divergencia significativa en la relación $C:N$ entre HO y FE, lo que justifica un análisis por capa, y subraya la necesidad de incorporar ambas capas en las evaluaciones del impacto de las prácticas de manejo en la relación $C:N$.

Los resultados sugieren que la interacción entre las prácticas silvícolas y las condiciones microambientales del suelo desempeñan un papel determinante en la dinámica del mantillo y en la regulación de los procesos de acumulación y transformación del carbono en los ecosistemas forestales.

Agradecimientos

Se agradece al ejido Emiliano Zapata, Chignahuapan, Puebla, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de las actividades de campo. Asimismo, al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el financiamiento otorgado a través del proyecto "Manejo integrado de recursos forestales para la sustentabilidad de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático".

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses. Las doctoras Bertha Patricia Zamora Morales, Leticia Bonilla Valencia y la Mtra. Marisela Cristina Zamora Martínez declaran no haber participado en el proceso editorial del documento.

Contribución por autor

Bertha Patricia Zamora-Morales: diseño, establecimiento y monitoreo de actividades de campo, análisis y procesamiento de información de campo y laboratorio, y redacción del manuscrito original; Aurelio Báez-Pérez: monitoreo en campo, análisis y procesamiento

de muestras, contribución a la redacción del manuscrito; Marisela Cristina Zamora-Martínez: apoyo en la redacción del manuscrito, revisión técnica y corrección del manuscrito; Leticia Bonilla Valencia: análisis de datos y contribución a la redacción del manuscrito; Arian Correa-Díaz: revisión de la información y contribución a la redacción del manuscrito; Omar Santiago-Clemente: análisis de datos y contribución a la redacción del manuscrito; Ismael Fernando Chávez-Díaz: revisión del manuscrito.

Referencias

- Alhamd, L., Arakaki, S., & Hagihara, A. (2004). Decomposition of leaf litter of four tree species in a subtropical evergreen broad-leaved forest, Okinawa Island, Japan. *Forest Ecology and Management*, 202(1-3), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.062>
- Althuizen, I. H., Lee, H., Sarneel, J. M., & Vandvik, V. (2018). Long-term climate regime modulates the impact of short-term climate variability on decomposition in alpine grassland soils. *Ecosystems*, 21, 1580-1592. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0241-5>
- Bao, H. W. S. (2023, August 23). *bruceR: Broadly useful convenient and efficient R functions* (Version 2026) [Computer software]. Comprehensive R Archive Network. <https://CRAN.R-project.org/package=bruceR>
- Cano-Flores, O., Vela-Correa, G., Acevedo-Sandoval, O. A., & Valera-Pérez, M. Á. (2020). Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 895-905. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.757>
- Comisión Nacional Forestal. (2017). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo. Versión 17.3*. Comisión Nacional Forestal. https://www.snieg.mx/DocAcervoINN/documentacion/inf_nvo_acervo/SNIGMA/Inv_Nac_For_Suelos/INFyS_2017_Procedimientos_de_muestreo_V_17_3.pdf
- Dai, K., Johnson, C. E., & Driscoll, C. T. (2001). Organic matter chemistry and dynamics in clear-cut and unmanaged hardwood forest ecosystems. *Biogeochemistry*, 54, 51-83. <https://doi.org/10.1023/A:1010697518227>

- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, *440*, 165-173. <https://doi.org/10.1038/nature04514>
- De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B. R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M. B., Christiansen, D. M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klimes, D. H., Koelemeijer, I. A., Lembrechts, J. J., Marrec, R., ... Hylander, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, *27*(11), 2279-2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- Fernández-Getino-García, A. P. (2024). Characterization of soil organic carbon at profile scale in two forest soils under pine and holm oak. *Soil Research*, *62*(7), Article SR24051. <https://doi.org/10.1071/SR24051>
- Galicia, L., Gamboa-Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez-Vergara, B., Peña-Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, *34*(1), 1-29. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001&lng=es&tlng=es
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Serie Libros, Núm. 6). Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. <https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- Getino-Álvarez, M., San-Martin, R., Pretzsch, H., Pach, M., Bravo, F., & Turrión, M.-B. (2023). Assessing soil C stock and C to N ratio of soil organic matter under mixed pine-beech forests at different scales. *European Journal of Forest Research*, *142*, 1081-1098. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01578-5>
- Gilliam, F. S., Dick, D. A., Kerr, M. L., & Adams, M. B. (2004). Effects of silvicultural practices on soil carbon and nitrogen in a nitrogen saturated central Appalachian (USA) hardwood forest ecosystem. *Environmental Management*, *33*(Suppl 1), S108-S119. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9121-6>
- Gregorich, E. G., Janzen, H., Ellert, B. H., Helgason, B. L., Qian, B., Zebarth, B. J., Angers, D. A., Beyaert, R. P., Drury, C. F., Duguid, S. D., May, W. E., McConkey, B.

- G., & Dyck, M. F. (2017). Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon. *Global Change Biology*, 23(4), 1725-1734. <https://doi.org/10.1111/gcb.13502>
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65-70. <https://www.jstor.org/stable/4615733>
- Kirkby, C. A., Kirkegaard, J. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Blanchard, C., & Batten, G. (2011). Stable soil organic matter: A comparison of C:N:P:S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma*, 163(3-4), 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.010>
- Kuśmierz, S., Skowrońska, M., Tkaczyk, P., Lipiński, W., & Mielniczuk, J. (2023). Soil organic carbon and mineral nitrogen contents in soils as affected by their pH, texture and fertilization. *Agronomy*, 13(1), Article 267. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010267>
- Latterini, F., Dyderski, M. K., Horodecki, P., Picchio, R., Venanzi, R., Lapin, K., & Jagodziński, A. M. (2023). The effects of forest operations and silvicultural treatments on litter decomposition rate: a meta-analysis. *Current Forestry Reports*, 9, 276-290. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00190-5>
- Lefcheck, J. S. (2016). PIECEWISESEM: Piecewise structural equation modelling in R for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(5), 573-579. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>
- Leyva-Pablo, T., de León-González, F., Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. H. (2021). Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. *Madera y Bosques*, 27(4), Artículo e2742421. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742421>
- López-Merlín, D., Maldonado, V., Wayson, C., Carrillo, O., Dupuy-Rada, J. M., Ángeles-Pérez, G., Caamal-Sosa, J. P., Méndez-López, B., Sánchez-Santos, G., Chávez-Aguilar, G., Johnson, K., Tamayo, M., & Puc, S. (2015). Capítulo III. Reservorios del carbono en parcelas permanentes. En Fortalecimiento REDD+ (Ed.), *Protocolo para la estimación de la dinámica del carbono forestal en sitios de medición intensiva: un enfoque multi-escala* (pp. 16-47). Fortalecimiento REDD+ y Cooperación Sur-Sur. https://pmcarbono.org/pmc/descargas/proyectos/Documentos_Red_Mex-SMIC/Protocolo_Red_Mex_SMIC-MultiEscala.pdf

- Mamani, M., Miranda, R., López, M. A., Yujra, E., López, M., & Chuquimia, A. (2020). Validación del método Kjeldahl en la determinación del Nitrógeno Mineral, mediante el uso de Cloruro Potasio. *Apthapi*, 6(2), 1917-1925. <https://apthapi.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/60>
- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., & Ågren, G. I. (2012). Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196(1), 79-91. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x>
- Paz-Pellat, F., Wong-González, J., & Torres-Alamilla, R. (Eds.). (2015). *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2015* (Serie: Síntesis Nacionales). Programa Mexicano del Carbono, Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A. C., Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. https://www.researchgate.net/publication/301650937_Serie_Sintesis_Nacionales_ESTADO_ACTUAL_DEL_CONOCIMIENTO_DEL_CICLO_DEL_CARBONO_Y_SUS_INTERACCIONES_EN_MEXICO_SINTESIS_A_2015
- Paul, K. I., England, J. R., & Roxburgh, S. H. (2022). Carbon dynamics in tree plantings: How changes in woody biomass impact litter and soil carbon. *Forest Ecology and Management*, 521, Article 120406. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120406>
- Pérez-Vázquez, Z. R., Ángeles-Pérez, G., Chávez-Vergara, B., Valdez-Lazalde, J. R., & Ramírez-Guzmán, M. E. (2021). Enfoque espacial para modelación de carbono en el mantillo de bosques bajo manejo forestal maderable. *Madera y Bosques*, 27(1), Artículo e2712122. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712122>
- Prévost-Bouré, N. C., Soudani, K., Damesin, C., Berveiller, D., Lata, J.-C., & Dufrêne, E. (2010). Increase in aboveground fresh litter quantity over-stimulates soil respiration in a temperate deciduous forest. *Applied Soil Ecology*, 46(1), 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.06.004>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.5.2) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

- Ramírez-Maldonado, H. (2017). *Manual para la elaboración de programas de manejo forestal maderable en clima templado frío* [Libro blanco]. Comisión Nacional Forestal. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/314226/Manual_para_la_Elaboracion_de_PMFm.pdf
- Rocha-Loredo, A. G., & Ramírez-Marcial, N. (2009). Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 84, 1-12. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-21282009000100001
- Spohn, M., & Stendahl, J. (2024). Soil carbon and nitrogen contents in forest soils are related to soil texture in interaction with pH and metal cations. *Geoderma*, 441, Article 116746. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116746>
- Tong, R., Ji, B., Wang, G. G., Lou, C., Ma, C., Zhu, N., Yuan, W., & Wu, T. (2024). Canopy gap impacts on soil organic carbon and nutrient dynamic: a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, 81, Article 12. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01224-z>
- Valladares-Samperio, K., & Galicia-Sarmiento, L. (2021). Impacts of forest management on soil properties: a fundamental research topic for Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 33-52. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.088>
- Velasco-Bautista, E., Gutiérrez-García, J. V., Correa-Díaz, A., Ortiz-Reyes, A. D., & Moreno-Sánchez, F. (2025). *Diseño de muestreo temporal y métodos alternativos de estimación en un sistema de monitoreo forestal* [Folleto Técnico Núm. 38]. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Pearson Prentice Hall. https://books.google.com.mx/books/about/Biostatistical_Analysis.html?id=LCRFAQAAIAAJ&redir_esc=y
- Zhang, Y. J., Guo, S. L., Zhao, M., Du, L. L., Li, R. J., Jiang, J. S., Wang, R., & Li, N. N. (2015). Soil moisture influence on the interannual variation in temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in the Loess Plateau. *Biogeosciences*, 12(11), 3655-3664. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3655-2015>

Zhang, S., Sjögren, J., & Jönsson, M. (2024). Retention forestry amplifies microclimate buffering in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 350, Article 109973. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109973>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 [Atribución-No Comercial \(CC BY-NC 4.0 Internacional\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.