



ARTÍCULO

Las condiciones edáficas de un bosque mixto y una plantación explican sus diferencias de productividad.

José Martínez-Rivas^{1,2} ; Marín Pompa-García^{2*} ; Andrea Acosta-Hernández² , Pablito López-Serrano³ ; Christian Wehenkel³ & Carlos Aguirre-Salado⁴ .

¹Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México. 1183494@alumnos.ujed.mx

²Laboratorio de Dendroecología, Fac Cs Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México. mpgarcia@ujed.mx; andrea.acosta@ujed.mx

³Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México. p_lopez@ujed.mx; wehenkel@ujed.mx

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. carlos.aguirre@uaslp.mx

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.635>

Recibido: 16.06.2025; Aceptado 08.08.2025.

RESUMEN

La productividad forestal es un parámetro crucial en el manejo de los ecosistemas forestales, comúnmente evaluado con parámetros de crecimiento de la vegetación. No obstante, son pocas las investigaciones que asocian las propiedades fisicoquímicas del suelo como factores de la producción forestal. El objetivo de esta investigación fue analizar la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la productividad forestal en dos tipos de ecosistemas: un Bosque Natural Mixto dominado por *Pinus engelmannii* Carr. y una Plantación forestal de *Pinus arizonica* Engelm. Para ello, se realizaron análisis fisicoquímicos del suelo y se utilizó el Incremento de área basal (IAB) como indicador dendroecológico de productividad. Los resultados evidenciaron que las variaciones de las propiedades edáficas y la disponibilidad de nutrientes influyen directamente en el crecimiento forestal. El Bosque Natural Mixto presentó suelos con mayor contenido de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible, además una estructura más favorable para la actividad biológica. La Plantación forestal mostró menor fertilidad, pero mayor capacidad de retención de humedad, así como con condiciones más homogéneas, que, junto con una menor competencia interespecífica, favoreció un crecimiento más acelerado de *P. arizonica*. Por su parte, *P. engelmannii* mostro un incremento en área basal moderado, posiblemente influenciado por la competencia interespecífica y la dinámica ecológica del bosque mixto. Estas diferencias resaltan como el tipo de ecosistema y las propiedades edáficas inciden en la productividad forestal. Se recomienda el monitoreo continuo de variables edáficas y la incorporación de nuevas variables que contribuyan al modelaje del crecimiento forestal.

Palabras clave: Perfil de suelo, macroelementos, microelementos, uso de suelo, vegetación, horizontes, ancho de anillo.

SUMMARY

Forest productivity is a crucial parameter in the management of forest ecosystems and is commonly evaluated using vegetation growth metrics. However, limited research has examined the role of soil physicochemical properties as determinants of forest productivity. This study aimed to analyze the relationship between soil physicochemical characteristics and forest productivity in two ecosystem types: a mixed natural forest dominated by *Pinus engelmannii* Carr. and a forest plantation of *Pinus arizonica* Engelm. To this end, soil physicochemical analyses were conducted, and basal area increment (BAI) was used as a dendroecological proxy for productivity. The results indicated that variations in edaphic properties and nutrient availability directly influence forest growth. The mixed natural forest exhibited soils with higher levels of organic matter, total nitrogen, and available phosphorus, along with a more favorable structure for biological activity. In contrast, the plantation forest showed lower fertility but higher moisture retention capacity and more homogeneous conditions, which, combined with reduced interspecific competition, promoted the accelerated growth of *P. arizonica*.



Meanwhile, *P. engelmannii* exhibited a moderate increase in basal area, potentially influenced by interspecific competition and the ecological dynamics of the mixed forest. These findings underscore the influence of ecosystem type and edaphic properties on forest productivity. Continued monitoring of soil variables and the integration of additional factors into forest growth models are recommended to enhance predictive accuracy and inform sustainable management practices.

Key words: Soil profile, macroelements, microelements, land use, vegetation, horizons, ring width

INTRODUCCIÓN

La productividad forestal es clave para mantener los servicios que brindan los ecosistemas. Estos servicios incluyen la captura de carbono, el ciclo del agua y la producción de recursos como madera o forraje (Nunes *et al.*, 2020). Uno de los factores más importantes que influye en esta productividad es el tipo de suelo. Sus características físicas y químicas regulan la disponibilidad de nutrientes, agua y la salud de las raíces (Delgado & Gómez, 2017). Un suelo fértil, con buena estructura y alto contenido de materia orgánica, puede sostener bosques diversos y productivos, incluso en condiciones ambientales severas (Binkley & Fisher, 2019). Cuando el suelo tiene un equilibrio adecuado, las plantas crecen más rápido y con mayor resistencia. Por ejemplo, suelos con buen drenaje y capacidad para retener humedad ayudan a que los árboles resistan períodos secos (Brum *et al.*, 2019). Además, los niveles de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio están directamente ligados al crecimiento celular vegetal (Leghari *et al.*, 2016; Johan *et al.*, 2021). Sin embargo, no todos los suelos tienen el mismo potencial productivo, por lo que es esencial entender las condiciones edáficas en las diversas áreas forestales. Evaluar los suelos permite tomar decisiones más acertadas en el manejo del paisaje (Visser *et al.*, 2019). Ante el cambio climático, comprender el estado del suelo se vuelve una herramienta clave para conocer la productividad forestal y planificar acciones de restauración y manejo sostenible en bosques mixtos (González de Andrés, 2019).

La Sierra Tarahumara, ubicada en el noroeste de México, es una región de gran valor ecológico, cultural y económico. Su compleja topografía y altitud variable han moldeado una diversidad de ecosistemas, que van desde bosques templados hasta zonas áridas y subtropicales (García-García *et al.*, 2019). Esta riqueza biológica, sumada a una gran variedad de tipos de suelo, convierte a la región en un laboratorio natural ideal para estudiar cómo el ambiente edáfico influye en la productividad forestal (Pompa-García *et al.*, 2024). Los diferentes tipos de vegetación, como los bosques de pino, encino y mixtos mantienen una estrecha relación con las propiedades fisicoquímicas del suelo, lo cual influye directamente en la productividad forestal y aporta información valiosa para la planificación de un manejo sostenible (Binkley & Fisher, 2019). Además, este ecosistema es hogar de comunidades indígenas, como los Rarámuris, cuya subsistencia está estrechamente ligada al aprovechamiento de los recursos forestales, lo que subraya la importancia en la conservación y manejo sostenible (Martínez Ramírez, 2019). Económicamente, la región aporta recursos forestales maderables y no maderables que sostienen actividades locales y regionales (Rascón-Solano *et al.*, 2022). Por tanto, comprender la asociación entre suelo y productividad no solo es clave para el mantenimiento de los bosques, sino también para mejorar las condiciones de vida de quienes dependen de ellos.

Los ecosistemas forestales responden a las condiciones del suelo y al tipo de manejo. Por ejemplo, los bosques naturales conservan dinámicas ecológicas complejas que permiten mantener cierto equilibrio en la relación entre suelo y productividad (Ammer, 2019). Mientras que, en las plantaciones forestales estas dinámicas son modificadas por intervenciones que buscan acelerar el crecimiento o maximizar el rendimiento (McEwan *et al.*, 2020). Analizar cómo varía el crecimiento de los árboles medido por el Incremento de Área Basal (IAB), ofrece una oportunidad valiosa para entender con mayor profundidad la influencia del suelo en la productividad forestal (Rohner *et al.*, 2018). Si bien existen estudios que analizan el IAB o las propiedades del suelo por separado (Jevšenak & Skudník, 2021), son escasas las investigaciones que los integran como parte de una misma estrategia analítica (Rohner *et al.*, 2018; Pennington *et al.*, 2020). Sus resultados pueden orientar decisiones sobre restauración, monitoreo de productividad y manejo sostenible, fortaleciendo la conexión entre conocimiento técnico y uso racional del territorio.



En regiones como la Sierra Tarahumara, donde los ecosistemas forestales presentan alta heterogeneidad en estructura y composición (Pompa-García *et al.*, 2024), aún son escasos los trabajos que relacionan indicadores de crecimiento de los árboles con las condiciones edáficas específicas del sitio. Este enfoque no solo aporta al entendimiento científico de los factores que regulan el crecimiento forestal, sino que también ofrece herramientas prácticas para el diseño de estrategias de manejo más eficientes orientadas a la sostenibilidad (Peters *et al.*, 2019). Al considerar ambos componentes (crecimiento arbóreo y calidad del suelo), los resultados de este estudio podrán ser aplicados en programas de manejo adaptativo y planificación forestal, contribuyendo al uso racional de los recursos en contextos de cambio climático y presión sobre el territorio (Gupta *et al.*, 2025). Por tanto, el objetivo de este estudio fue analizar las diferencias de productividad entre un bosque natural mixto y una plantación forestal, asociadas a las propiedades fisicoquímicas del suelo. Para ello, se plantearon las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son las diferencias en las propiedades del suelo bajo distintos tipos de manejo? y ¿Existe una asociación entre la productividad forestal inferida por el BAI y las propiedades del suelo? La hipótesis propuesta fue que la productividad forestal está asociada a las propiedades del suelo bajo sus condiciones de manejo específico.

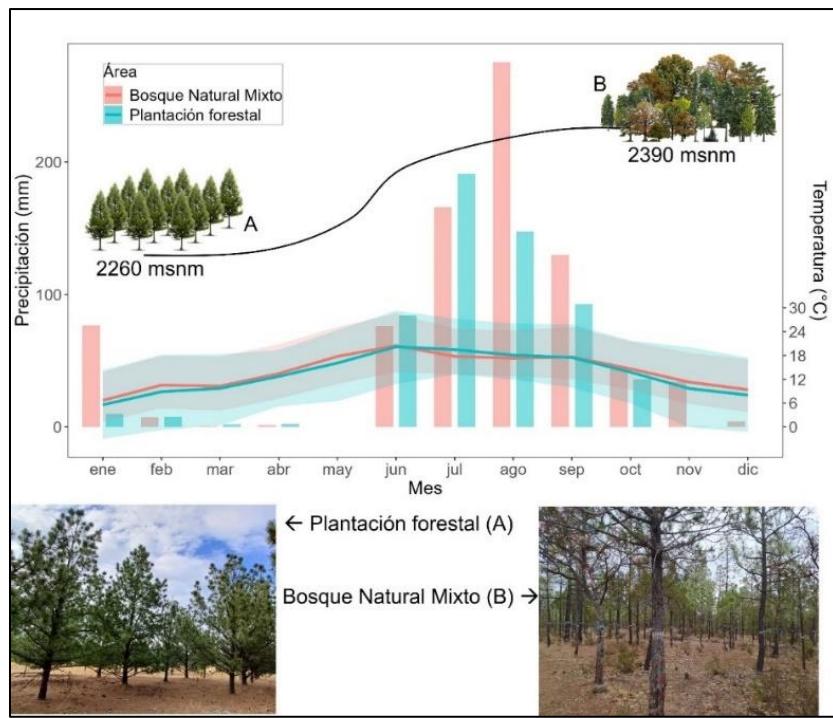
MATERIAL Y MÉTODO

El área de estudio se centra en el suroeste del estado de Chihuahua, dentro de la Sierra Tarahumara, con diferencias en la composición y estructura de la cubierta vegetal y un gradiente de altitud de 130 m. La primera área es un bosque natural mixto multietáneo ($27^{\circ}07'37''\text{N}$ $107^{\circ}06'53''\text{O}$) y la segunda corresponde a una plantación forestal de *Pinus arizonica* ($27^{\circ}08'36''\text{N}$ $107^{\circ}06'42''\text{O}$) establecida en el año 2005 (Figura 1).

En el bosque natural mixto coexisten diversas especies arbóreas pertenecientes a los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus*. La especie dominante es *P. engelmannii*, seguida por *Q. grisea* y *J. deppeana*, mientras que *A. bicolor* es la menos abundante. En el estrato arbustivo predominan los individuos de *Ceanothus buxifolius* Willd. ex Schult. f. En el estrato herbáceo, se registra una alta diversidad de plantas, con especies como *Bouvardia ternifolia* (Cav.) Schltdl., *Houstonia rubra* Cav., *Eryngium heterophyllum* Engelm., *Dysphania graveolens* Mosyakin & Clemants, *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths, y *Cyperus esculentus* L., entre otras (González-Elizondo *et al.*, 2012). Esta área presenta una topografía suave y escasa presencia de rocas; además, los bosques están sometidos a prácticas de manejo forestal con fines comerciales para la extracción de madera (García-García *et al.*, 2019). El clima en esta región se clasifica como templado, con una temperatura media anual de $13,7^{\circ}\text{C}$, con mínimas registradas de -15°C . Las precipitaciones presentan variabilidad, oscilando entre 470 y 683 mm al año, con un promedio anual de 540.4 mm y un total de aproximadamente 75 días de lluvia al año (INEGI, 2015).

En la plantación forestal de *P. arizonica*, su topografía es mayormente plana (Gallardo-Salazar *et al.*, 2021). En términos climáticos, la región presenta un clima semifrío, subhúmedo, caracterizado por veranos largos y frescos con lluvias monzónicas, así como precipitaciones invernales. La precipitación media anual es de 779 mm y la temperatura promedio anual oscila entre 5 y 12°C (Alvarado-Barrera *et al.*, 2019). Según datos de la estación meteorológica ubicada en el área de estudio, la temperatura máxima de 24.9°C se registra en junio y la mínima de $1,2^{\circ}\text{C}$ es en enero (Figura 1).





(Fuente: Martínez-Rivas & Pompa-García, 2025)

Figura 1. Climograma de las estaciones climatológicas de la Plantación forestal (A) y Bosque Natural Mixto: (B).

Análisis de Macro y Microelementos del Suelo

Para la determinación de macroelementos, microelementos y metales pesados del suelo, en cada área de muestreo se realizó una calicata de 1,8 m de profundidad (**Figura 2**), desde donde se extrajo 1 kg de suelo de cada horizonte visible. La caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo fue realizada en el Laboratorio Nacional de Análisis de Agua, Suelo, Planta y Atmosfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias CENID-RASPA en Gómez Palacio, Durango.

Derivado del análisis de suelo, se obtuvo las variables: Textura, % de arena, % de arcilla, % de limo, retención de agua a Capacidad de Campo (CC, %) y Punto de Marchitez Permanente (PMP, %), Densidad aparente (Da, g/cm³), pH_{ex}, concentración de Micro y Macroelementos (Materia orgánica, Nitrógeno, Fosforo disponible, Potasio extraíble, Calcio extraíble, Zinc, Manganese, Azufre y Boro). En **Anexo 1** se especifican los parámetros quimiométricos de los análisis efectuados.



(Fuente: Martínez-Rivas & Pompa-García, 2025)

Figura 2. Sección del suelo en la Plantación forestal (izquierda) y Bosque Natural Mixto (derecha).

Análisis Dendrocronológico

Tanto en el bosque natural como en la plantación se seleccionó visualmente 22 árboles sanos, en el primer caso de la especie dominante *P. engelmannii* y en el segundo de *P. Arizonica*. Los árboles fueron muestreados con un taladro de incremento de Pressler a 1,3 m de altura del fuste. Las muestras fueron procesadas mediante procedimientos dendrocronológicos estándares (Holmes, 1983; Stokes, 1996). Para fechar y medir el ancho total del anillo de crecimiento con una precisión de 0,01 mm se utilizó el sistema de medición Velmex (Velmex Inc., Bloomfield, NY, USA) y a partir de esos datos se generó el IAB. Este dato suele ser un indicador de cambios en el crecimiento radial y la productividad forestal y permite la comparación entre especies (Biondi y Qeadan 2008). Para el cálculo del IAB se usó la ecuación (1):

$$BAI_n = \pi r_n^2 - \pi r_{n-1}^2 \quad (1)$$

Donde:

r_n = radio del tronco en el año n.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran diferencias claras en la calidad del suelo entre los distintos tipos de cobertura analizados. Esto evidencia cómo el uso y manejo del suelo afectan sus propiedades fisicoquímicas. Estas propiedades, a su vez, influyen en la capacidad del suelo para mantener la productividad forestal. La variabilidad observada en elementos clave incluye el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes esenciales y las características físicas del suelo, como textura, densidad y capacidad de retención de agua.

Bosque Natural Mixto

El suelo del bosque natural mixto presentó mayores concentraciones de nutrientes. La concentración de Nitrógeno total fue mayor en esta área. También mostró los valores más elevados de Magnesio extraíble y óxido de Calcio. En cuanto a micronutrientes, el suelo reveló las mayores concentraciones de Fierro, Manganeso, Cobre, Zinc y Boro. Asimismo, este suelo exhibió un alto contenido de materia orgánica expresada en biomasa, mientras que la Conductividad eléctrica fue moderadamente alta. En cuanto a propiedades físicas, se identificó una textura con predominio de Arena y un bajo porcentaje de Arcilla, lo que indica buena permeabilidad y drenaje. Sin embargo, también se observaron ciertas limitaciones, por ejemplo, el contenido de Sodio extraíble fue bajo. En términos de retención hídrica, indicó bajos valores de

Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente. Asimismo, los niveles de Fósforo disponible, Potasio extraíble y Zinc fueron intermedios (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Resultados de las propiedades físicas y químicas de los análisis de suelo.

Variable	Bosque natural	Plantación
% Arcilla	8.0	6.0
% Arena	52.0	82.0
% Limo	40.0	12.0
Saturación (%)	70.5	54.2
Capacidad de Campo (%)	21.1	10.4
Punto de Marchitez Permanente (%)	7.7	4.4
Da (g/cm ³)	1.4	1.5
CE _{ex} (dS/m)	0.7	0.5
RAS _{ex}	0.3	0.2
PSI _{ex}	0.5	0.3
CIC (meq/100g)	23.7	0.0
pH _{ex}	7.6	7.1
CE (dS/m)	0.7	0.5
Na	0.3	0.7
Nitrógeno (Kg/ha)	22.4	19.5
P ₂ O ₅ (Kg/ha)	97.0	70.4
Nitrógeno (N-NO ₃)	16.3	12.9
Fosforo disponible (P)	30.8	20.3
Azufre (S)	99.9	4.2
Potasio Extraíble (K)	311.7	348.5
Magnesio Extraíble (mg)	674.6	5.7
Calcio Extraíble (ca)	2656.8	1549.2
Fierro (Fe)	173.9	28.8
Manganoso (Mn)	99.9	56.7
Cobre (Cu)	1.2	0.2
Zinc (Zn)	2.0	1.0
Boro (B)	1.2	1.5
K	4.0	10.0
K ₂ O (Kg/ha)	516.5	635.3
Ca	67.3	88.7
CaO (kg/ha)	5110.2	3279.1
Mg	28.5	0.5
MgO (kg/ha)	1537.7	14.2
Azufre (Kg/ha):	2.8	6.4
Cobre (Kg/ha)	1.6	0.3
Fierro (Kg/ha)	239.1	43.6
Zinc (Kg/ha)	2.8	1.5
Manganoso (Kg/ha)	137.3	85.8
Boro (Kg/ha):	1.7	2.2
Sodio Extraíble (NA, ppm)	14.5	14.7
Materia Orgánica (Mo, %)	3.2	1.3
Materia Orgánica (ton/ha)	44.6	19.9

Plantación Forestal

En la plantación forestal el suelo presentó valores más alto en once variables fisicoquímicas con respecto al bosque natural mixto. El suelo presentó un pH neutro con 7.1, destacándose por su mayor contenido total de óxido de Potasio, así como por el Potasio intercambiable. También mostró el mayor contenido de



Calcio intercambiable. En cuanto a micronutrientes, registró la mayor concentración de Boro total, así como el mayor contenido de Boro disponible. Desde el punto de vista físico, este suelo exhibió el porcentaje más alto de Arena, y porcentajes bajos de Arcilla y de Limo, lo cual refuerza su condición arenosa. Además, registró una densidad aparente elevada. También alcanzó el valor más alto de Conductividad eléctrica del extracto saturado. En cuanto al contenido de Sodio extraíble fue de 14,7 ppm, en cambio obtuvo el mayor valor de Cobre total y contenido de Calcio medido como nutriente disponible. Igualmente, fueron bajos los valores de Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente. Respecto a nutrientes esenciales, la plantación forestal registró los niveles más bajos de Fósforo disponible, Azufre, Magnesio y Calcio extraíbles. También mostró las concentraciones más bajas de Fierro, Manganese, Cobre y Zinc. Finalmente, el contenido de materia orgánica fue bajo tanto en porcentaje como en biomasa equivalente (**Cuadro 1**).

Productividad Inferida por IAB

Las series de crecimiento radial de *P. engelmannii* y *P. arizonica* corresponden a rodales jóvenes característicos de ecosistemas forestales mexicanos actuales (**Cuadro 1**). Se analizó un total de 44 tarugos de incremento radial (muestras cilíndricas de madera extraídas del fuste a 1,3 m de altura mediante un taladro Pressler). La edad estimada a 1,3 m de altura del fuste fue mayor en *P. engelmannii* (36 años) en comparación con *P. arizonica* (15 años). El ancho de los anillos mostró diferencias, siendo menor en *P. engelmannii* con $2,043 \pm 0,319$ mm, frente a $8,82 \pm 0,319$ mm en *P. arizonica*. Los intervalos de tiempo de las series de crecimiento abarcaron de 2010 a 2024 para *P. arizonica* y de 1988 a 2023 para *P. engelmannii*, con longitudes de 14 y 36 años respectivamente (**Cuadro 2**). Aunque para la comparación del IAB se seleccionaron los años en común de las dos series (2010-2023).

Cuadro 2. Estadísticas de las series de crecimiento radial de las especies.

Variable	Plantación	Bosque natural
Especie	<i>P. arizonica</i>	<i>P. engelmannii</i>
Numero de árboles	22	22
Numero de núcleos	44	44
Ancho promedio de los anillos (mm; desviación)	$2,043 \pm 0,319$	$8,82 \pm 0,319$
Intervalos de tiempo	2010 – 2024	1988 – 2023

Durante el periodo común analizado de 2010-2024 *P. arizonica* presentó valores significativamente más altos de IAB (media = 38,7 cm²; rango = 5,9–54,7 cm²) en comparación con *P. engelmannii* (media = 3,4 cm²; rango = 0,5–8,6 cm²) (**Figura 3**). Al analizar el comportamiento del crecimiento radial entre las dos especies mediante el BAI, *P. arizonica* mostró un patrón ascendente entre 2010 y 2019, con un incremento basal que pasó de 5,38 mm² en 2010 a un máximo de 42,65 mm² en 2019 (**Figura 3**). A partir de 2020, se observa una disminución del IAB de 38,35 mm² y 35,05 mm² en 2021. En contraste, *P. engelmannii* presenta un patrón de IAB más moderado, con valores que van desde 1,93 mm² en 2011 hasta un máximo de 8,57 mm² en 2015, seguido de una leve reducción y estabilización del crecimiento en torno a 5 mm² entre 2018 y 2023 (**Figura 3**).



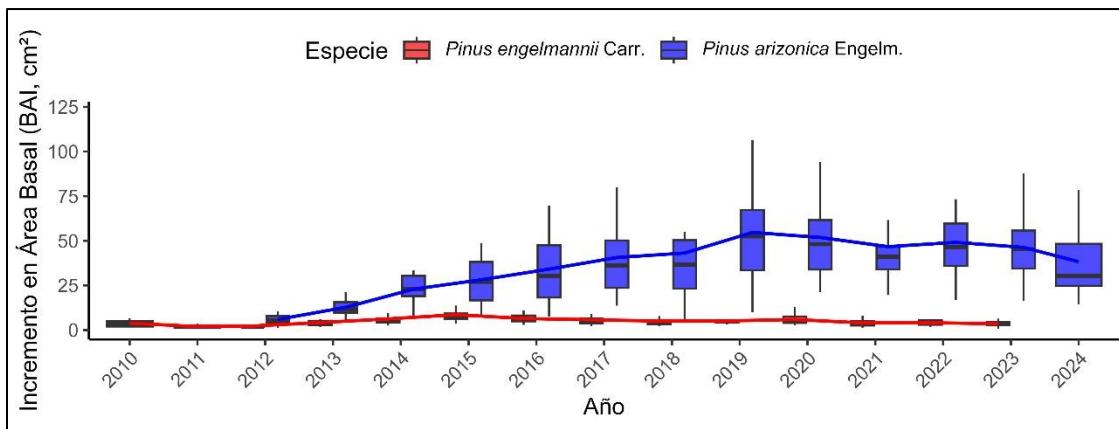


Figura 3. Incremento de área basal (IAB) de *P. engelmannii* y *P. Arizonica* para del 2010-2024.

DISCUSIÓN

La productividad forestal está influenciada por las condiciones edáficas, las cuales determinan la disponibilidad de agua y nutrientes, motores fundamentales para el crecimiento radial (Li *et al.*, 2025). En este estudio, se evaluaron comparativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo bajo dos distintos tipos de cobertura Bosque Natural Mixto y Plantación forestal, así como el Índice de Área Basal Incrementada (IAB) como un indicador relacionado con la productividad de *P. engelmannii* y *P. arizonica*. Esta doble aproximación permitió identificar tanto el potencial del suelo para sostener el crecimiento forestal como los efectos visibles en el desempeño de las especies.

Propiedades del Suelo del Bosque Natural Mixto

El suelo del bosque natural mixto presenta condiciones edáficas favorables para la productividad forestal, reflejadas en altas concentraciones de nutrientes esenciales. La mayor concentración de nitrógeno total en esta área es crucial para la síntesis de proteínas y el desarrollo vegetativo (Leghari *et al.*, 2016), elemento fundamental para un crecimiento saludable de las especies forestales. Además, los niveles elevados de magnesio extraíble y calcio oxidado indican un entorno propicio para la fotosíntesis y la formación de estructuras celulares (Maathuis, 2009), lo que refuerza el potencial del suelo para sostener especies forestales de alto rendimiento. También se destaca la presencia significativa de micronutrientes como hierro, manganeso, cobre, zinc y boro, esenciales en procesos como la formación de clorofila y la activación enzimática (Hänsch & Mendel, 2009), lo que fortalece la capacidad del suelo para soportar un crecimiento vegetal vigoroso.

El elevado contenido de materia orgánica del bosque natural mixto mejora la estructura del suelo, su capacidad de retención de agua y la actividad biológica, factores clave para la resiliencia del ecosistema (Thiffault *et al.*, 2011). En un contexto de cambio climático, estas características adquieren especial relevancia para asegurar la supervivencia de especies forestales durante períodos de sequía. La conductividad eléctrica moderadamente alta sugiere una disponibilidad adecuada de sales solubles que facilitan el transporte de nutrientes, sin alcanzar niveles que perjudiquen el crecimiento vegetal (Hazelton & Murphy, 2016). No obstante, se identifican algunas limitaciones. El contenido de sodio extraíble es bajo, y si bien minimiza el riesgo de salinización, podría indicar una reserva limitada de este elemento, que en proporciones adecuadas puede tener beneficios edáficos (Hajiboland, 2012). Asimismo, los valores relativamente bajos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente indican una retención hídrica limitada, lo que podría afectar la disponibilidad de agua durante períodos críticos (Gavrilescu, 2021).

Los niveles intermedios de fósforo disponible, potasio extraíble y zinc no representan restricciones inmediatas, pero podrían requerir ajustes según las demandas del ecosistema (Hinsinger *et al.*, 2011). Esto subraya la necesidad de un manejo adaptativo que incluya prácticas de conservación de agua y

suplementación dirigida. En conjunto, el suelo del bosque natural mixto combina buena estructura física, alta materia orgánica y abundancia de nutrientes clave, posicionándolo como un entorno propicio para la biodiversidad y productividad forestal. Para maximizar su potencial, se recomienda implementar estrategias de manejo sostenible, la incorporación de materia orgánica, que favorezcan la fertilidad y resiliencia del sistema forestal (Telo da Gama, 2023).

Propiedades del Suelo de la Plantación Forestal

La elevada concentración de potasio total y calcio intercambiable en el suelo de la plantación es favorable para el crecimiento forestal, ya que el potasio interviene en la regulación estomática, la síntesis de proteínas y la tolerancia al estrés hídrico, mientras que el calcio contribuye a la estabilidad de las paredes celulares y a la señalización intracelular durante el desarrollo vegetal (Fromm, 2010). La alta presencia de boro es también relevante, dado su rol en la formación de tejidos meristemáticos y en el transporte de azúcares (Shorrocks, 1997). El alto porcentaje de arena y la elevada densidad aparente sugieren una estructura suelta pero compactada, lo cual puede restringir el desarrollo radicular y la retención hídrica (Hazelton & Murphy, 2016). Esta condición, unida a la baja capacidad de carga y al escaso punto de marchitez permanente, indica una reducida capacidad del suelo para almacenar y suministrar agua útil para las plantas, lo que podría afectar negativamente la sobrevivencia de plántulas forestales en etapas iniciales (Gavilescu, 2021).

Desde el punto de vista químico, el suelo de la plantación forestal presentó valores bajos de los elementos fósforo disponible, hierro, zinc, cobre y manganeso, todos fundamentales para procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración celular y la actividad enzimática (Hänsch & Mendel, 2009). Además, el contenido de magnesio fue el menor registrado, lo cual es crítico, ya que este elemento es el núcleo de la molécula de clorofila y participa activamente en la transferencia de energía durante la fotosíntesis (Marschner, 2012). La materia orgánica fue baja, lo que implica una capacidad limitada para mejorar la estructura del suelo, la retención de humedad y la actividad microbiana beneficiosa (Huber *et al.*, 2006). Esta condición, junto con una nula capacidad de intercambio catiónico, evidencia una fertilidad química baja, lo que limita la capacidad del suelo para retener y suministrar nutrientes esenciales para el sustento de biodiversidad forestal.

Aunque el suelo de la plantación forestal presenta ventajas nutricionales (como el alto contenido de potasio y calcio), sus deficiencias estructurales y químicas, especialmente en materia orgánica, retención de agua y micronutrientes, lo positionan como un sustrato con poca disposición para la diversidad forestal, sin intervenciones adecuadas podría tener problemas para la productividad forestal. Para su aprovechamiento en sistemas forestales sostenibles, sería necesario aplicar estrategias de manejo como la incorporación de cubiertas orgánicas, fertilización y selección de especies tolerantes a condiciones de baja fertilidad y alta permeabilidad.

IAB como Indicador de Productividad

La diferencia en la productividad radial observada entre *P. arizonica* y *P. engelmannii* se encuentra relacionada con las condiciones edáficas de cada sitio. *P. arizonica*, establecida en un suelo caracterizado por alta concentración de potasio total, calcio intercambiable y boro, mostró un incremento acelerado a partir de 2012, alcanzando un máximo de 54,7 cm² en 2019. Estos nutrientes, particularmente el potasio, están involucrados en la regulación estomática y la tolerancia al estrés hídrico (Fromm, 2010). Mientras que el boro contribuye al desarrollo de tejidos meristemáticos (Shorrocks, 1997), lo que puede explicar su fase de crecimiento activo durante ese periodo.

La estructura edáfica de la plantación forestal (caracterizada por alta densidad aparente, bajo contenido de materia orgánica y una capacidad de intercambio catiónico nula) sugiere limitaciones en la retención hídrica y la fertilidad, especialmente en micronutrientes esenciales como hierro, zinc, manganeso y cobre, por debajo de niveles óptimos (Hänsch & Mendel, 2009). Esta condición podría restringir el crecimiento sostenido a mediano y largo plazo, sugiriendo que el rápido aumento del IAB observado en *P. arizonica* podría estar asociado más a su juventud, vigor y plasticidad funcional que a una calidad edáfica elevada. Por el contrario, *P. engelmannii*, localizada en el bosque natural mixto con una alta densidad arbórea,



mostró un crecimiento más estable, con un IAB nunca superior a 9 cm². No obstante, esta respuesta debe interpretarse a la luz de las condiciones del suelo, notablemente más favorables en términos de fertilidad química y estructura. La mayor concentración de nitrógeno total, calcio oxidado, magnesio extraíble y micronutrientes como hierro, cobre y boro sugiere que el suelo es capaz de sostener el crecimiento radial de diferentes especies arbóreas. Sin embargo, la mayor competencia por los nutrientes disponibles debido a la alta densidad de especies arbóreas (Pompa-García *et al.*, 2024), podría estar jugando un papel crucial en el crecimiento radial de las especies (Maathuis, 2009; Cross & Perakis, 2011). Además, el alto contenido de materia orgánica y una conductividad eléctrica moderada indican buena disponibilidad de nutrientes y condiciones aptas para la actividad biológica y la retención de agua (Thiffault *et al.*, 2011; Hazelton & Murphy, 2016).

El análisis del IAB mostró diferencias en la dinámica de crecimiento entre *P. arizonica* y *P. engelmannii*, revelando la interacción entre sus características fisiológicas, ontogenéticas y las condiciones edáficas entre ambas especies. *P. arizonica*, representada por árboles jóvenes de rápido crecimiento en un suelo pobre, pero con nutrientes esenciales, mostró una curva de IAB ascendente y un patrón de crecimiento acelerado durante la última década. En contraste, *P. engelmannii* con individuos de mayor edad y alta densidad en un suelo fértil y bien estructurado, presentó un crecimiento más estable. Su reducida tasa de crecimiento puede atribuirse a la competencia por nutrientes. Estas diferencias también podrían reflejar distintas estrategias de asignación de carbono entre especies: mientras *P. arizonica* prioriza el crecimiento radial durante su fase juvenil, *P. engelmannii* podría estar canalizando recursos hacia mantenimiento estructural, defensa química o almacenamiento, en coherencia con su mayor edad y tolerancia ecológica (Reich, 2014). En conjunto, estos resultados refuerzan la importancia de considerar la edad, la historia del rodal y las características funcionales específicas de cada tipo de suelo al evaluar su potencial productivo y su respuesta al cambio climático.

El análisis de los suelos revela que el bosque natural mixto presentó las condiciones más favorables para la diversidad y productividad forestal, con altas concentraciones de nitrógeno, magnesio, calcio, hierro, manganeso, zinc, cobre y boro, así como por su notable acumulación de materia orgánica (44,6 t/ha). Esta combinación indica una fertilidad natural elevada y una excelente capacidad de retención de nutrientes. Mientras que la plantación forestal presenta las condiciones más desfavorables, lo que limita su capacidad para sostener vegetación forestal sin intervenciones correctivas, como aumentar la materia orgánica y aplicar fertilizantes estratégicamente.

La evaluación del IAB constituye una herramienta clave para caracterizar la dinámica del crecimiento radial de las especies forestales. No obstante, es importante considerar que este análisis se basa en datos de crecimiento retrospectivo sin control experimental sobre los factores edáficos o climáticos específicos, por lo que futuras investigaciones deberían integrar experimentos de campo que analicen directamente la interacción entre variables del suelo y crecimiento radial, así como evaluar la influencia de eventos extremos como sequías o incendios, para afinar las estrategias de manejo forestal en ecosistemas de montaña del norte de México.

A pesar de que los resultados permiten identificar claramente las diferencias entre los tipos de suelo evaluados y su potencial para la productividad forestal, existen limitaciones en el estudio. El análisis se realizó en una única campaña de muestreo, lo que impide captar la variabilidad estacional y los cambios temporales que pueden influir en las propiedades fisicoquímicas del suelo. Además, se omitieron análisis biológicos y microbiológicos, que son cruciales para entender procesos como la descomposición de materia orgánica, la fijación biológica de nitrógeno y la dinámica microbiana, todos esenciales para la fertilidad del suelo. Tampoco se consideró indicadores de erosión y escorrentía, que podrían afectar la sostenibilidad del sitio a largo plazo. Por último, resta probar la potencialidad genética del arbolado como probable factor diferenciador de las métricas de IAB entre ambos sitios. Para investigaciones futuras, se sugiere realizar un monitoreo continuo a lo largo del tiempo, incluir indicadores biológicos y microbiológicos, así como considerar variables fisiográficas, lo que permitiría obtener una comprensión más completa del funcionamiento del suelo y su relación con la productividad forestal.

CONCLUSIÓN

Este estudio confirmó que las propiedades fisicoquímicas del suelo, moduladas por el tipo de manejo y la densidad, influyen significativamente en la productividad forestal; ello se evidenció a través del crecimiento biológico medido con el incremento en área basal (IAB) de las dos especies dominantes estudiadas. Respecto a las propiedades fisicoquímicas, el suelo del bosque natural mixto, con alta fertilidad, contenido equilibrado de nutrientes y moderada retención hídrica, muestran condiciones favorables para soportar vegetación diversa. En contraste, el suelo de la Plantación forestal mostró limitaciones texturales y bajos contenidos de materia orgánica, lo que aparentemente restringe su capacidad de sostener diversidad vegetal. Respecto a la relación entre el BAI y las condiciones edáficas fue particularmente evidente que *P. arizonica* mostró mayor productividad, mientras que *P. engelmannii* mantuvo un crecimiento más limitado, posiblemente restringido por factores hídricos y de competencia que aún restan por evaluarse.

Estos hallazgos demuestran que la variabilidad espacial en las propiedades del suelo puede explicar diferencias sustanciales en el desempeño de especies forestales, especialmente en contextos semiáridos vulnerables al cambio climático. Este enfoque integrado de análisis de suelos y procedimientos dendroecológicos permite identificar cualidades edáficas críticas para el manejo forestal sustentable, con implicaciones directas para estrategias de restauración ecológica. La incorporación de indicadores edáficos en el diseño de políticas forestales es esencial para mejorar la comprensión y resiliencia de los ecosistemas forestales, particularmente frente a escenarios de creciente aridez y presiones antropogénicas.

REFERENCIAS

- Alvarado-Barrera, R., Pompa-García, M., Zúñiga-Vásquez, J.M. & Jiménez-Casas, M. (2019).** Spatial analysis of phenotypic variables in a clonal orchard of *Pinus arizonica* Engelm. in northern Mexico. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 25(2): 185-199. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.11.086>
- Ammer, C. (2019).** Diversity and forest productivity in a changing climate. New phytologist, 221(1): 50-66. <https://doi.org/10.1111/nph.15263>
- Binkley, D. & Fisher, R.F. (2019).** Ecology and management of forest soils. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119455745.fmatter>
- Biondi, F. & Qeadan, F. (2008).** A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. Tree-Ring Research, 64(2): 81-96. <https://doi.org/10.3959/2008-6.1>
- Brum, M., Vadeboncoeur, M.A., Ivanov, V., Asbjornsen, H., Saleska, S., Alves, L.F., ... & Oliveira, R.S. (2019).** Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon Forest. Journal of Ecology, 107(1): 318-333. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13022>
- Cross, A. & Perakis, S.S. (2011).** Tree species and soil nutrient profiles in old-growth forests of the Oregon Coast Range. Canadian Journal of Forest Research, 41(1): 195-210. <https://doi.org/10.1139/X10-199>
- Delgado, A. & Gomez, J.A. (2017).** The soil. Physical, chemical and biological properties. In *Principles of agronomy for sustainable agriculture* (pp. 15-26). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_2
- Fromm, J. (2010).** Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. Tree Physiology, 30(9): 1140-1147. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq024>
- Gallardo-Salazar, J.L., Carrillo-Aguilar, D., Pompa-García, M. & Aguirre-Salado, C.A., (2021).** Multispectral indices and individual-tree level attributes explain forest productivity in a pine clonal orchard of Northern Mexico. Geocarto International, 37(15): 4441-4453. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886341>
- García-García, S.A., Narváez Flores, R., Olivas García, J.M. & Hernández Salas, J. (2019).** Diversidad y estructura vertical del bosque de pino-encino en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 10(53): 41-63. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.173>



- Gavrilescu, M. (2021).** Water, soil, and plants interactions in a threatened environment. *Water*, 13(19): 2746. <https://doi.org/10.3390/w13192746>
- González de Andrés, E. (2019).** Interactions between climate and nutrient cycles on forest response to global change: The role of mixed forests. *Forests*, 10(8): 609. <https://doi.org/10.3390/f10080609>
- González-Elizondo, M.S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J.A., Ruacho-González, L. & López-Enríquez, I.L. (2012).** Vegetación de la sierra madre occidental, México: Una síntesis. *Acta botánica mexicana*, N°100. Pp: 351-403. <https://www.scielo.org.mx/pdf/abm/n100/n100a12.pdf>
- Gupta, S.K., Panwar, P., Banyal, R. & Ramanan S.S. (2025).** Forest Soils. In: Mandal, A.K., Nicodemus, A. (eds) Textbook of Forest Science. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8289-5_9
- Hajiboland, R. (2012).** Effect of micronutrient deficiencies on plants stress responses. In: Ahmad, P. & Prasad, M. (Eds.) *Abiotic stress responses in plants: metabolism, productivity and sustainability*, Springer, New York, NY.283-329. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0634-1_16
- Hänsch, R. & Mendel, R.R. (2009).** Physiological functions of mineral micronutrients (cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, cl). *Current opinion in plant biology*, 12(3), 259-266. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>
- Hazelton, P. & Murphy, B. (2016).** Interpreting soil test results: What do all the numbers mean? CSIRO publishing.
- Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.P., ... & Plassard, C. (2011).** Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant and Soil*, N° 348. Pp: 29-61. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y>
- Holmes, R.L. (1983).** Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement.
- Huber, G.W., Iborra, S. & Corma, A. (2006).** Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical reviews*, 106(9): 4044-4098. <https://doi.org/10.1021/cr068360d>
- INEGI. (2015).** Anuario estadístico y geográfico de Chihuahua. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825076191.pdf
- Jevšenak, J. & Skudník, M. (2021).** A random forest model for basal area increment predictions from national forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, N° 479, 118601. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118601>
- Johan, P. D., Ahmed, O. H., Omar, L. & Hasbullah, N.A. (2021).** Phosphorus transformation in soils following co-application of charcoal and wood ash. *Agronomy*, 11(10), 2010.
- Leghari, S. J., Wahcho, N. A., Laghari, G. M., HafeezLaghari, A., MustafaBhabhan, G., HussainTalpur, K., ... & Lashari, A.A. (2016).** Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9): 209-219. https://www.researchgate.net/publication/309704090_Role_of_Nitrogen_for_Plant_Growth_and_Development_A_review
- Li, Z., Chai, Y., Gao, C., Li, J. & Cui, K. (2025).** The heterogeneity of *Pinus yunnanensis* plantation growth was driven by soil microbial characteristics in different slope aspects. *BMC Plant Biology*, 25(1): 114. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06152-2>
- Maathuis, F. J. (2009).** Physiological functions of mineral macronutrients. *Current opinion in plant biology*, 12(3): 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Martínez Ramírez, M. I. (2019).** El otro del otro. Entre dos narrativas sobre la explotación forestal de la Sierra Tarahumara, Chihuahua, México. *Revista de El Colegio de San Luis*, 9(19): 125-150. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-899X2019000200125&script=sci_arttext
- Marschner, H. (2012).** Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.

- McEwan, A., Marchi, E., Spinelli, R. & Brink, M. (2020).** Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. *Journal of Forestry Research*, 31, 339-351. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01019-3>
- Nunes, L. J., Meireles, C. I., Pinto Gomes, C. J. & Almeida Ribeiro, N. M. (2020).** Forest contribution to climate change mitigation: Management oriented to carbon capture and storage. *Climate*, 8(2): 21. <https://doi.org/10.3390/cli8020021>
- Pennington, S.C., McDowell, N.G., Megonigal, J.P., Stegen, J.C. & Bond-Lamberty, B. (2020).** Localized basal area affects soil respiration temperature sensitivity in a coastal deciduous forest. *Biogeosciences*, 17(3): 771-780. <https://doi.org/10.5194/bg-17-771-2020>
- Peters, M.K., Hemp, A., Appelhans, T. et al. (2019).** Climate–land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions. *Nature* N° 568. Pp: 88–92. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1048-z>
- Pompa-García, M., Romero-Rocha, S., Martínez-Rivas, J.A., Vivar-Vivar, E.D., Rodríguez-Flores, F.D.J. & Yerena-Yamallel, J.I. (2024).** Kawí Tamiruyé: A permanent research forest plot in the Sierra Tarahumara. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(86): 123-143. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i86.1496>
- Rascón-Solano, J., Aguirre-Calderón, Ó.A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E.J. & Nájera-Luna, J.A. (2022).** Productividad del abastecimiento e industrialización maderable en el ejido Aboreachi, Guachochi, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71): 133-158. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1142>
- Reich, P. B. (2014).** The world-wide ‘fast–slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of ecology*, 102(2): 275-301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>
- Rohner, B., Waldner, P., Lischke, H., Ferretti, M., & Thürig, E. (2018).** Predicting individual-tree growth of central European tree species as a function of site, stand, management, nutrient, and climate effects. *European Journal of Forest Research*, N°137. Pp: 29-44. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1087-7>
- Shorrocks, V.M. (1997).** The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and soil*, 193(1): 121-148. <https://doi.org/10.1023/A:1004216126069>
- Stokes, M.A. (1996).** An introduction to tree-ring dating. University of Arizona Press.
- Telo da Gama, J. (2023).** The role of soils in sustainability, climate change, and ecosystem services: Challenges and opportunities. *Ecologies*, 4(3): 552-567. <https://doi.org/10.3390/ecologies4030036>
- Thiffault, E., Hannam, K.D., Paré, D., Titus, B.D., Hazlett, P.W., Maynard, D.G. & Brais, S. (2011).** Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests—A review. *Environmental Reviews*, 19(NA): 278-309. <https://doi.org/10.1139/a11-009>
- Visser, S., Keesstra, S., Maas, G., De Cleen, M. & Molenaar, C. (2019).** Soil as a basis to create enabling conditions for transitions towards sustainable land management as a key to achieve the SDGs by 2030. *Sustainability*, 11(23): 6792. <https://doi.org/10.3390/su11236792>

Anexo 1

Cuadro A1.1 Parámetros quimiométricos de las metodologías empleadas.

Elemento	Un.	Corr.	Ecuación de Curva	LOD	LOC	Rango lineal	Precisión n	% de Error	% Recobro	Técnica
Cobre	ppm	0,999	$Y = 0,0077 + 0,0495 * x$	0,11	0,32	0,32 - 8	98,3	1,70	<96,0	AAS
Fierro	ppm	0,998	$Y = 0,0108 + 0,0244 * x$	0,38	1,14	1,14 - 16	96,9	3,10	<96,0	AAS
Zinc	ppm	0,997	$Y = 0,0224 + 0,1629 * x$	0,10	0,29	0,29 - 3,2	96,1	3,90	<96,0	AAS
Manganoso	ppm	0,998	$Y = 0,0174 + 0,0577 * x$	0,21	0,63	0,63 - 9,6	97,1	2,90	<96,0	AAS
Calcio	ppm	1,000	$Y = 0,0015 + 0,0292 * x$	0,04	0,12	0,12 - 16	99,7	0,30	<98,0	AAS
Magnesio	ppm	0,998	$Y = 0,0382 + 0,4827 * x$	0,05	0,16	0,16 - 2,4	97,1	2,90	<96,0	AAS
Potasio	ppm	1,000	$Y = -46,5 + 1847,1 * x$	0,00	0,01	0,01 - 4	99,9	0,10	<98,0	AAS
Níquel	ppm	0,999	$Y = 0,4167 + 34,650 * x$	0,02	0,05	0,05 - 1,6	98,6	1,40	<96,0	AAS
Arsénico	ppb	0,999	$Y = 0,0248 + 0,0026 * x$	5,43	16,3	16,3 - 320	98	2,00	<96,0	HG
Plomo	ppb	0,998	$Y = 0,0168 + 0,0058 * x$	1,44	4,31	4,31 - 64	97,1	2,90	<97,0	HG
Cadmio	ppb	0,995	$Y = 0,0205 + 0,0693 * x$	0,33	0,99	0,99 - 8	94,6	5,40	<95,0	HG
Fosforo	ppm	0,999	$Y = 0,0065 + 0,0057 * x$	0,59	1,78	1,78 - 80	98,9	1,10	<96,0	C
Nitrógeno	ppm	0,999	$Y = 0,021 + 0,0355 * x$	0,51	1,54	1,54 - 24	96,8	3,20	<94,0	C

Donde: Un= unidades, *Corr= correlación, LOD= Límite optimo detectable, LOC= Límite optimo cuantificable. AAS= Espectrometría de Absorción Atómica, HG= técnica de horno de grafito, C= Colorimetría.

