Agrociencia Uruguay 2026 | Volume 30 | Number NE1 | Article e1718
DOI: 10.31285/AGRO.30.1718
ISSN 2730-5066

Investigaciones en pecán en Sudamérica

Arquitectura arbórea en una plantación de pecán (*Carya illinoinensis*): Las relaciones funcionales intraárbol y la interrelación con los recursos del suelo

Cambareri, G.[1]; Ziegler, V. H.[2], Awang, E.[3 4]; Leite, F.[3]; Fernández, F.[1 5]; Frusso, E.[1 2]

[1]*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires, Argentina*
[2]*Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina*
[3]*Global Research Alliance, CLIFF-GRADS Program, Dublin, Ireland*
[4]*Federal University of Agriculture, Makurdi, Nigeria*
[5]*Universidad Nacional de Catamarca, Facultad de Agronomía, Catamarca, Argentina*

Editor

María Cristina Soldati
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Buenos Aires, Argentina

Received *21 Mar 2025*
Accepted *23 May 2025*
Published *13 Feb 2026*

Correspondence

Gustavo Cambareri
cambareri.gustavo@inta.gob.ar

Resumen

En pecán, el área de proyección de copa (APC), el diámetro de tronco (DBH) y la altura del árbol (H) son componentes de la arquitectura arbórea que interactúan entre sí y con el suelo. El objetivo de este trabajo fue validar si las relaciones funcionales de la arquitectura arbórea a nivel intraárbol y su interrelación con los recursos edáficos (carbono orgánico del suelo [COS] y zinc [Zn]) observadas en otras plantaciones frutales ocurren también en una plantación de pecán bajo las condiciones edafoclimáticas específicas del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Para ello se determinaron: el APC mediante fotogrametría utilizando un dron mini, COS, nitratos, amonio y Zn en suelo (0-20 cm de profundidad) e indicadores dasométricos (DBH, altura), medidos con cinta métrica y regla telescópica. Las determinaciones se realizaron durante el mes de abril (coincidiendo con el momento del fin del llenado de la nuez) durante los años 2022, 2023 y 2024 en una plantación multicultivar ubicada en la EEA INTA Balcarce (37,76º S, 58,29º O). Se encontraron correlaciones positivas para APC vs. DBH, DBH vs. H, y APC vs. H (en todos los casos, p<0,001), APC vs. COS (r=0,63, p=0,001) (2022, 2023 y 2024), y para la concentración de Zn vs. APC (r=0,54, p=0,03) (2022 y 2023). Nuestros resultados indican que los parámetros medidos intraplanta (APC, DBH y H) se retroalimentan positivamente, pero la variable más asociada a los recursos disponibles que se encuentren en el suelo es el APC.

Palabras clave: pecán, área de copa, diámetro de tronco, altura, carbono orgánico

CC BY

Cambareri, G., Ziegler, V. H., Awang, E., Leite, F., Fernández, F., & Frusso, E. (2026). Arquitectura arbórea en una plantación de pecán (*Carya illinoinensis*): Las relaciones funcionales intraárbol y la interrelación con los recursos del suelo. *Agrociencia Uruguay, 30*(NE1), Article e1718. https://doi.org/10.31285/AGRO.30.1718

Tree Architecture in a Pecan Orchard (*Carya illinoinensis*): Intra-Tree Functional Relationships and Interactions with Soil Resources

Abstract

The generation of tree components and their distribution determine the architecture of fruit orchards. In pecans, canopy projection area (CPA), trunk diameter (TBD), and tree height (H) are components of tree architecture that interact with each other and with the soil. They also play a role in resource extraction from the environment, with soil organic carbon (SOC) and zinc (Zn) being key elements. The objective of this study was to determine and analyze soil-tree functional relationships in a pecan orchard located in the southeast of the province of Buenos Aires, Argentina. To this end, CPA (photogrammetry using a mini drone), SOC, nitrates, ammonium, and Zn in soil (0-20 cm depth), and dasometric indicators (TBD, height) were determined using a tape measure and a telescopic ruler. Determinations were made during the month of April (near the end of nut filling) during the years 2022, 2023 and 2024 in a multi-cultivar plantation located at the EEA INTA Balcarce (37.76º S, 58.29º W). The data were analyzed using Pearson's correlation with R-Studio. Significant correlations were found for APC vs. DBH ($r=0.63$, $p<0.001$), APC vs. H ($r=0.6$, $p<0.001$) (all years), APC vs. COS ($r=0.63$, $p=0.001$) (2022, 2023 and 2024), and for the concentration of Zn vs. APC ($r=0.54$, $p=0.03$) (2022 and 2023). Our results indicate that the parameters measured within the plant (CPA, TBD and H) provide positive feedback, but the variable that is most associated with the available resources found in the soil is the APC.

Keywords: pecan, canopy area, trunk diameter, height, soil organic carbon

Arquitetura arbórea em um pomar de nogueira-pecã (*Carya illinoinensis*): Relações funcionais intra-árvore e interações com os recursos do solo

Resumo

Em nogueira-pecã, a área de projeção da copa (APC), o diâmetro do tronco à altura do peito (DAP) e a altura da árvore (H) são componentes da arquitetura arbórea que interagem entre si e com o solo, sendo o carbono orgânico do solo (COS) e o zinco (Zn) elementos-chave. O objetivo deste estudo foi determinar e analisar as relações funcionais solo–árvore em um pomar de nogueira-pecã localizado no sudeste da província de Buenos Aires, Argentina. Para isso, foram determinados a APC (por fotogrametria utilizando um mini-drone), o COS, nitratos, amônio e Zn no solo (0–20 cm de profundidade), bem como indicadores dasométricos (DAP e altura), utilizando fita métrica e régua telescópica. As determinações foram realizadas durante o mês de abril (próximo ao final do enchimento das nozes) nos anos de 2022, 2023 e 2024, em uma plantação multicultivar localizada na EEA INTA Balcarce (37,76° S; 58,29° W). Os dados foram analisados por meio de correlação de Pearson utilizando o software R-Studio. Foram encontradas correlações significativas entre APC e DAP ($r = 0,63$; $p < 0,001$), APC e H ($r = 0,60$; $p < 0,001$) (todos os anos), APC e COS ($r = 0,63$; $p = 0,001$) (2022, 2023 e 2024), e entre a concentração de Zn e a APC ($r = 0,54$; $p = 0,03$) (2022 e 2023).Os resultados indicam que os parâmetros medidos na planta (APC, DAP e H) apresentam retroalimentação positiva; entretanto, a variável mais fortemente associada aos recursos disponíveis no solo foi a APC.

Palavras-chave: nogueira-pecã, área de projeção da copa, diâmetro do tronco, altura, carbono orgânico do solo

1. Introducción

Las plantas desarrollan su forma a través de un patrón de crecimiento específico (también llamado modelo arquitectónico). Es así que en cultivos frutales la arquitectura vegetal es un tema importante, principalmente por tratarse de especies arbóreas (Hallé, 1978; Hallé & Oldeman, 1970). La arquitectura de la planta resulta de las disposiciones temporales y espaciales de las ramas primarias, secundarias y terciarias, y es el resultado de los rasgos morfológicos de los brotes y su desarrollo (Lauri, 2007). Esto es importante para comprender el crecimiento de la especie o cultivar frutícola, su patrón de ramificación y su productividad. Los factores endógenos

(genéticos), los exógenos (ambientales) y la utilización de portainjertos afectan la arquitectura de las plantas (Hallé, 1978), sumado a que los factores genéticos cambian características de la arquitectura entre los cultivares dentro de una especie.

Entre las variables respuesta que definen la arquitectura vegetal en las especies frutícolas se encuentran el diámetro del tronco (DBH), la altura (H) y el área de la copa (APC). En general, un mayor DBH y una mayor H del árbol están asociados con un APC más desarrollado, lo que resulta en una mayor capacidad fotosintética y, por ende, en un mayor rendimiento productivo de diversas especies frutícolas y arbóreas. Sin embargo, en árboles frutales existe una jerarquía en la asignación de asimilados en la que los destinos más fuertes son los frutos y los órganos más débiles son el tronco y las raíces (Grossman & DeJong, 1994). En condiciones de limitación de agua, nutrientes o luz disminuye la producción de fotoasimilados, lo que resulta en un menor crecimiento de los órganos más débiles como el tronco, aunque esto también repercute en el peso final de los frutos. Por lo tanto, la arquitectura vegetal, definida por estas tres variables, es esencial para maximizar el uso de los recursos disponibles, como la radiación solar, el agua y los nutrientes del suelo (Dieler et al., 2017). En árboles frutales la relación entre DBH y APC es especialmente importante, en particular en nogales como el pecán, donde se ha observado que el APC está directamente relacionado con el vigor general del árbol, un aspecto clave en sistemas agroforestales (Smith, 2008).

El DBH es un indicador del flujo de savia, que permite un transporte eficiente de agua y nutrientes hacia la copa (D'Amato et al., 2011). En este sentido, un mayor DBH tiene la capacidad de soportar un mayor volumen de copa, lo que permite una mayor superficie foliar expuesta a la luz, lo que puede afectar positivamente la tasa de fotosíntesis. Por ejemplo, en nogal europeo (*Juglans regia*) existe una correlación positiva entre el aumento del DBH y la producción de frutos, debido a una mayor capacidad de soporte y distribución de recursos entre ramas y hojas (Smith & Wood, 2006). En este sentido, la altura del árbol también tiene un papel importante en la interacción copa-tronco. Un árbol más alto permite que la copa acceda a una mayor cantidad de luz, especialmente en situaciones donde la competencia por este recurso es alta (Pretzsch et al., 2015). Sin embargo, este crecimiento vertical debe estar equilibrado con el diámetro del tronco, ya que un tronco subdimensionado en su diámetro puede limitar la capacidad del árbol para soportar una copa grande. En el pecán, la poda y el riego son prácticas clave para asegurar que el crecimiento en altura esté acompañado por un adecuado engrosamiento del tronco y expansión de la copa, lo que optimiza la producción de nueces.

Además, como el pecán es una especie caducifolia, tiene la capacidad de generar un aumento de carbono orgánico en el suelo (COS) a través de la caída de hojas, ya que estas se descomponen y se convierten en materia orgánica que enriquece el suelo, lo que mejora su capacidad de retención de agua y nutrientes (Arévalo et al., 2024; Mendoza et al., 2017). Este proceso es muy importante en los sistemas de producción sostenible, donde el retorno de biomasa al suelo favorece la captura de carbono y contribuye a mitigar el cambio climático (Lal et al., 2019). En nogal negro (*Juglans nigra*) se observó que la cantidad de hojas caídas está directamente relacionada con la extensión de la copa, lo que sugiere que un mayor volumen foliar contribuye significativamente al enriquecimiento del COS (Gauthier & Jacobs, 2019).

Finalmente, uno de los elementos esenciales para el desarrollo óptimo de la copa en árboles de pecán es la concentración de zinc en el suelo. El zinc es un micronutriente que juega un papel clave en la síntesis de auxinas, hormonas que regulan el crecimiento de los brotes y las hojas. Se ha demostrado que una deficiencia de zinc en el suelo reduce la extensión de la copa, lo que afecta la capacidad fotosintética del árbol y, por ende, su productividad (Gauthier & Jacobs, 2019). La aplicación de zinc, en el suelo o foliar, es una práctica común en la gestión de montes de pecán para asegurar un desarrollo saludable de la copa, que se traduce en árboles más vigorosos y productivos (Smith et al., 2022).

Bajo este contexto, el objetivo de este experimento fue validar si las relaciones funcionales de la arquitectura arbórea a nivel intraárbol y su interrelación con los recursos edáficos, comúnmente observadas en otras plantaciones frutales, también se observan en una plantación de pecán bajo las condiciones edafoclimáticas específicas del sitio de estudio.

2. Materiales y métodos

2.1 Sitio experimental y diseño de campo

El experimento se realizó en una plantación de pecán (*Carya illinoinensis*) ubicada en la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (INTA), Buenos Aires, Argentina (37.76º S, 58.29º O), desde abril del año 2021 hasta abril del año 2024. La plantación se estableció en agosto de 2013 mediante plantas obtenidas de un vivero comercial, y al momento de iniciar el experimento los árboles tenían 9 años. El lote estaba conformado por 15 cultivares de pecán, distribuidos en un marco de plantación de 9 m entre filas y 9 m entre árboles dentro de la fila, donde la unidad muestral fue cada árbol de manera individual, abarcando todos los cultivares establecidos (104 árboles en total). Para este sitio, la precipitación acumulada anual histórica es de 900 mm con un régimen isohigro y la temperatura media anual es de 14,4 °C (período 1982-2022). El suelo del sitio experimental está clasificado como Argiudol Típico (Soil Survey Staff, 2014). En este sentido, tanto los atributos iniciales del suelo como los aspectos del manejo (poda, riego, fertilización) se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Atributos del suelo y manejos en la plantación de pecán

Atributos iniciales del suelo	
COS	3,23 %
N total	0,25 %
P	0,02 %
Arcilla	35,1 %
pH	6,8
Manejos culturales durante el período 2021-2024	
Antecesores	Trigo-papa-soja
Densidad de plantación	123 árboles ha^{-1}
Riego complementario anual (2022 y 2023)	238 y 637 mm $árbol^{-1}$
Sistema de conducción	Vaso retardado
Poda anual	Selectiva, en ramas >1 pulgada de diámetro
Aplicaciones totales de ácidos húmicos y fúlvicos	10
Aplicaciones anuales de oxicloruro de cobre	Entre 1 y 2

Durante la implantación del sitio experimental en 2013 (plantación de pecanes + tapiz vegetal), se sembró una pastura consociada compuesta por trébol blanco (*Trifolium repens)* y festuca alta (*Festuca arundinacea*), que en la actualidad difiere en su composición botánica original, a pesar de que en agosto de 2024 se sembró festuca alta al voleo. A su vez, se aplicaron ácidos fúlvicos y húmicos (Hampi®) en una concentración del 2 % junto al riego complementario en 10 momentos diferentes, entre 2021 y 2023. Estas aplicaciones se realizaron a partir de septiembre de cada año, con el objetivo de lograr entre 3 y 4 aplicaciones por ciclo productivo. Además, durante diciembre de 2021 y noviembre de 2022 se aplicó al suelo, alrededor de cada árbol, una enmienda con una composición 6-15-3 (NPK) (Guanito®, Italpollina), con una dosis de 400 g $árbol^{-1}$. El riego complementario fue provisto desde septiembre de 2021 hasta marzo de 2022, y desde septiembre de 2022 hasta marzo de 2023, totalizando láminas de agua de 238 y 637 mm para cada estación de crecimiento (septiembre a abril), respectivamente. Para regar, se utilizó un sistema de surcos por pendiente. Asimismo, durante

el ciclo productivo 2023/2024, el agua fue provista en su totalidad por las precipitaciones, sin riego complementario. El riego se aplicó durante 22 y 27 días 1 vez cada 5 días a partir del 7 de diciembre en la temporada 2021/22 y 1 vez cada 6 días a partir de febrero en la temporada 2022/23. En términos acumulados, el riego representó 26 y 45 % de la lámina de agua acumulada para el período abril-marzo de las temporadas 2021/22 y 2022/23. Teniendo en cuenta solo las precipitaciones, la temporada más húmeda fue la de 2023/24, con 1049 mm acumulados desde abril hasta marzo.

2.2 Mediciones de diámetro del tronco (DBH) y área de proyección de la copa (APC)

Para el cálculo de DBH, se utilizó la fórmula 1:

$$DBH = p / 3{,}1416 \qquad (1)$$

En donde el perímetro del tronco (p, medido en cm) se lo obtuvo a los 1,30 m de altura desde el suelo o hasta la primera ramificación mediante el uso de una cinta métrica.

Para estimar el APC, primero se obtuvieron imágenes aéreas de la parcela experimental con un vehículo autónomo no tripulado (VANT) modelo Mavic Mini (SZ DJI Technology Co. Ltd., Shenzhen, China), en días sin nubosidad, durante el mes de abril de 2022, 2023 y 2024. El VANT tuvo adosado un sensor de imágenes RGB (1/2.3" CMOS DJI Technology Co. Ltd., Shenzhen, China; 12 Megapixel) montado en un cardán estabilizado por 3 ejes. El vuelo fue controlado por un autopiloto con una ruta previamente establecida (Drone Harmony, Zürich, Suiza). Durante el vuelo, se colectaron 122 imágenes, que se solaparon en un 83 % para generar una imagen ortomosaico del área de estudio (Figura 1B). Se utilizó el software Agisoft PhotoScan Professional Edition (Agisoft LLC, St. Petersburg, Rusia) para realizar esta tarea y para la delimitación de polígonos en las copas (Figura 1C), con el posterior cálculo de las áreas de copa, luego de tomar puntos de referencia en el campo. Estos puntos de referencia son objetos de dimensiones conocidas, geoposicionados en la ortofoto, siendo referencia para la determinación en metros del largo de los segmentos de los polígonos. Cabe destacar que el software calcula automáticamente el área de los polígonos, pero necesita calibrarse con el o los puntos de referencia de dimensiones conocidas.

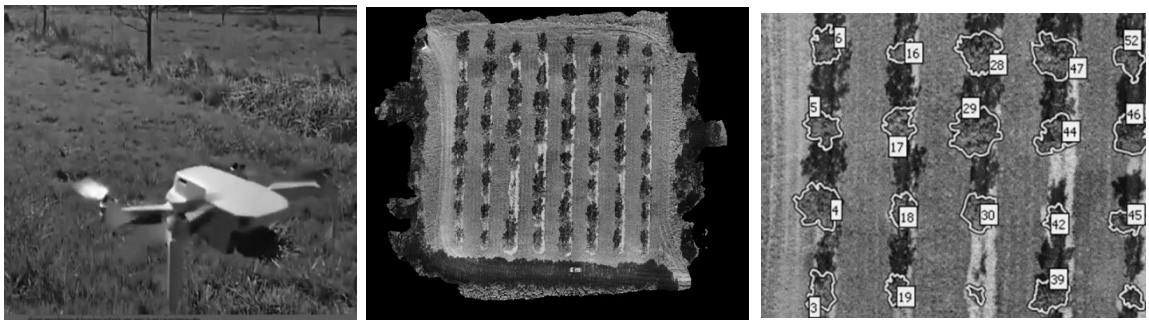


Figura 1. A) VANT, B) Imagen ortomosaico del monte y C) Delimitación del área de las copas

Ambas determinaciones fueron realizadas en 2022, 2023 y 2024.

2.3 Determinaciones del suelo

De los elementos del suelo mencionados, el COS se determinó en los tres años del experimento, mientras que los otros elementos (amonio ($N\text{-}NH_4^+$), nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) y zinc (Zn)) se determinaron para los ciclos 2022 y 2023. Anualmente, durante el mes de mayo, se realizaron muestreos de suelo alrededor de ocho árboles de pecán

del lote experimental. Para tal fin, se utilizó un barreno de suelo y se tomaron 4 submuestras de suelo aleatorias a 0-20 cm de profundidad dentro de un radio de 1 m de cada árbol. Estas 4 submuestras se mezclaron completamente en un balde para obtener 1 muestra por unidad experimental. Las muestras recolectadas se almacenaron en un freezer a -18 °C durante 5 días y luego se enviaron refrigeradas en heladera portátil a un laboratorio externo (LABSPA, CONICET, Bahía Blanca, Argentina) para determinar las concentraciones de carbono orgánico del suelo (COS) (Nelson & Sommers, 1996), amonio ($N\text{-}NH_4^+$), nitrato ($N\text{-}NO_3^-$) (Bremner, 1965) y zinc (Zn) (Brown et al., 1971). Para determinar COS, se utilizó el método de combustión seca (Dumas) (Nelson & Sommers, 1996), empleando un analizador de carbono elemental marca LECO Modelo C-832 (2024) equipo Truspec CN (LECO), por diferencia entre carbono total y carbono inorgánico. El análisis de muestras por combustión seca se llevó a cabo de acuerdo con los parámetros recomendados por el fabricante del equipo (LECO Corporation, 2005), empleando oxígeno aeronáutico y helio de grado 5.0. Previo al análisis de muestras incógnitas, el equipo fue calibrado empleando un suelo de referencia certificado (LECO). De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, una regresión lineal fue utilizada para el ajuste de la curva de calibración. El CT se determinó sobre muestras de suelo seco y tamizado, mientras que las muestras con presencia de Carbono Inorgánico fueron tratadas con HCl al 10 % con el objetivo de eliminar carbonatos tanto de calcio o sodio. Luego fueron lavadas con agua destilada para su posterior medición en el analizador. Asimismo, el laboratorio utilizó un protocolo basado en los métodos de Bremner (Bremner, 1965) para cuantificar la concentración de $N\text{-}NH_4^+$ y $N\text{-}NO_3$ en extractos mediante destilación por vapor, incluyendo un destilador de vapor K-350 (BÜCHI Labortechnik AG) en el proceso. Por otra parte, para la determinación de Zn, se realizó una extracción con DTPA (Brown et al., 1971), que luego se utilizó para medir en un Espectrómetro de Emisión por Plasma modelo SHIMATZU ICPE-9000.

2.4 Variables meteorológicas

Se obtuvieron datos de temperatura media diaria, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y radiación solar acumulada mediante una estación meteorológica automática Nimbus, ubicada en la EEA Balcarce del INTA, a 500 m de la parcela experimental, que genera un reporte horario y es almacenado en el sitio web de Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (n.d.). Se analizaron estos datos durante el período septiembre-mayo para todos los años del experimento.

2.5 Análisis de datos

Los datos de APC, DBH y H se analizaron utilizando correlación de Pearson al 5 %, a través del software R-Studio (versión de 2024). Se calculó la pendiente de las relaciones APC vs. DBH, APC vs. H, APC vs. COS, Zn vs. APC, NO_3^- vs. DBH, y NH_4 vs. DBH, utilizando modelos lineales generalizados.

3. Resultados

3.1 Condiciones ambientales

En los años bajo los cuales se desarrollaron los ciclos de crecimiento existió variabilidad ambiental, principalmente con contrastes durante el período de latencia. Por ejemplo, comparativamente la temperatura media durante el período desde mayo hasta agosto de 2023 fue 4,4 y 12,1 % más alta que para el mismo período de 2021 y 2022, respectivamente (9,78 ± 3,25, 9,37 ± 2,97 y 8,72 ± 2,8 °C), siendo los días con menores temperaturas medias el 17 de junio de 2021 (3,1 °C), el 16 de junio de 2022 (2,5 °C) y el 7 de julio de 2023 (4.0 °C) (Figura 2A). Respecto a las heladas tardías, se registraron 2 eventos ocurridos en la misma fecha calendario: 8 de octubre de 2021 (-0,7 °C) y 8 de octubre de 2022 (-1,4 °C), (Figura 2A). Este hecho en algunos cultivares coincidió con el período de elongación de amentos.

Las precipitaciones acumuladas desde abril 2023 hasta agosto 2023 fueron de 378 mm, 1,4 y 2,8 veces mayores que las acumuladas durante el mismo período para 2021 (267 mm) y 2022 (137 mm). Esta tendencia cambió para el período de crecimiento anual de los pecanes (entre septiembre y abril), aunque la temporada 2023/24 siguió siendo las más húmeda con 671 mm, seguida por la temporada 2022/23 (636 mm), y en tercer lugar la temporada 2021/22 (504 mm). Respecto a los picos de lluvia, se observaron durante los días 31 de agosto y 9 de septiembre de 2021 (52 mm), 26 de abril y 2 de febrero de 2022 (64 y 60 mm, respectivamente), 12 de febrero y 22 de diciembre de 2023 (98 y 89 mm, respectivamente), y 9 de febrero de 2024 (39 mm) (Figura 2B).

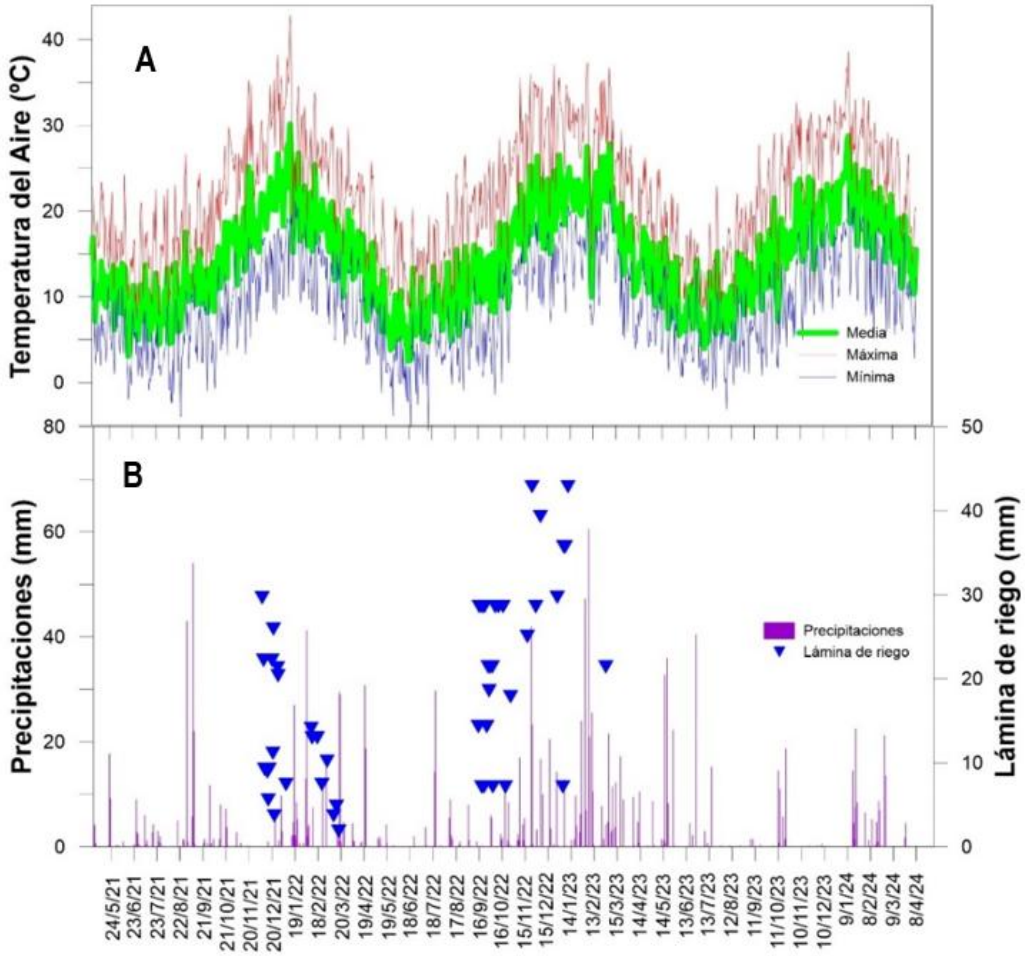


Figura 2. A) Evolución de temperaturas máxima, mínima y media durante tres ciclos productivos; B) Ocurrencia de precipitaciones y riegos

3.2 Diámetro del tronco a la altura del pecho (DBH), área de proyección de copa (APC) y altura (H)

El DBH incrementó todos los años desde 2021 (Figura 3), con tasas de aumento promedio anual de 15,8, 26,6 y 4,7 % (1,2 ± 0,12, 2,4 ± 0,13 y 0,5 ± 0,27 cm DBH año^{-1}), para las temporadas 2021/22, 2022/23 y 2023/24, respectivamente.

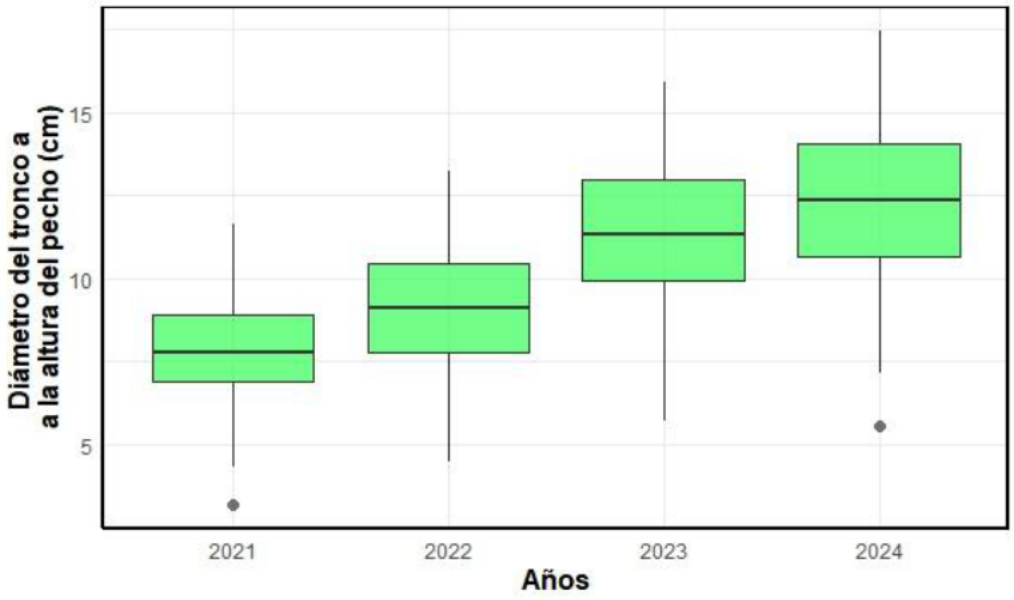


Figura 3. Diámetro del tronco a la altura del pecho (DBH) durante 4 años consecutivos

Las cajas indican primer, segundo y tercer cuartil. Las líneas indican diferencia entre valor mínimo y valor máximo. Los puntos indican valores outliers.

Respecto del APC, también registró incrementos medios anuales (Figura 4), y aunque el rango pasó de 21,7 m^2 en 2022 a 33,8 m^2 en 2024, la dispersión de los datos fue mayor en 2024 que en 2023 y en este último mayor que en 2022, con valores de 4,9, 6,2 y 7,2 m^2 para los años 2022, 2023 y 2024, respectivamente. La variación promedio de APC entre años fue del 33,3 y 15,3 % para los ciclos 2022/23 y 2023/24, respectivamente.

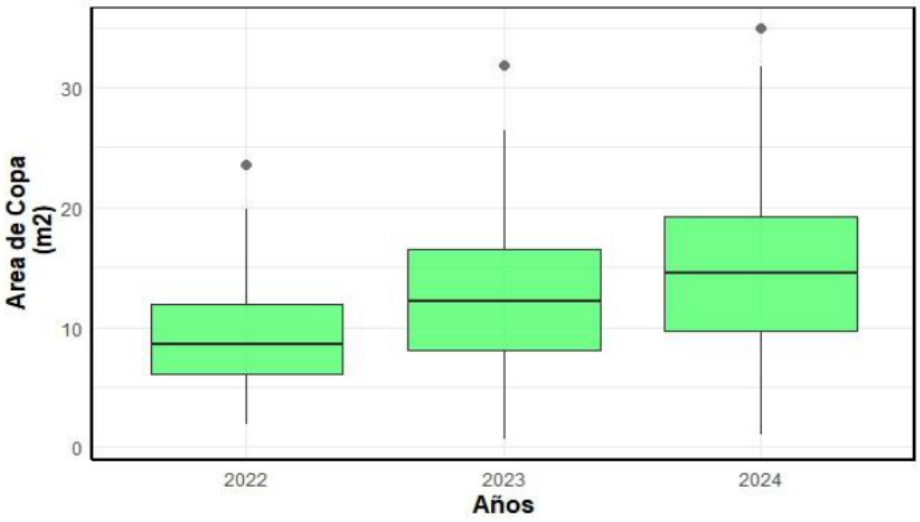


Figura 4. Área de copa (APC) según los años

Las cajas indican primer, segundo y tercer cuartil. Las líneas indican diferencia entre valor mínimo y valor máximo. Los puntos indican valores outliers.

El comportamiento de la altura (Figura 5) refleja el manejo tendiente a controlarla, dado que aumentó en promedio 13,3 % entre 2022 y 2023, pero con un incremento en la variabilidad entre plantas, con un rango de 4,4 m en 2022 vs. un rango de 6,4 m en 2023. Dicha variabilidad disminuyó con la poda de invierno del año 2023 y se vio reflejada durante la temporada 2024 con un rango menor (5,3 m) y un promedio 10 % menor que el de 2023.

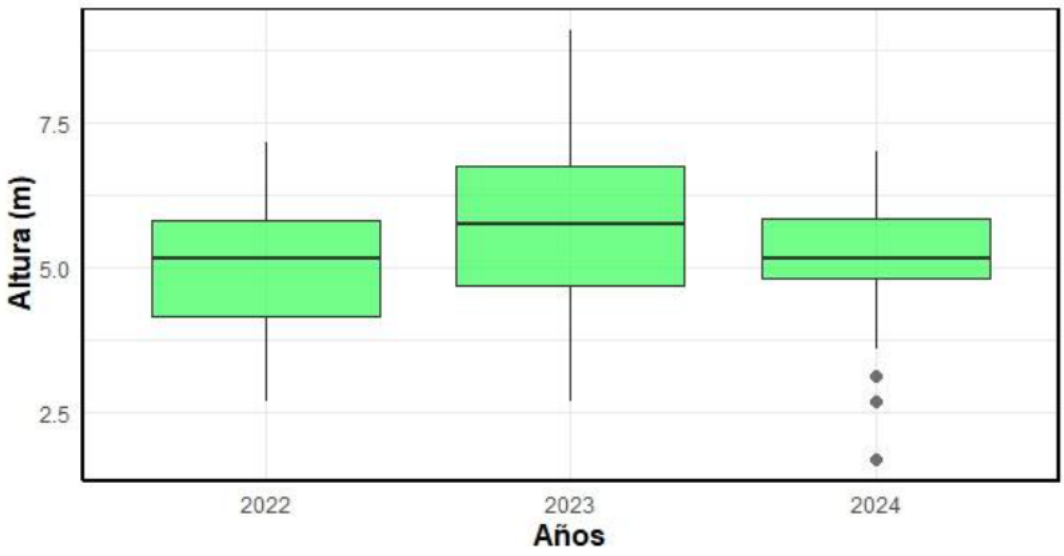


Figura 5. Altura según los años

Las cajas indican primer, segundo y tercer cuartil. Las líneas indican diferencia entre valor mínimo y valor máximo. Los puntos indican valores outliers.

3.3 Concentración de elementos del suelo

Mientras que la concentración de COS mostró un aumento consistente entre 2023 y 2024, el Zn no mostró cambios significativos (Figura 6). Distinta fue la situación del amonio y los nitratos del suelo, en los que se observó una alta variabilidad y patrones distintos de aumento entre 2022 y 2023, siendo la concentración de amonio más alta en 2023 que en 2022 y la concentración de nitratos a la inversa.

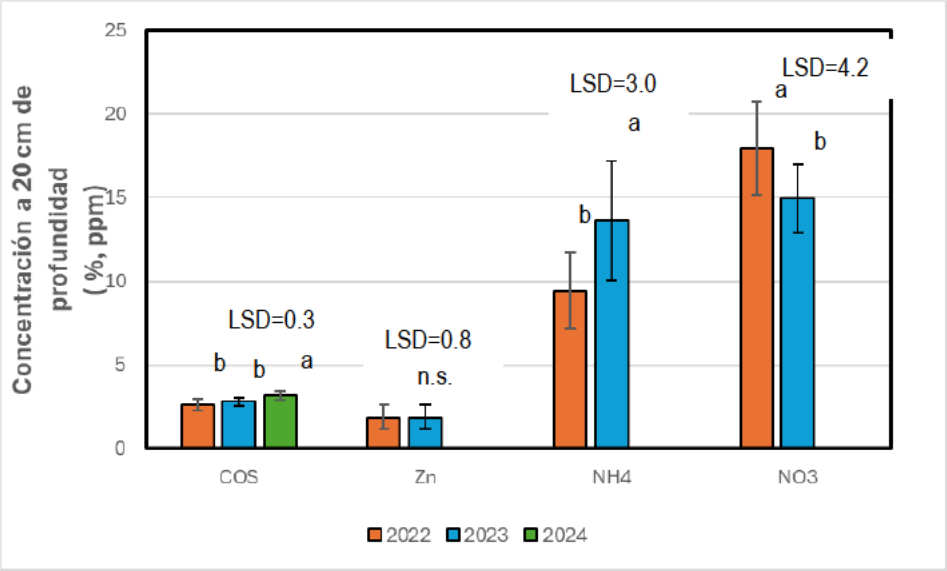


Figura 6. Concentración de COS (%) en los años 2022, 2023 y 2024, y concentración de Zn, NH_4^+ y NO_3^- (ppm) en el suelo durante los años 2022 y 2023

Los resultados están expresados en un valor promedio ± error estándar. LSD: mínima diferencia significativa al 5 %. Medias con letras distintas difieren entre sí.

3.4 Relaciones intraárbol

En general, todas las correlaciones mostraron un alto nivel de significancia (Tabla 2). En primer lugar, la correlación entre APC y DBH resultó ser significativa y robusta en todos los años, aunque la magnitud del coeficiente

de correlación (r) disminuyó para 2024. En segundo término, las correlaciones entre DBH y H fueron también significativas, aunque con coeficientes más bajos durante 2023 y 2024, comparados con 2022. Finalmente, la relación entre APC y H también fue positiva y significativa durante los tres años, aunque de menor magnitud en 2024.

Tabla 2. Correlaciones entre APC, DBH y H según año

Correlación	2022	2023	2024
APC vs. DBH	0,801***	0,773***	0,439***
DBH vs. H	0,617***	0,528***	0,576***
APC vs. H	0,637***	0,709***	0,573***

*** Indica p<0,001.

3.5 Relaciones entre los parámetros dendrométricos y los elementos del suelo

A pesar de que se encontraron correlaciones significativas entre COS, Zn y APC, las relaciones del APC o DBH con variables del suelo más cambiantes entre ciclos, como, por ejemplo, la concentración de nitratos o amonio durante la dormancia, no fueron significativas, con p-valores entre 0,23 y 0,73.

3.5.1 Área de copa vs. carbono orgánico del suelo

El COS estuvo significativamente ligado al APC (r=0,63, p=0,001), donde por cada incremento de metro cuadrado de copa el COS se incrementaba en 0,36 g C kg suelo $^{-1}$, a partir de una concentración inicial de 20,5 g C kg suelo^{-1}, con el modelo explicando el 39,3 % de la variación en los datos (Figura 7).

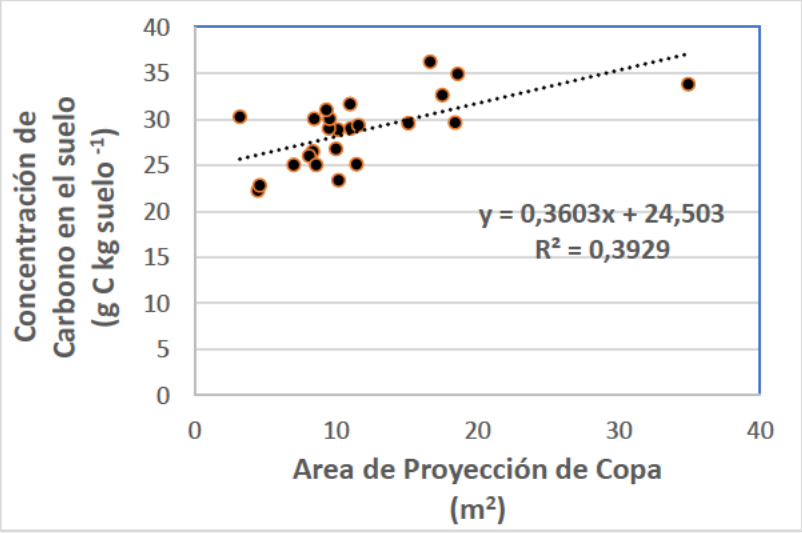


Figura 7. Relación ente el APC (m^2) y el COS (g Carbono kg de suelo^{-1})

Datos correspondientes a los años 2022, 2023 y 2024.

3.5.2 Área de proyección de copa vs. concentración de zinc

Con respecto a las correlaciones encontradas con la concentración de Zn en el suelo durante 2022 y 2023, hubo una relación significativa con el APC (r=0,54, p=0,03), aunque el modelo explicó el 29,5 % en la variación de los datos (Figura 8).

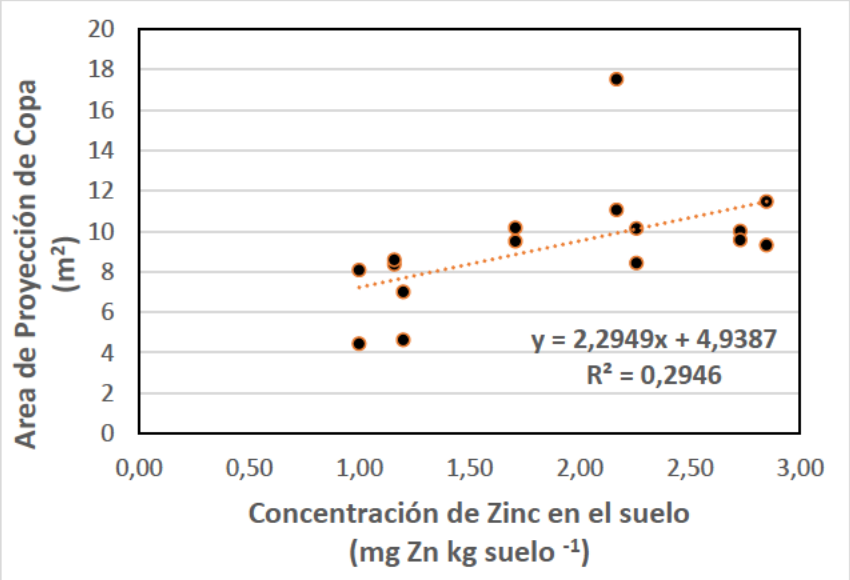


Figura 8. Relación ente la concentración de Zn (mg Zn kg suelo^{-1}) en el suelo y el APC (m^2)

4. Discusión

Los resultados de esta investigación son el primer registro de árboles jóvenes de pecán (*Carya illinoinensis*) que muestran una relación positiva entre el área de copa, el diámetro del tronco y la altura de los árboles. Estos resultados se mantuvieron durante los tres años de experimento. Asimismo, son coincidentes con experimentos previos en otras especies frutales y forestales que sugieren que el crecimiento de la copa y del tronco está interrelacionado, ya que ambos dependen de procesos fisiológicos compartidos, como la asimilación neta de carbono y la distribución de fotoasimilados (González et al., 2015; Smith et al., 2020). Por ello, hay que destacar que la magnitud de la correlación encontrada indica que si bien existe una relación significativa entre dichos parámetros, otros factores podrían influir en su variabilidad, como, por ejemplo, la disponibilidad de agua, la edad del árbol y la competencia intraespecífica (Martínez et al., 2018). En este sentido, durante los dos primeros años, se aplicó un riego complementario a las precipitaciones, a partir de la brotación (septiembre), alcanzando láminas totales de 778 y 1273 mm durante las temporadas 2021/22 y 2022/23, mientras que en el tercer año de experimento (2023/24) los árboles dependieron exclusivamente de las precipitaciones, cuya acumulación de agua durante el ciclo fue de 671 mm. Por lo cual, a pesar de no ser un tratamiento, la disponibilidad hídrica durante el período que duró el experimento pudo haber influido en la magnitud de estas correlaciones. Investigaciones previas han demostrado que la disponibilidad de agua afecta el crecimiento del árbol en general, impactando tanto en el desarrollo del tronco como el de la copa (Allen et al., 2016). En condiciones de menor disponibilidad hídrica, el crecimiento del tronco tiende a ser menor debido a la reducción de la presión de turgencia, la tasa de fotosíntesis y la redistribución de carbohidratos hacia estructuras de almacenamiento o supervivencia, como resultante de balances hídricos desfavorables (Pallardy, 2008; Wells, 2015). En este sentido, es posible que este factor haya sido el que ha determinado la variación de la relación entre el área de la copa y el diámetro del tronco en los diferentes años del experimento (principalmente durante 2023/24). A pesar de que el riego no fue un tratamiento dentro del experimento, se podría hipotetizar que, a raíz de los resultados encontrados en el experimento, el factor hídrico podría desempeñar un papel clave en el establecimiento de esta correlación. Adicionalmente hay que tener en consideración el efecto de eventos meteorológicos adversos, entre los que se cuenta la caída de granizo que ocurrió en diciembre de 2023 y afectó la parcela experimental. Por otra parte, el clima templado que caracteriza el sitio experimental pudo haber proporcionado condiciones favorables para el crecimiento de los árboles, en comparación con climas más extremos, donde el crecimiento está limitado por temperaturas extremas o por escasez hídrica severa (Wells, 2013). Por el contrario, en

plantaciones de pecán establecidas en regiones de clima más seco, la correlación entre estas variables podría ser diferente debido a las estrategias de adaptación de la especie a condiciones de estrés hídrico (Sparks, 2000).

Durante el tiempo que duró el experimento, el año 2024 se destacó por una estación invernal más cálida (Figura 2). Los inviernos más cálidos influyen negativamente sobre la acumulación de horas de frío necesarias para salir de la endodormición, lo que afecta la brotación (Mokari et al., 2021). Esto en pecán es aún más perjudicial debido a que la ocurrencia de temperaturas invernales más elevadas de lo normal puede reducir la sincronización fenológica entre las diferentes variedades que componen el lote productivo, pudiendo afectar de forma negativa la productividad de la siguiente temporada (Sparks, 2000).

Los resultados obtenidos en nuestro experimento, utilizando plantas jóvenes de pecán, con respecto a las relaciones intraplanta coincidieron con los resultados obtenidos por Smith (2008) en Oklahoma, a pesar de que en dicho trabajo fueron utilizados árboles nativos de pecán de 40 años de edad, establecidos en sitios que tenían altas temperaturas en verano y presencia de nieve en invierno. Esto revela que la plasticidad de la especie puede empezar a manifestarse en etapas tempranas de la plantación, indicando diferentes posibilidades de manejo de acuerdo con el cultivar, pero también con el micrositio en el que se ubica. Respecto de la relación de la arquitectura con parámetros edáficos, la correlación entre el área de la copa y la concentración de carbono en el suelo durante los años 2022, 2023 y 2024 fue significativa. Esto sugiere que los árboles con un mayor desarrollo de dosel tienen un mayor impacto en la dinámica de carbono del suelo circundante, probablemente a través de una mayor deposición de hojarasca y una mayor actividad radicular (Schoeneberger et al., 2012). Este resultado concuerda con trabajos previos en sistemas agroforestales en los que se observó que la biomasa aérea influye directamente en el secuestro de carbono en el suelo (Montagnini & Nair, 2004). En cultivos perennes como el pecán, la acumulación de materia orgánica en la rizosfera es un factor clave para la estabilidad de los suelos y la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento del árbol (Jose, 2009).

Además del carbono, se encontró una correlación positiva entre el área de copa y la concentración de zinc en el suelo durante los años 2022 y 2023, mientras que el diámetro del tronco y la altura del árbol no mostraron relaciones significativas con este elemento. El zinc es un micronutriente fundamental para la actividad enzimática y el crecimiento vegetal, y su disponibilidad en el suelo puede estar influenciada por la cantidad de materia orgánica y la actividad microbiana (Alloway, 2008). Investigaciones en frutales han demostrado que los árboles con copas más grandes tienden a desarrollar una mayor actividad rizosférica, lo que promueve la solubilización de micronutrientes como el zinc (Tahir et al., 2020). Por ejemplo, en almendro (*Prunus dulcis*), se reportó que la interacción entre la biomasa aérea y la microbiota del suelo afecta la absorción de micronutrientes (Fernández et al., 2018).

El hecho de que el diámetro del tronco y la altura no mostraran correlaciones significativas con el contenido de carbono y zinc en el suelo sugiere que estas variables de crecimiento pueden estar más influenciadas por factores hídricos o fisiológicos internos del árbol, o que las dinámicas de crecimiento son más conservadoras respecto a la concentración de esos elementos en el suelo. Estudios previos han demostrado que el crecimiento radial del tronco puede ser más dependiente de la dinámica del xilema y de la eficiencia en el transporte de agua que de la disponibilidad de ciertos nutrientes en el suelo (Zweifel et al., 2014). En cambio, la expansión de la copa parece ser un mejor indicador del impacto de los árboles en la calidad del suelo y el reciclaje de nutrientes en sistemas productivos a largo plazo (Jose et al., 2004).

5. Conclusiones

En conclusión, los resultados obtenidos no solo refuerzan la idea de una alta dependencia entre la arquitectura arbórea (área de copa) del pecán e indicadores de crecimiento como el diámetro del tronco y la altura, sino que también aportan información acerca de cómo la proyección de copa de los árboles de pecán está relacionada con la abundancia de recursos del suelo, como en este trabajo fueron el carbono y el zinc. Cabe destacar que el primero es un indicador de mejora en la calidad edáfica del cultivo y el segundo es un factor que indica la necesidad de fertilización para retroalimentar el crecimiento de la copa. Esto último podría tener implicaciones importantes en el diseño de estrategias de manejo para maximizar la sostenibilidad y productividad del cultivo. Por último, se debe mencionar que estas relaciones a nivel intraárbol y entre el árbol y los recursos del suelo estuvieron moduladas por factores de manejo, como el riego, y factores externos, como la fluctuación de la temperatura y precipitaciones.

Adicionalmente, la disponibilidad de agua y la temperatura invernal modulan estas relaciones intraárbol, que en la dinámica del suelo están principalmente asociadas con el desarrollo de la copa, más que con el diámetro del tronco o la altura. En este sentido, es necesario abordar con futuras investigaciones para evaluar cómo estas relaciones varían en diferentes condiciones edafoclimáticas y en diferentes edades de los árboles. Además, el análisis de otros factores, como el manejo hídrico, la densidad de plantación, el manejo de la copa y la fertilización, podría aportar información valiosa sobre los determinantes del crecimiento en esta especie.

Transparencia de los datos

Datos no disponibles: El set de datos que respalda los resultados de este trabajo no está disponible públicamente.

Declaración de contribución de los autores

	G Cambareri	VH Ziegler	E Awang	F Leite	F Fernández	E Frusso
Conceptualization	■					
Data curation	■		■	■		
Formal analysis	■					
Investigation			■	■		
Methodology	■					
Project administration						■
Resources						■
Supervision	■					
Visualization	■					
Writing – original draft	■	■				
Writing – review and editing					■	■

References

Allen, S. T., Edwards, B. L., Reba, M. L., & Keim, R. F. (2016). Sub-canopy evapotranspiration from floating vegetation and open water in a swamp forest. *Wetlands*, *36*, 681-688. https://doi.org/10.1007/s13157-016-0778-z

Alloway, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition*. International Fertilizer Industry Association.

Arévalo, E. S., Mendoza, C. A., Cambareri, G. S., Kock, D., Utrilla, P., & Ayala, N. (2024). *Captación de carbono y nutrición del bosque de pecán*. https://clusterdelpecan.org.ar/wp-content/uploads/FTP-41-Captura-de-Carbono-y-Nutricion-de-un-campo-de-pecan.pdf

Bremner, J. M. (1965). Organic forms of nitrogen. In A. G. Norman (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (pp. 1238-1255). American Society of Agronomy.

Brown, A. L., Quick, J., & Eddings, J. L. (1971). A comparison of analytical methods for soil zinc. *Soil Science Society of America Journal*, *35*, 105-107. https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500010031x

D'Amato, A. W., Bradford, J. B., Fraver, S., & Palik, B. J. (2011). Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *Forest Ecology and Management*, *262*, 803-816. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.014

Dieler, J., Uhl, E., Biber, P., Müller, J., Rötzer, T., & Pretzsch, H. (2017). Effect of forest stand management on species composition, structural diversity, and productivity in the temperate zone of Europe. *European Journal of Forest Research*, *136*, 739-766. https://doi.org/10.1007/s10342-017-1056-1

Fernández, V., Sotiropoulos, T., & Brown, P. (2018). *Foliar fertilization: Scientific principles and field practices*. International Fertilizer Association.

Gauthier, M. M., & Jacobs, D. F. (2019). Photosynthetic parameters of *Juglans nigra* trees are linked to cumulative water stress. *Canadian Journal of Forest Research*, *49*(7), 752-758. https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0355

González, R. M., López, J. A., & Torres, E. (2015). Relación entre la biomasa aérea y el crecimiento del tronco en especies forestales. *Revista de Ecología Forestal*, 10(1), 45-58.

Grossman, Y. L., & DeJong, T. M. (1994). PEACH: A simulation model of reproductive and vegetative growth in peach trees. *Tree Physiology*, *14*(4), 329-345. https://doi.org/10.1093/treephys/14.4.329

Hallé, F. (1978). Architectural variation at the specific level in tropical trees. In P. B. Tomlinson & M. H. Zimmermann (Eds.), *Tropical trees as living systems* (pp. 209-220). Cambridge University Press.

Hallé, F., & Oldeman, R. A. A. (1970). *Essay on the architecture and dynamics of growth of tropical trees*. Masson.

Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, *76*(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7

Jose, S., Gillespie, A. R., & Pallardy, S. G. (2004). Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems*, *61*, 237-255. https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029002.85273.9b

Lal, R., Kimble, J. M., & Follett, R. F. (2019). Land use and soil C pools in terrestrial ecosystems. In R. Lal, J. M. Kimble, & R. F. Follett (Eds.), *Management of carbon sequestration in soil* (pp. 1-10). CRC Press.

Lauri, P. E. (2007). Differentiation and growth traits associated with acrotony in the apple tree (*Malus* ×*domestica*, Rosaceae). *American Journal of Botany*, *94*(8), 1273-1281. https://doi.org/10.3732/ajb.94.8.1273

Martínez, C., Herrera, J., & Sánchez, P. (2018). Efecto de la competencia intraespecífica en el crecimiento de pecaneros en sistemas agroforestales. *Agroforestería y Producción Sostenible*, 22(3), 78-91.

Mendoza, C. A., Regner, P., Turrión, M. B., Pando, V., & Aceñolaza, P. G. (2017). Pérdida de peso durante la descomposición de hojas de Carya illinoinensis (Wangenh.) K. Koch en plantaciones de diferentes edades. *Quebracho (Santiago del Estero)*, *25*(2), 91-100.

Mokari, E., Samani, Z., Heerema, R., & Ward, F. (2021). Evaluation of long-term climate change impact on the growing season and water use of mature pecan in Lower Rio Grande Valley. *Agricultural Water Management*, *252*, Article 106893. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106893

Montagnini, F. & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, *61*(1), 281-295. https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (pp. 961-1010). Soil Science Society of America.

Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of woody plants* (3rd ed.). Academic Press.

Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., Seifert, T., du Toit, B., Farnden, C., & Pauleit, S. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening*, *14*(3), 466-479. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006

Schoeneberger, M. M., Bentrup, G., & Patel-Weynand, T. (2012). *Agroforestry: Enhancing resiliency in U.S. agricultural landscapes under changing conditions*. USDA Forest Service. https://doi.org/10.2737/WO-GTR-96

Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica. (n.d.). *Datos (actuales e históricos)*. INTA. https://siga.inta.gob.ar/#/data

Smith, C. A., VanLeeuwen, D., Heerema, R. J., Sherman, J. D., Comeau, M. J., & Walworth, J. L. (2022). Zinc variability in pecan orchards: Implications for leaf sampling and nutrient recommendations. *HortScience*, *57*(4), 550-557. https://doi.org/10.21273/HORTSCI16463-21

Smith, D. R., Jones, B. T., & Robinson, K. (2020). Carbon allocation patterns in pecan trees under different management regimes. *Tree Growth and Productivity Journal*, 15(4), 234-250.

Smith, M. W. (2008). Relationship of trunk size to selected canopy size parameters for native pecan trees. *HortScience*, *43*(3), 784-786. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.784

Smith, M. W., & Wood, B. W. (2006). Pecan tree biomass estimates. *HortScience*, *41*(5), 1286-1291. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1286

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy* (12th ed.). USDA.

Sparks, D. (2000). Pecan in warm climate. In A. Erez (Ed.), *Temperate fruit crops in warm climates* (pp. 381-403). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3215-4_14

Tahir, R., Adnan, M., Bilal, H. M., Saeed, M. S., Tampubolon, K., Rehman, F., & Prince (2020). Impact of foliar application of Zn on growth yield and quality production of citrus: A review. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*, *8*(6), 529-534. http://dx.doi.org/10.18782/2582-2845.8496

Wells, L. (2015). Irrigation water management for pecans in humid climates. *HortScience*, *50*(7), 1070-1074. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.7.1070

Wells, R. (2013). The impact of climate on pecan tree growth and nut production. *Horticultural Science Review*, 18(2), 112-125.

Zweifel, R., Drew, D. M., Schweingruber, F., & Downes, G. M. (2014). Xylem as the main origin of stem radius changes in Eucalyptus. *Functional Plant Biology*, *41*(5), 520-534. https://doi.org/10.1071/FP13240