

Architecture and morphometry of *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br., a forest species with ornamental importance in peri-urban areas

Arquitectura y morfometría de *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br., una especie forestal con importancia ornamental en áreas periurbanas

Francisco Montoya-Reyes^{1,2}; Juan I. Valdez-Hernández^{2*}; Héctor A. Trujillo-Martínez²; María T. García-Osorio³; Leonardo A. Beltrán-Rodríguez⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Chetumal. km 25 carretera Chetumal-Bacalar, Xul-Ha. C. P. 77900. Othón P. Blanco, Quintana Roo, México.

²Colegio de Postgraduados, Postgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

³Ahuehuate Consultores Ambientales. Emiliano Zapata núm. 14, San Luis Huexotla, C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

⁴Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, Jardín Botánico, Laboratorio de Etnobotánica Ecológica. Tercer Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria. C. P. 04510. Coyoacán, Ciudad de México, México.

*Corresponding author: ignacio@colpos.mx; tel.: +52 595 952 0200 ext. 1471.

Abstract

Introduction. *Grevillea robusta* is an ornamental forest species with a distinctive tree architecture, featuring branches that form an open and spacious canopy, making it an attractive option for urban and peri-urban reforestation.

Objective. To describe the architectural model of *G. robusta* and analyze its morphometry in five diameter categories.

Materials and methods. The study was carried out in peri-urban areas of Texcoco, Estado de México. Fourteen tree-measurement characteristics were evaluated for 31 individuals classified into five diameter categories to identify the architectural model. An ANOVA was used to detect significant differences among diameter categories, and a Student's *t*-test was applied to compare the defined architectural models. The relationship between diameter at breast height, total height, and canopy coverage was assessed using linear and non-linear regression.

Results and discussion. *G. robusta* conformed to the Stone model for smaller diameter categories (7.5 cm–12.49 cm, 12.5 cm–17.49 cm, 17.5 cm–22.49 cm) and to the Attims model for larger categories (17.5 cm–22.49 cm, 22.5 cm–27.49 cm and 27.5 cm–32.49 cm). Total height, crown height, third-order branch length, and leaf blade length and leaf base varied significantly ($p = 0.05$) among diameter categories. The Hossfeld IV model adequately described the relationship between diameter at breast height and total height, while linear regression proved suitable for diameter at breast height and crown coverage.

Conclusion. Diameter category influences the morphometric attributes and architecture of *G. robusta*. These results are relevant for the planning and use of this species in urban and peri-urban areas.

Keywords: tree measurement characteristics; diameter category; Attims model; Stone model; Australian oak.

Resumen

Introducción. *Grevillea robusta* es una especie forestal ornamental de arquitectura arbórea distintiva con ramas que crean un dosel abierto y espacioso, haciéndola atractiva para reforestación urbana y periurbana.

Objetivo. Describir el modelo arquitectónico de *G. robusta* y analizar su morfometría en cinco categorías diamétricas.

Materiales y métodos. El estudio se realizó en zonas periurbanas del municipio de Texcoco, Estado de México. Se evaluaron 14 atributos dasométricos de 31 individuos clasificados en cinco categorías diamétricas para identificar el modelo arquitectónico. Se aplicó un análisis de varianza para detectar diferencias significativas entre categorías diamétricas y una prueba *t* de Student para comparar los modelos arquitectónicos definidos. La relación entre diámetro normal, altura total y cobertura de copa se determinó mediante regresión lineal y no lineal.

Resultados y discusión. *G. robusta* se ajustó al modelo Stone para categorías diamétricas pequeñas (7.5 cm–12.49 cm, 12.5 cm–17.49 cm, 17.5 cm–22.49 cm) y al modelo Attims en las categorías mayores (17.5 cm–22.49 cm, 22.5 cm–27.49 cm y 27.5 cm–32.49 cm). Los atributos altura total, altura de copa, longitud de ramas de tercer orden y longitud de lámina y de base de la hoja variaron significativamente ($p = 0.05$) entre categorías diamétricas. El modelo Hossfeld IV describió adecuadamente la relación entre diámetro normal y altura total, mientras que la regresión lineal resultó adecuada para diámetro normal y cobertura de copa.

Conclusión. La categoría diamétrica modifica los atributos morfométricos y la arquitectura de *G. robusta*. Los resultados son relevantes para la planificación y utilización de la especie en espacios urbanos y periurbanos.

Palabras clave: atributos dasométricos; categoría diamétrica; modelo Attims; modelo Stone; roble australiano.

Introduction

The architecture and morphometry of plants play an essential role in their growth and adaptation to diverse environments (Perreta & Vegetti, 2005). Understanding these parameters in disturbed areas is essential for comprehending how plants interact with their surroundings and how they can contribute to social well-being through urban and peri-urban forest planning and management. In Mexico, such information is scarce and primarily focused on agroecosystems (Camacho Moreno et al., 2017), tropical forests (Beltrán-Rodríguez et al., 2017; Interián-Ku et al., 2009), and evergreen forests (Pineda-Herrera et al., 2011). However, to date, there are no records of studies on tree architecture in urban and peri-urban environments. In this context, the Australian oak (*Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br.) emerges as a widely utilized tree species in Mexico for reforestation in these environments (Mancilla Morales et al., 2024; Saavedra-Romero et al., 2019), owing to its rapid growth (Martiarena et al., 2013) and appearance of the species (Giambra et al., 2019).

The uniqueness and beauty of *G. robusta* make it a popular tree for landscaping in urban areas (Giambra et al., 2019; Ramos Palacios, 2019), a characteristic that has prompted research interest. For instance, Guigues Atoche (2019) analyzed tree measurement characteristics in *G. robusta* seedlings to assess the effect of different substrates to produce plants intended for urban reforestation in Lima, Peru. Similarly, Singh et al. (2020) evaluated the use of *G. robusta* for mitigating the impact of vehicular emissions along roadsides and medians in Uttarakhand, India, finding that the species has potential for urban greening with air quality benefits. Another study by MacGregor-Fors (2008) in urban areas of Guadalajara, Mexico, revealed that the Australian oak supports higher bird diversity than other tree species. However, despite the abundance of information on the species, there is no evidence of studies describing its architecture and morphometry. This represents a challenge for urban planners aiming to integrate the species effectively into these environments.

G. robusta was taxonomically described in 1830 by Allan Cunningham and Robert Brown, who classified it within the order Proteales, family Proteaceae, subfamily Grevilleoideae, and tribe Grevilleae (Brown, 1830). Its natural distribution is in western Australia, and it is generally a large tree (reaching heights of up to 45 m in natural forests), semi-deciduous, with pyramid-shaped crown, thick branches, and a pronounced tendency for bifurcation. Its stem is straight with abundant branching. The bark is light gray, thick, and deeply furrowed; internally, it is fibrous, bitter, and

Introducción

La arquitectura y morfometría de las plantas desempeñan un papel fundamental en su crecimiento y adaptación a diversos ambientes (Perreta & Vegetti, 2005). El conocimiento de dichos parámetros en áreas perturbadas es esencial para comprender cómo interactúan las plantas con su entorno y cómo pueden contribuir al bienestar social a través de una planificación y manejo forestal urbano y periurbano. En México, esta información es limitada y se centra en agrosistemas (Camacho Moreno et al., 2017), selvas bajas (Beltrán-Rodríguez et al., 2017; Interián-Ku et al., 2009) y selvas altas (Pineda-Herrera et al., 2011), pero hasta el momento no se cuenta con registros de estudios de arquitectura arbórea en entornos urbanos y periurbanos. En tal contexto, el roble australiano (*Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br.) emerge como una especie arbórea utilizada ampliamente en México en reforestaciones de dichos entornos (Mancilla Morales et al., 2024; Saavedra-Romero et al., 2019), gracias al crecimiento rápido (Martiarena et al., 2013) y estético de la especie (Giambra et al., 2019).

La singularidad y belleza de *G. robusta* lo convierten en un árbol popular para el paisajismo en zonas urbanas (Giambra et al., 2019; Ramos Palacios, 2019), situación que lo ha llevado a ser objeto de investigaciones. Por ejemplo, Guigues Atoche (2019) analizó atributos dasométricos en plántulas de *G. robusta* para determinar el efecto producido por varios sustratos con miras al abastecimiento de planta para reforestaciones en áreas urbanas en Lima, Perú. Por otro lado, Singh et al. (2020) evaluaron el uso de *G. robusta* para la mitigación del impacto de emisiones vehiculares en bordes de carreteras y camellones en la ciudad de Uttarakhand, India, y encontraron que la especie tiene potencial para el reverdecimiento urbano con beneficios en la calidad del aire. En otro estudio realizado por MacGregor-Fors (2008) en áreas urbanas de Guadalajara, México, se encontró que el roble australiano conserva mayor diversidad de aves que otros árboles; sin embargo, aun cuando existe información abundante sobre el tema, no hay evidencia de estudios que describan la arquitectura y morfometría de la especie. Esto representa un desafío para los planificadores urbanos que buscan integrarla adecuadamente en estos entornos.

G. robusta fue descrita taxonómicamente en 1830 por Allan Cunningham y Robert Brown, quienes la clasificaron en el orden Proteales, familia Proteaceae, subfamilia Grevilleoideae, tribu Grevilleae (Brown, 1830). Su distribución natural se encuentra en el oeste de Australia y, generalmente, es un árbol de tamaño grande (alcanza alturas de hasta 45 m en bosques naturales), semicaducifolio, de copa piramidal con ramas gruesas y marcada tendencia a la bifurcación, su

whitish (Chudnoff, 1984). The tree develops a deep root system, leaves are partially bipinnate, alternate, with divided leaflets and lighter and silkier on the underside; the upper side is smooth dark green, and the underside is ashy and silky (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2020). Australian oak is commonly used as an ornamental plant for landscaping and roadside plantings or as a shade tree (El-Khateeb et al., 2023), as well as in coffee plantations to provide shade (Schuster et al., 2023); in some countries, it has been used as a forest species due to its rapid growth and potential as a timber tree (Begazo Curie & Jave Nakayo, 2018).

In this study, *G. robusta*, belonging to the group of heliophyte plants (Begazo Curie & Jave Nakayo, 2018), was considered because of its importance as a species commonly used in urban and peri-urban reforestation in Mexico (Alanís-Rodríguez et al., 2022; Velasco Bautista et al., 2013). The objective of this study was to describe the architecture and analyze the morphometry of *G. robusta* in five diameter categories under the following hypotheses: a) the architectural model is the same among diameter categories and b) tree biomass correlates positively with diameter at breast height, maintaining constant tree measurement characteristics despite variations in their increase.

Materials and Methods

The study was conducted at the Universidad Autónoma Chapingo and Colegio de Postgraduados Campus Montecillo in the municipality of Texcoco, Estado de México, Mexico, between the coordinates 19° 29' 43.68" - 19° 27' 16.01" N and 98° 53' 2.98" - 98° 53' 25.63" W, at an elevation of 2 250 m, average annual temperature of 17.2°C and total annual precipitation of 598.6 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2023). Field surveys identified two areas with the presence of *G. robusta* (Figure 1), where only 31 trees were recorded due to the limited number of individuals in the study area. These trees exhibited various morphological characteristics and were free from pests and diseases. The 31 trees were categorized into five diameter classes (DC) with a 5 cm range (Pineda-Herrera et al., 2019): DC 10 = 7.5–12.49 cm (three trees), DC 15 = 12.5–17.49 cm (five trees), DC 20 = 17.5–22.49 cm (14 trees), DC 25 = 22.5–27.49 cm (six trees), and DC 30 = 27.5–32.49 cm (three trees). These trees were planted in a peri-urban environment and grow in green areas (road medians and gardens) with an Antrosol soil type, which originates from modifications due to human urbanization activity (Castellanos Vargas et al., 2017). Most of the individuals grow in open fields, with no significant interference from light or wind. Although the planting distances vary, the smallest recorded distance between individuals is 3 m. There is some overlap in the crowns, suggesting moderate but not

fuste es recto con mucho ramaje. La corteza es gris claro y gruesa con muchos surcos profundos, interiormente es fibrosa, amarga y blanquecina (Chudnoff, 1984). El árbol desarrolla un sistema radical profundo, las hojas son parcialmente bipinnadas, alternas, con foliolos divididos y más claros y sedosos en el envés; el haz es liso de color verde oscuro y el envés es cenizo y sedoso (Rojas-Rodríguez & Torres-Córdoba, 2020). El roble australiano se utiliza comúnmente como planta ornamental para paisajismo y plantaciones al borde de carreteras o como árbol de sombra (El-Khateeb et al., 2023), así como en plantaciones de café para proporcionar sombra (Schuster et al., 2023); en algunos países, se ha utilizado como especie forestal debido a su crecimiento rápido y potencialidad como árbol maderable (Begazo Curie & Jave Nakayo, 2018).

En este estudio se consideró a *G. robusta*, perteneciente al grupo de las plantas heliófitas (Begazo Curie & Jave Nakayo, 2018), por su importancia como especie utilizada comúnmente en reforestaciones urbanas y periurbanas en México (Alanís-Rodríguez et al., 2022; Velasco Bautista et al., 2013). El objetivo del presente trabajo fue describir la arquitectura y analizar la morfometría de *G. robusta* en cinco categorías diamétricas bajo las siguientes hipótesis: a) el modelo arquitectónico es igual entre las categorías diamétricas y b) la biomasa de los árboles correlaciona positivamente con el diámetro normal, manteniendo constantes los atributos dasométricos ante variaciones en su incremento.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el área de influencia de la Universidad Autónoma Chapingo y el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo en el municipio de Texcoco, Estado de México, México, entre las coordenadas geográficas 19° 29' 43.68" - 19° 27' 16.01" LN y 98° 53' 2.98" - 98° 53' 25.63" LO a una elevación de 2250 m, con temperatura media anual 17.2 °C y precipitación total anual de 598.6 (Servicio Meteorológico Nacional, 2023). Mediante recorridos de campo se identificaron dos áreas con presencia de *G. robusta* (Figura 1) en las cuales se registraron solo 31 árboles debido a la disponibilidad limitada de individuos en el área de estudio. Estos presentaban diferentes características morfológicas y se encontraban libres de plagas y enfermedades. Los 31 individuos se distribuyeron en cinco categorías diamétricas (CD) de 5 cm de amplitud (Pineda-Herrera et al., 2019): CD 10 = 7.5-12.49 cm (tres), CD 15 = 12.5-17.49 cm (cinco), CD 20 = 17.5-22.49 cm (14), CD 25 = 22.5-27.49 cm (seis) y CD 30 = 27.5-32.49 (tres). Estos árboles fueron plantados en un entorno periurbano y crecen en áreas verdes (camellones y jardines) con un tipo de suelo Antrosol, mismo que tiene su origen en modificaciones derivadas



Figure 1. The data collection area was located in Texcoco, Mexico, with two specific sites: a) Universidad Autónoma Chapingo, where individuals 1 to 29 of *Grevillea robusta* were recorded, and b) Colegio de Postgraduados Montecillo Campus, where individuals 30 and 31 of *G. robusta* were documented.

Figura 1. Localización del área de levantamiento de datos en Texcoco, México. a) Universidad Autónoma Chapingo, individuos del 1 al 29 de *Grevillea robusta*, b) Colegio de Postgraduados campus Montecillo, individuos 30 y 31 de *G. robusta*.

predominant intraspecific competition. Conditions favor growth without physical obstacles.

Table 1 shows the variables commonly used to describe tree morphology to determine the architecture that best describes *G. robusta*. To complement this information, photographs were taken of the individuals that best represent the identified models; additionally, the species and its structures (branches, leaves, flowers, and fruits) were schematized. The morphological terminology described in Table 1 has been classically established by experts in the field, such as Tomlinson (1983) and Hallé et al. (1978), and supported by more recent research, including that of Chomicki et al. (2017) and Interián-Ku et al. (2009).

The variables were measured based on the studies of Interián-Ku et al. (2009) and Camacho Moreno et al. (2017): diameter at breast height (DBH) at 1.30 m, total height (TH), crown height, first branch height, first, second, and third order branches length, stem internodes length, crown cover, first, second and third order branch insertion angle, leaf blade length, and leaf base length (petiole); for the last two variables, five samples per individual were taken. The data were subjected to normality and homogeneity tests;

de la actividad humana de urbanización (Castellanos Vargas et al., 2017). La mayoría de los individuos crece a cielo abierto, sin interferencias significativas de luz o viento. Aunque la distancia de plantación es variable, la distancia más pequeña registrada entre individuos es de 3 m. Existen traslapes en algunas copas que sugieren competencia intraespecífica moderada, pero no predominante. En general, las condiciones favorecen el crecimiento sin obstáculos físicos.

El Cuadro 1 muestra las variables comúnmente empleadas para describir la morfología arbórea con el fin de determinar la arquitectura que mejor describa a *G. robusta*. Para complementar esta información se tomaron fotografías de los individuos que mejor representan a los modelos identificados; además, la especie y sus estructuras (ramas, hojas, flores y frutos) se esquematizaron. La terminología morfológica descrita en el Cuadro 1 ha sido establecida de manera clásica por expertos en la materia, como Tomlinson (1983) y Hallé et al. (1978), y respaldada por investigaciones más recientes como las de Chomicki et al. (2017) e Interián-Ku et al. (2009).

Las variables se midieron con base en los estudios de Interián-Ku et al. (2009) y Camacho Moreno et al.

Table 1. Morphological variables used to determine the architectural model of *Grevillea robusta*.**Cuadro 1. Variables morfológicas utilizadas para la determinación del modelo arquitectónico de *Grevillea robusta*.**

Variable	Categories / Categorías
Growth main stem / Crecimiento del eje principal	Pattern: monopodial or sympodial / Patrón: monopódico o simpódico Shape: determinate or indeterminate / Forma: determinada o indeterminada Activity: proleptic or sylleptic / Actividad: proléptico o siléptico
Branching / Ramificación	Pattern: monocasial, dicacial, polycasial / Patrón: monocasio, dicasio, policasio
Orientation and symmetry / Orientación y simetría	Orthotropic, plagiotropic, combined / Ortotrópico, plagiotrópico, combinado
Order / Ordenamiento	First order, second order, third order main stem, etc. / Eje principal de primer orden, segundo orden, tercer orden, etc.
Branch insertion angle / Ángulo de inserción de ramas	Ascending (16° to 45°), diffuse (46° to 75°) / Ascendente (16° a 45°), difuso (46° a 75°)
Branch length / Longitud de ramas	Long, short / Largas, cortas
Internode length / Longitud de entrenudos	Long (macroblasts), short (brachyblasts) / Largos (macroblastos), cortos (braquiblastos)
Reproductive structures / Estructuras reproductivas	Axillary or apical position / Posición: axilar o apical Inflorescence type: complex monopodial (panicles) or sympodial cymoid / Tipo de inflorescencia: monopodiales complejas (panículas) o simpodiales cimoides
Reiterations / Reiteraciones	Total or partial, adaptive or traumatic, proleptic or sylleptic / Total o parcial, adaptativa o traumática, proléptica o siléptica

for those variables that were not in compliance with these assumptions, a logarithmic transformation was applied. An analysis of variance for unbalanced samples (ANOVA; Zavaleta et al., 2023) was performed to mitigate the negative impact of the disproportion in sample sizes by diameter class, thereby providing results that more accurately reflect the true differences between the studied variables. Post hoc multiple comparison tests using the Tukey-Kramer method were also conducted, with a 95 % confidence level (García-Osorio et al., 2020). These tests aimed to identify significant differences between diameter classes for all measured variables. To evaluate differences between architectural models, a Student's t-test was applied with a 95 % confidence level (Beltrán-Rodríguez et al., 2022). All statistical analyses were performed using R software version 3.2.5. (R Core Team, 2023).

In urban and peri-urban areas, it is essential to understand the maximum height and cover that trees can reach under specific conditions. In this study, to model dominant height growth, the total height of each individual was considered according to diameter at breast height. Table 2 indicates the three growth models with nonlinear structure that were applied to fit the tree height data: Schumacher (Schumacher, 1939; Guzmán-Santiago et al., 2023), Chapman-Richards (Richards, 1959; García-Cuevas et al., 2024) and Hossfeld IV (Hossfeld, 1822; García-Espinoza et al., 2023).

(2017); diámetro normal a 1.30 m de altura, altura total (AT), altura de copa, altura de la primera rama, longitud de ramas de primer, segundo y tercer orden, longitud de entrenudos del fuste, cobertura de copa, ángulo de inserción de ramas de primer, segundo y tercer orden, longitud de lámina de la hoja y longitud de la base de la hoja (pecíolo); para estas dos últimas variables se tomaron cinco muestras por individuo. Los datos obtenidos se sometieron a pruebas de normalidad y homogeneidad; en aquellas variables que no cumplían con estos supuestos se hizo una transformación logarítmica. Los datos se sometieron a un análisis de varianza para muestras desbalanceadas (ANOVA; Zavaleta et al., 2023) con el fin de mitigar el impacto negativo de la desproporción en las muestras por categoría diamétrica y así obtener resultados que reflejen con mayor precisión las diferencias reales entre las variables estudiadas. También se realizaron pruebas *post hoc* de comparaciones múltiples mediante el método de Tukey-Kramer, con un nivel de confiabilidad del 95 % (García-Osorio et al., 2020). Estas pruebas se realizaron con el fin de identificar diferencias significativas entre las categorías diamétricas para todas las variables medidas. Para evaluar diferencias entre modelos arquitectónicos se aplicó la prueba t de Student con un nivel de confiabilidad del 95 % (Beltrán-Rodríguez et al., 2022). Todos los análisis estadísticos se llevaron a cabo en el *software* R versión 3.2.5 (R Core Team, 2023).

Table 2. Nonlinear equations fitted to estimate dominant height of *Grevillea robusta* trees in peri-urban areas of Texcoco.
Cuadro 2. Ecuaciones no lineales ajustadas para calcular la altura dominante en árboles de *Grevillea robusta* en zonas periurbanas de Texcoco.

Equation / Ecuación	Model / Nombre
$HDom: \beta_0 \exp \left[-\beta_1 \left(\frac{1}{DBH} \right) \right]$	Schumacher
$HDom: \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 DBH)^{\beta_2}]$	Chapman-Richards
$HDom: \frac{\beta_0}{1 + \exp(\beta_1) \exp(-\beta_2 \ln DBH)}$	Hossfeld IV

HDom = dominant height, DBH = diameter at breast height (cm) at 1.3 m height, exp = exponential function, ln = natural logarithm and β_0 , β_1 , β_2 = model fitting parameters.
HDom = altura dominante, DN = diámetro normal (cm) a 1.3 m de altura, exp = función exponencial, ln = logaritmo natural y β_0 , β_1 , β_2 = parámetros de ajuste del modelo.

To determine the dominant crown coverage (CCdom), crown coverage was analyzed in relation to diameter at breast height, following the methodology adopted by Báez-Hernández et al. (2016) and Hernández-Ramos et al. (2022a, 2022b). Crown coverage was estimated using the approach proposed by Zavaleta et al. (2023), which involves perpendicular measurements of the crown’s major and minor diameters. The estimation of dominant crown coverage was achieved by modeling the data through a simple linear regression (Bautista Cruz et al., 2022): $CCDom = \beta_0 + \beta_1 DN$; where, DBH represents diameter at breast height and β_0 and β_1 are the model fitting parameters.

Results

The smaller diameter categories (10 and 15) are characterized by stems exhibiting a sympodial growth pattern, with minimal differentiation between the main stem and first-order branches. Their growth form is indeterminate, with proleptic activity. Branching follows a polytomic pattern with orthotropic growth orientation. First- and second-order branches are abundant, while third-order branches are scarce, with ascending insertion angles. Branches and internodes show extended growth between segments, with preferential allocation toward the apex (acrotony). Reproductive structures are absent, and reiterations are partial. These characteristics align with the Stone model (Figure 2).

The largest diameter categories (20, 25 and 30) are characterized by a differentiated stem and branches with a monopoidal stem growth pattern, determinate shape and proleptic activity. The branching pattern is polycassic with a combined growth tendency. First, second and third order branches are abundant, including higher order branches; the angle of insertion is diffuse in the first and second order branches and ascending in higher order branches. Branching is lateral (axial) and the architecture is monopoidal with immediate branch growth since the apical and axillary meristems branch at the same time. Branches

En áreas urbanas y periurbanas es esencial comprender la altura y la cobertura máxima que los árboles pueden alcanzar bajo condiciones específicas. En este estudio, para modelar el crecimiento de la altura dominante, se consideró la altura total de cada individuo en función del diámetro normal. El Cuadro 2 indica los tres modelos de crecimiento con estructura no lineal que se aplicaron para ajustar los datos de altura de los árboles: Schumacher (Schumacher, 1939; Guzmán-Santiago et al., 2023), Chapman-Richards (Richards, 1959; García-Cuevas et al., 2024) y Hossfeld IV (Hossfeld, 1822; García-Espinoza et al., 2023).

Para determinar la cobertura de copa dominante (CCDom) se contrastó la cobertura de copa en relación con el diámetro normal, siguiendo el enfoque adoptado en los estudios de Báez-Hernández et al. (2016) y Hernández-Ramos et al. (2022a, 2022b). La cobertura se estimó utilizando la propuesta de Zavaleta et al. (2023) que consiste en mediciones perpendiculares del diámetro mayor y menor de la copa. La determinación de la cobertura de copa dominante se logró mediante la modelación de los datos a través de una regresión lineal simple (Bautista Cruz et al., 2022): $CCDom = \beta_0 + \beta_1 DN$; donde, DN es el diámetro normal y β_0 y β_1 son los parámetros de ajuste del modelo.

Resultados

Las categorías diamétricas de menor tamaño (10 y 15) se caracterizan por tener un tronco con patrón de crecimiento simpoidal, así como poca diferenciación entre el tronco principal y las ramas de primer orden; su forma de crecimiento es indeterminada con actividad proléptica. La ramificación presenta un patrón policasio con orientación de crecimiento ortotrópica; las ramas de primer y segundo orden son abundantes y las de tercer orden escasas, con ángulos de inserción ascendente. Las ramas y entrenudos tienen un crecimiento largo entre segmentos y reparto preferencial hacia el ápice (acrotonía), no presenta estructuras reproductivas y las reiteraciones son de tipo parcial. Estas características se ajustan al modelo Stone (Figura 2).

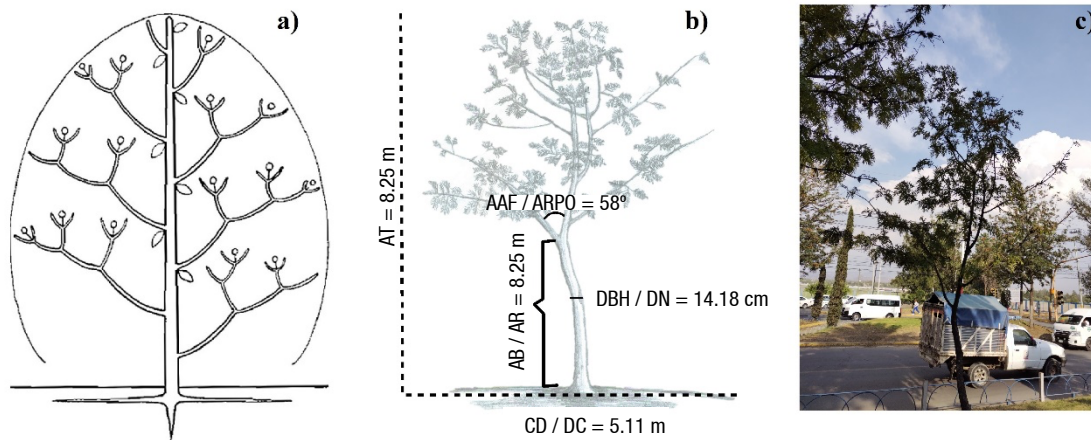


Figure 2. Architectural model of *Grevillea robusta* for diameter categories 10 and 15. a) Architectural structure idealized from the Stone model (Chomicki et al., 2017; Hallé et al., 1978). b) Schematic representation of *G. robusta* architecture for the Stone model; where AT: average total height, AAF: Average angle of first-order branch insertion, AB: Average height of the first branch, CD: Average crown diameter, DBH: Average diameter at breast height. c) Image of the sampled individual that most closely represents the Stone model.

Figura 2. Modelo arquitectónico de *Grevillea robusta* en las categorías diamétricas 10 y 15. a) Estructura arquitectónica idealizada del modelo Stone (Chomicki et al., 2017; Hallé et al., 1978). b) Representación esquemática de la arquitectura de *G. robusta* para el modelo Stone; donde AT: altura total promedio, ARPO: ángulo promedio de inserción de rama de primer orden, AR: altura promedio de la primera rama, DC: diámetro promedio de copa, DN: diámetro normal promedio. c) Representación fotográfica del individuo muestreado que mejor representa al modelo Stone.

have long growth between segments and preferential distribution towards the apex (acrotony); horizontal branches have lateral position with an ascending insertion angle. Inflorescences are Complex sympodial axillary (Figure 3a) with partial reiteration and fruits in the form of small woody capsules (Figure 3b); leaves are bipinnate (Figure 3c). All the characteristics described fit the Attims model (Figure 4).

According to Table 3, analysis of variance between diameter categories showed highly significant differences ($p \leq 0.001$) for diameter at breast height, total height, crown height and leaf blade length; highly significant ($p \leq 0.001$) for leaf base length; and significant ($p \leq 0.001$) for third-order branch length.

In relation to tree measurement characteristics according to diameter category, significant differences (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$) were observed in six of the 14 attributes shown in Table 4. Individuals in the largest categories (DC 30) were prominent in diameter at breast height, total height and leaf blade length. In contrast, intermediate diameter categories (DC 20 and 25) showed different behavior in total height, crown height, third order branch length and leaf blade length compared to the largest (DC 30) and smallest (DC 10) diameter categories. The lowest diameter categories had the lowest average values for diameter at breast

Las categorías diamétricas más grandes (20, 25 y 30) se caracterizan por diferenciarse en tronco y ramas con un patrón de crecimiento del fuste monopoidal de forma determinada y actividad proléptica. El patrón de ramificación es policasio con tendencia de crecimiento combinado. Las ramas de primer, segundo y tercer orden son abundantes, incluso hay ramas de mayor jerarquía; el ángulo de inserción es difuso en las ramas de primer y segundo orden y ascendente en ramas de mayor jerarquía. La ramificación es lateral (axial) y la arquitectura es monopoidal con crecimiento de ramas inmediato dado que el meristemo apical y el axilar se ramifican al mismo tiempo. Las ramas tienen crecimiento largo entre segmentos y reparto preferencial hacia el ápice (acrotonía); las ramas horizontales tienen posición lateral con un ángulo de inserción ascendente. Las inflorescencias son axilares simpodiales complejas (Figura 3a) con un tipo de reiteración parcial y frutos a manera de pequeñas cápsulas leñosas (Figura 3b); las hojas son bipinnadas (Figura 3c). Todas las características descritas se ajustan al modelo Attims (Figura 4).

Acorde con el Cuadro 3, el análisis de varianza entre categorías diamétricas mostró diferencias altamente significativas ($p \leq 0.001$) en diámetro normal, altura total, altura de copa y longitud de lámina de la hoja; muy significativas ($p \leq 0.01$) en la longitud de la base

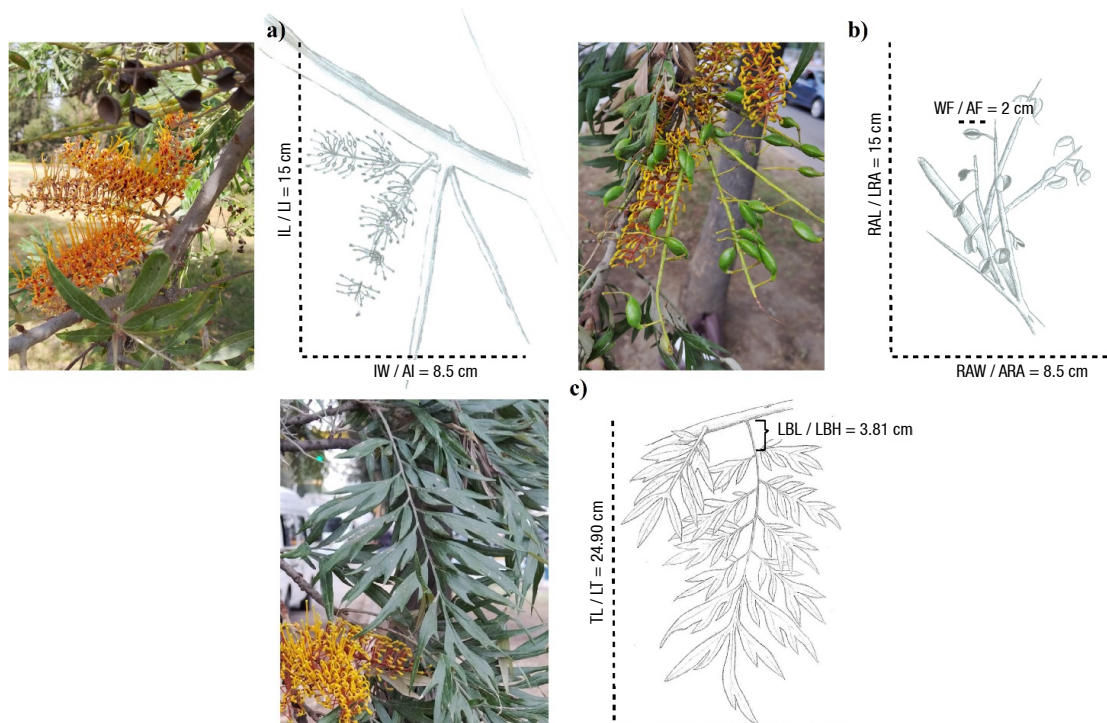


Figure 3. Average values of reproductive and foliar structures of *Grevillea robusta*: a) inflorescence (IL: Inflorescence length; IW: inflorescence width), b) fruits (RAL: raceme length; RAW: raceme width; WF: width of fruit) and c) compound leaf (TL: total length of leaf blade, LBL: leaf base length).

Figura 3. Valores promedio de estructuras reproductivas y foliares de *Grevillea robusta*: a) inflorescencia (LI: largo de la inflorescencia; AI: ancho de la inflorescencia), b) frutos (LRA: largo del racimo; ARA: ancho del racimo; AF: ancho del fruto) y c) hoja compuesta (LT: longitud total de la lámina de la hoja, LBH: longitud de la base de la hoja).

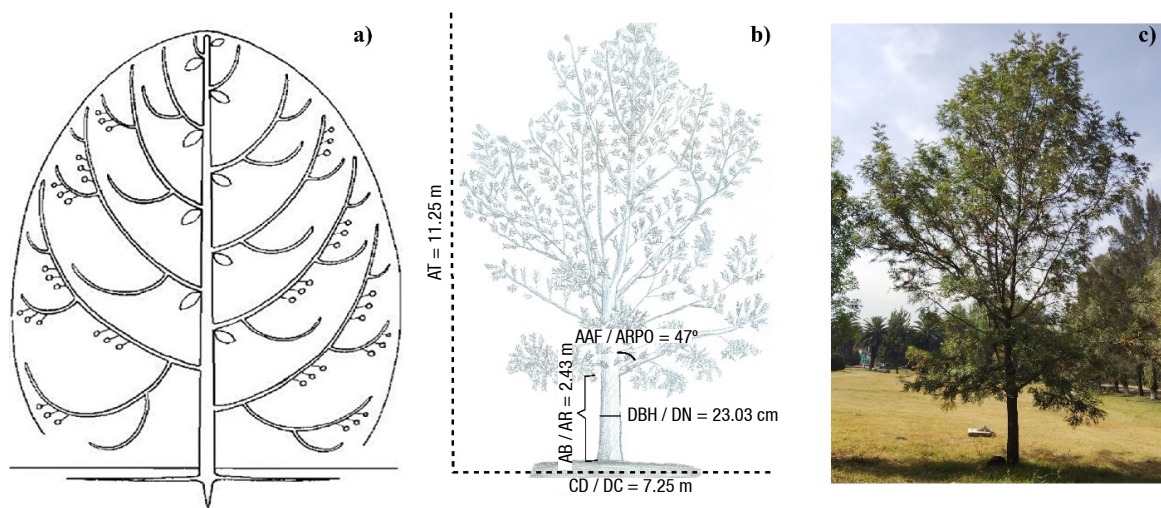


Figure 4. Architectural model of *Grevillea robusta* in diameter categories 20, 25, and 30 cm. a) Architectural structure idealized from the Attims model (Chomicki et al., 2017; Hallé et al. 1978). b) Schematic representation of the *G. robusta* architecture for the Attims model, where AT: average total height, AAF: Average angle of first-order branch insertion, AB: Average height of the first branch, CD: Average crown diameter, DBH: Average diameter at breast height. c) Image of the sampled individual best identified with the Attims model.

Figura 4. Modelo arquitectónico de *Grevillea robusta* en las categorías diamétricas de 20, 25 y 30 cm. a) Estructura arquitectónica idealizada del modelo Attims (Chomicki et al., 2017; Hallé et al. 1978). b) Representación esquemática de la arquitectura de *G. robusta* para el modelo Attims, donde AT: altura total promedio, ARPO: ángulo promedio de inserción de rama de primer orden, AR: altura promedio de la primera rama, DCP: diámetro de copa promedio, DN: diámetro normal promedio. c) Representación fotográfica del individuo que mejor se identifica con el modelo Attims.

Table 3. Mean squares from the ANOVA for tree measurement characteristics of *Grevillea robusta* in peri-urban areas of Texcoco, Estado de México.**Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para atributos dasométricos de *Grevillea robusta* en zonas periurbanas de Texcoco, Estado de México.**

Source of variation / Fuente de variación	df / gl	DBH/DN (cm)	TH/AT (m)	CH/AC (m)	HB/AR (m)	FBL/LRPO (cm)	SBL/LRSO (cm)	TBL/LRTO (cm)
DC/CD	4	0.701***	0.302***	0.498***	0.027 ns	1.711 ns	0.666 ns	1.552*
Error		0.004	0.023	0.025	0.079	0.709	0.746	0.464
Source of variation / Fuente de variación	gl	IL/LEN (cm)	LL/LH (cm)	LBL/LBH (cm)	CC/COB (m ²)	AAF/ARPO (°)	AAS/ARSO (°)	AAT/ARTO (°)
DC/CD	4	0.039 ns	0.057***	2.756**	0.447 ns	613.40 ns	0.08 ns	142.23 ns
Error		0.177	0.006	0.663	0.183	346.70	0.14	240.67

DC = diameter category; df = degrees of freedom. Variables: DBH = diameter at breast height at 1.3 m height; TH = total height; CH = crown height; HB = height to first branch; FBL, SBL and TBL = first, second and third order branch length.; IL = internode length; LL = leaf blade length; LBL = leaf base length; CC = crown cover; AAF, AAS and AAT = first, second and third order branch insertion angle. *** Highly significant differences ($p \leq 0.001$); ** very significant differences ($p \leq 0.01$); * significant differences ($p \leq 0.05$); ns = no significant differences ($p > 0.05$).

CD = categoría diamétrica; gl = grados de libertad. Variables: DN = diámetro normal a 1.3 m de altura; AT = altura total; AC = altura de copa; AR = altura a primera rama; LRPO, LRSO y LRTO = longitud de rama de primer, segundo y tercer orden, respectivamente; LEN = longitud de entrenudos; LH = longitud de la lámina de la hoja; LBH = longitud de la base de la hoja; COB = cobertura de la copa; ARPO, ARSO y ARTO = ángulo de inserción de rama de primer, segundo y tercer orden, respectivamente. ***Diferencias altamente significativas ($p \leq 0.001$); **diferencias muy significativas ($p \leq 0.01$); *diferencias significativas ($p \leq 0.05$); ns = sin diferencias significativas ($p > 0.05$).

Table 4. Average values of tree measurement characteristics for *Grevillea robusta* in peri-urban areas of Texcoco.**Cuadro 4. Valores promedio de atributos dasométricos para *Grevillea robusta* en zonas periurbanas de Texcoco.**

Diameter category / Categoría diamétrica (cm)	N	DBH/DN (cm)	TH/AT (m)	AC/CH (m)	HB/AR (m)	FBL/LRPO (cm)	SBL/LRSO (cm)	TBL/LRTO (cm)
DC/CD 10	3	10.03 a	5.90 a	3.86 a	2.04 a	30.00 a	25.00 a	17.67 ab
DC/CD 15	5	16.66 b	9.66 b	7.07 b	2.60 a	65.80 a	46.00 a	13.80 b
DC/CD 20	14	19.75 c	10.78 bc	8.29 bc	2.49 a	86.50 a	51.71 a	47.07 a
DC/CD 25	6	24.58 d	11.53 bc	9.20 cd	2.33 a	62.83 a	29.00 a	38.83 a
DC/CD 30	3	35.27 e	12.78 c	10.40 d	2.38 a	100.00 a	39.00 a	36.00 a
LSD/DMS		0.136	0.296	0.311	0.548	1.712	1.678	1.327
Diameter category / Categoría diamétrica (cm)	N	IL/LEN (cm)	LL/LH (cm)	LBL/LBH (cm)	CC/COB (m ²)	AAF/ARPO (°)	AAS/ARSO (°)	AAT/ARTO (°)
DC/CD 10	3	43.00 a	23.03 a	3.15 a	35.55 a	55.33 a	40.67 a	31.00 a
DC/CD 15	5	54.80 a	24.05 a	3.78 b	32.89 a	43.80 a	31.20 a	37.60 a
DC/CD 20	14	50.00 a	25.20 b	3.86 b	29.25 a	55.00 a	41.71 a	42.07 a
DC/CD 25	6	52.83 a	25.50 b	3.99 b	50.67 a	42.00 a	41.33 a	46.33 a
DC/CD 30	3	41.33 a	26.73 c	4.29 b	56.20 a	73.33 a	10.00 a	38.00 a
LSD/DMS		0.817	1.589	0.661	0.831	36.247	0.728	30.200

N = number of trees. LSD = Least significant difference. Values followed by equal letters are not statistically different among diameter categories according to the Tukey-Kramer test ($p = 0.05$). DBH = diameter at breast height at 1.3 m height; TH = total height; CH = crown height; HB = height to first branch; FBL, SBL and TBL = first, second and third-order branch length; IL = internode length; LL = leaf blade length; LBL = leaf base length; CC = crown cover; AAF, AAS and AAT = first, second and third order branch insertion angle.

N = número de individuos. DMS = diferencia mínima significativa. Valores seguidos por letras iguales no son estadísticamente diferentes entre categorías diamétricas de acuerdo con la prueba de Tukey-Kramer ($p = 0.05$). DN = diámetro normal a 1.3 m de altura; AT = altura total del árbol; AC = altura de copa; AR = altura a primera rama; LRPO, LRSO y LRTO = longitud de rama de primer, segundo y tercer orden, respectivamente; LEN = longitud de entrenudos; LH = longitud de la lámina de la hoja; LBH = longitud de la base de la hoja; COB = cobertura de la copa; ARPO, ARSO y ARTO = ángulo de inserción de rama de primer, segundo y tercer orden, respectivamente.

height, total height, crown height, leaf blade length and leaf base length. These results highlight variations in tree-measurement characteristics in relation to diameter category, showing distinctive patterns of growth and development in different segments of *G. robusta* population.

Table 5 shows the results of the Student's t-test for the comparison of tree measurement characteristics, according to the models identified for *G. robusta*. Differences are highly significant ($p \leq 0.001$) for diameter at breast height, total height, crown height and leaf blade length; moreover, significant differences ($p \leq 0.05$) were observed in leaf base length and third-order branch length.

Regarding the modeling of dominant height, it is observed that, except for the β_2 parameter in the

de la hoja; y significativas ($p \leq 0.05$) en la longitud de rama de tercer orden.

En relación con los atributos dasométricos según la categoría diamétrica, se observaron diferencias significativas (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$) en seis de los 14 atributos mostrados en el Cuadro 4. Los individuos de las categorías más grandes (CD 30) destacaron en diámetro normal, altura total y longitud de lámina de hoja. En contraste, las categorías diamétricas intermedias (CD 20 y 25) exhibieron un comportamiento diferente en altura total, altura de copa, longitud de rama de tercer orden y longitud de lámina de hoja en comparación con la categoría diamétrica más grande (CD 30) y la más pequeña (CD 10). Las categorías diamétricas más bajas presentaron los valores promedio más bajos de diámetro normal, altura total, altura de copa, longitud de lámina de

Table 5. T-student's values of tree measurement characteristics of *Grevillea robusta* between the identified architectural models (Attims vs. Stone) in peri-urban areas of Texcoco, Estado de México.

Cuadro 5. Valores t-student de los atributos dasométricos de *Grevillea robusta* entre los modelos arquitectónicos identificados (Attims vs. Stone) en zonas periurbanas de Texcoco, Estado de México.

Variable	T1-T2	Lower limit / Límite inferior	Upper limit / Límite superior	T value / Valor de t	Degrees of freedom / Grados de libertad	Probability / Probabilidad ($p \leq 0.05$)
Diameter at breast height (1.3 m) / Diámetro normal (1.3 m)	8.86	4.53	13.18	4.19	29	0.0002***
Total height / Altura total	2.98	1.35	4.62	3.72	29	0.0008***
Crown height / Altura de copa	2.94	1.55	4.33	4.32	29	0.0002***
Height to first branch / Altura a primera rama	0.03	-0.20	0.26	0.24	29	0.8147 ns
First order branch length / Longitud de rama de primer orden	0.52	-0.30	1.33	1.30	29	0.2031 ns
Second order branch length / Longitud de rama de segundo orden	0.44	-0.27	1.16	1.27	29	0.2133 ns
Third order branch length / Longitud de rama de tercer orden	0.99	0.44	1.54	3.67	29	0.0010**
Internode length / Longitud de entrenudos	0.01	-0.33	0.35	0.08	29	0.9359 ns
Leaf blade length / Longitud de la lámina de la hoja	1.81	1.08	2.54	4.93	153	<0.0001***
Leaf base length / Longitud de la base de la hoja	0.41	0.11	0.71	2.68	153	0.0082**
Canopy cover / Cobertura de la copa	0.02	-0.38	0.42	0.09	29	0.9288 ns
AAF / ARPO	5.88	-10.67	22.42	0.73	29	0.4735 ns
AAS / ARSO	0.15	-0.16	0.46	1.00	29	0.3251 ns
AAT / ARTO	7.53	-5.03	20.09	1.23	29	0.2301 ns

T1 = Attims model average; T2 = Stone model average. AAF, AAS and AAT = first, second and third-order branch insertion angle. ***highly significant differences ($p \leq 0.001$); **very significant differences ($p \leq 0.01$); ns = no significant differences ($p > 0.05$).

T1 = media del modelo Attims; T2 = media del modelo Stone. ARPO, ARSO y ARTO = ángulo de inserción de rama de primer, segundo y tercer orden, respectivamente. ***Diferencias altamente significativas ($p \leq 0.001$); **diferencias muy significativas ($p \leq 0.01$); ns = sin diferencias significativas ($p > 0.05$).

Chapman-Richards model (Table 6), all other fit parameters are significantly different from zero. This indicates that the Schumacher and Hossfeld IV models effectively capture the significant relationships among the variables considered in the fitting process. This suggests that these models effectively and accurately represent the significant relationships among the variables involved in the modeling of dominant height.

The Hossfeld IV model (Figure 5a) provided the best fit to the data distribution. It is notable for its strong statistical significance in all estimated parameters, with a recorded dominant height of 13.82 m, determined by the asymptotic limit defined by the β_0 parameter (Figure 5b).

For the dominant crown cover, a simple linear regression model was fitted (Figure 6), and its parameters were highly significant (Table 7), with an adjusted coefficient of determination (R^2) of 0.821. This value is considered acceptable based on the volume of sampled data and indicates the model's

hoja y longitud de base de la hoja. Estos resultados resaltan las variaciones en los atributos dasométricos en relación con la categoría diamétrica, evidenciando patrones distintivos de crecimiento y desarrollo en diferentes segmentos de la población de *G. robusta*.

El Cuadro 5 muestra los resultados de la prueba t-student para la comparación de los atributos dasométricos, de acuerdo con los modelos identificados para *G. robusta*. Las diferencias son altamente significativas ($p \leq 0.001$) en diámetro normal, altura total, altura de copa y longitud de lámina de la hoja; asimismo, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la longitud de la base de la hoja y la longitud de rama de tercer orden.

En relación con la modelación de la altura dominante, se observa que, con excepción del parámetro β_2 en el modelo Chapman-Richards (Cuadro 6), todos los demás parámetros de ajuste son significativamente diferentes de cero. Esto indica que los modelos Schumacher y Hossfeld IV capturan, de manera sustancial, las relaciones entre

Table 6. Regression parameters of nonlinear models for total height of *Grevillea robusta* trees in peri-urban areas of Texcoco, Estado de México.

Cuadro 6. Parámetros de regresión de los modelos no lineales para el atributo altura total de árboles *Grevillea robusta* en zonas periurbanas de Texcoco, Estado de México.

Model/ Modelo	β_0	Significance/ Significancia	β_1	Significance/ Significancia	β_2	Significance/ Significancia
Schumacher	17.8640	1.22E-11***	10.369	5.38E-06***	—	—
Chapman-Richards	13.1370	7.67E-12***	0.1300	0.0218 **	2.5424	0.1436
Hossfeld IV	13.8294	1.61E-08***	5.5828	0.00566 **	2.2863	0.0084**

*** Highly significant differences ($p \leq 0.001$) y ** very significant differences ($p \leq 0.01$).

***Diferencias altamente significativas ($p \leq 0.001$) y **muy significativas ($p \leq 0.01$).

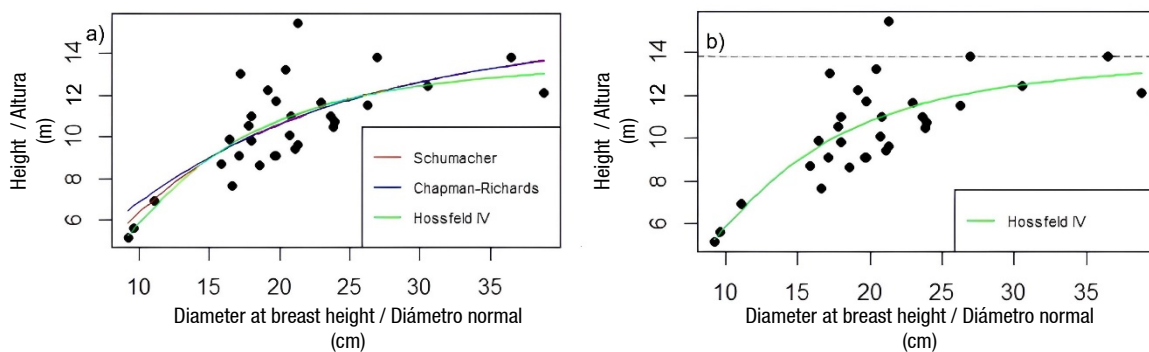


Figure 5. Graph of total height-diameter with the selected nonlinear models: a) Schumacher, Chapman-Richards, and Hossfeld IV; b) asymptote in the Hossfeld IV model.

Figura 5. Gráfico diámetro-altura total con los modelos no lineales seleccionados, a) Schumacher, Chapman-Richards y Hossfeld IV; b) asíntota en el modelo Hossfeld IV.

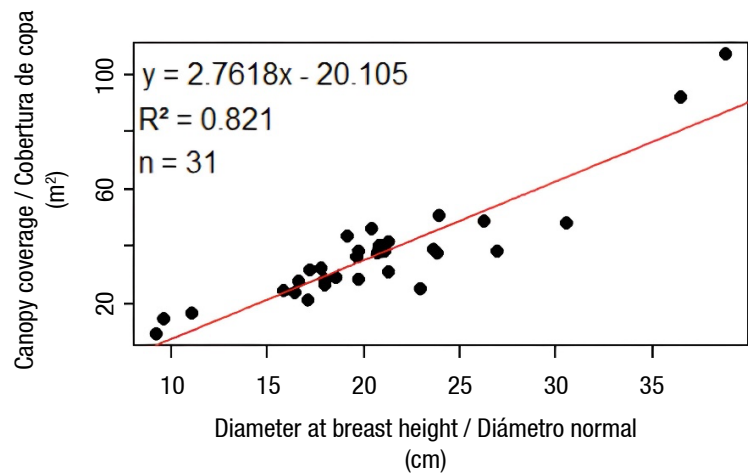


Figure 6. Simple linear regression for crown cover-diameter at breast height of *Grevillea robusta* in peri-urban areas of Texcoco, Estado de México.
Figura 6. Regresión lineal simple para los atributos cobertura de copa-diámetro normal de *Grevillea robusta* en zonas periurbanas de Texcoco, Estado de México.

Table 7. Simple linear regression for canopy cover in *Grevillea robusta* trees in peri-urban areas of Texcoco, Estado de México.
Cuadro 7. Regresión lineal simple para el atributo cobertura de copa en árboles de *Grevillea robusta* en zonas periurbanas de Texcoco, Estado de México.

	Estimation/ Estimación	Standard error/ Error estándar	t value/ Valor de t	Significance/ Significancia ($p < 0.001$)
Intercept/ Intercepto	-20.1037	5.1936	-3.871	0.000567
Diameter at breast height/ Diámetro normal	2.7618	0.2395	11.533	2.36E-12

reasonable ability to explain the variability in crown cover. The negative intercept is attributed to the scarcity of trees with small diameters in the sample. The parameter associated with diameter at breast height is positive and highly significant ($p \leq 0.001$), showing the positive relationship with crown cover, at a rate of 2.76 m² of crown cover per additional cm in tree diameter (Table 7).

Discussion

The analyses reveal that *G. robusta* undergoes ontogenetic changes (metamorphosis) according to the diameter class; that is, it shows changes in its architectural model in response to modifications in the development stage. Perreta and Vegetti (2005) reported similar findings and emphasize the need for a comprehensive diagnosis of the morphological and functional aspects of all the axis categories (branching) recognizable at each growth stage. Meanwhile, Chomicki et al. (2017) state that architecture is a consistent characteristic determined by genetics, but they also acknowledge that it is not a unidirectional

las variables consideradas en el ajuste. Lo anterior sugiere que dichos modelos son efectivos para describir con precisión las relaciones significativas entre las variables consideradas en la modelación de la altura dominante.

El modelo que mejor se ajustó a la distribución de los datos fue el modelo de Hossfeld IV (Figura 5a). Este sobresale por su alta significancia estadística en todos los parámetros estimados, obteniendo una altura dominante registrada de 13.82 m, determinada por el límite asintótico representado por el parámetro β_0 (Figura 5b).

En cuanto a la cobertura de copa dominante se ajustó un modelo de regresión lineal simple (Figura 6) y sus parámetros resultaron altamente significativos (Cuadro 7) con un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 0.821. Este valor se considera aceptable dado el volumen de datos muestreados e indica una capacidad aceptable del modelo para explicar la variabilidad en la cobertura de copa. El intercepto negativo se atribuye a la escasez de individuos con diámetros pequeños en la muestra. El parámetro asociado al diámetro normal es positivo y altamente significativo ($p \leq 0.001$), lo

process, rather a balance between the endogenous development of plants and the spatiotemporal factors in which they develop.

The results of this study provide consistent evidence to refute the first hypothesis, which suggested the absence of variations in the architectural model of the species among diameter classes. This study also highlights that both total height and crown height are reliable indicators for classification into height classes, thus corroborating the work of Beltrán-Rodríguez et al. (2017). Furthermore, the results show the presence of significant differences in tree measurement characteristics among diameter classes. Consequently, the hypothesis suggesting that an increase in tree biomass has no effect on tree measurement values is dismissed. However, it is important to consider that morphometry and architecture depend not only on the aboveground structure but also on the characteristics of the root system and the soil in which the trees develop, as described by Vennetier et al. (2015). Although the study focused on the aboveground part of the species, it is crucial to establish that root development is essential for the growth and shape of the aboveground structure. Particularly, in the study area, individuals grow in Antrosol soils, and their development is influenced by constant factors that alter their natural growth, such as those related to human activities.

Among the anthropogenic factors are pruning practices that focus exclusively on the lower branches, which do not alter the shape of the rest of the crown but do affect growth by reducing the leaf area. Valverde et al. (2020) demonstrated that defoliation in *Gmelina arborea* Roxb. individuals affects diameter growth and height by 39.0 % and 64.3 %, respectively. On the other hand, irrigation undoubtedly benefits tree functioning and growth, but soil compaction, resulting from vehicle and pedestrian traffic, negatively influences variables such as height and diameter (Jourgholami, 2018; Wang et al., 2019). Since the individuals in this study are located between 1 to 4 meters from the vehicle stream, it is expected that various factors are affecting growth. In this regard, Singh et al. (2020) compared *G. robusta* trees along the sides of roads with those in natural conditions and observed negative effects on physiological variables such as carbon assimilation rate, transpiration rate, and stomatal efficiency. This indicates that peri-urban conditions influence tree development; therefore, different growth processes can be expected.

It is important to note that adult trees, classified in the larger diameter categories, showed a strong alignment with the Attims model, characterized by more developed crowns, which provide greater shade and height, optimizing the use of vertical

cual muestra la relación positiva que mantiene con la cobertura de copa, a una tasa de 2.76 m² de cobertura de copa por cada cm adicional en el diámetro normal del árbol (Cuadro 7).

Discusión

Los análisis revelan que *G. robusta* experimenta cambios ontogénicos (metamorfosis) según la categoría diamétrica; es decir, exhibe cambios en su modelo arquitectónico como respuesta a cambios en la etapa de desarrollo. Perreta y Vegetti (2005) reportaron algo similar y destacan la necesidad de un diagnóstico completo de los aspectos morfológicos y funcionales de todas las categorías de ejes (ramificaciones) reconocibles en cada estadio de crecimiento. Por su parte, Chomicki et al. (2017) establecen que la arquitectura es una característica constante determinada por la genética, pero reconocen también que no es un proceso unidireccional, sino un equilibrio entre el desarrollo endógeno de las plantas y los factores espacio-temporales en los que se desarrolla.

Los resultados de este estudio proporcionan evidencia consistente para refutar la primera hipótesis que sugería la ausencia de variaciones en el modelo arquitectónico de la especie entre las categorías diamétricas. Este estudio también destaca que tanto la altura total como la altura de la copa son indicadores confiables para la clasificación en clases de altura, corroborando así trabajos realizados por Beltrán-Rodríguez et al. (2017). Asimismo, los resultados muestran la presencia de diferencias significativas en los atributos dasométricos entre las categorías diamétricas, en consecuencia, se descarta la hipótesis que sugiere que el incremento en biomasa de los árboles no modifica los valores de atributos dasométricos. No obstante, hay que considerar que la morfometría y arquitectura dependen no solo de su estructura aérea, sino también de las características del sistema radicular y del suelo en el que se desarrollen tal y como lo describen Vennetier et al. (2015). Aunque el estudio se centró en la parte aérea de la especie, es importante establecer que el desarrollo radicular es crucial para el crecimiento y forma de la estructura aérea. Particularmente, en el área de estudio, los individuos se desarrollan en suelos de tipo Antrosol y su crecimiento está sujeto a factores constantes que alteran su desarrollo natural, como los relacionados con las actividades humanas.

Entre los factores antropogénicos se encuentran las podas hechas exclusivamente en las ramas bajas que no alteran la forma del resto de la copa, pero sí afectan el crecimiento al reducir la superficie de área foliar. Valverde et al. (2020) evidenciaron que la defoliación en individuos de *Gmelina arborea* Roxb. afecta el crecimiento diamétrico y la altura en 39.0 % y 64.3 %, respectivamente. Por otro lado, el riego beneficia indudablemente el funcionamiento y crecimiento

space. In contrast, younger individuals, belonging to the smaller categories, align with the Stone model, which requires more expansive spaces and exhibits less crown and height development compared to the Attims model. However, this characteristic facilitates light penetration, the regeneration of plant species in the surrounding area, pruning, and management, all of which are crucial for maintenance in urban environments (Chomicki et al., 2017; Hallé et al., 1978).

Changes in the architectural model may be influenced by the developmental stage of individuals, a situation that has already been documented by Camacho Moreno et al. (2017). In that study, the authors identified distinct growth patterns between larger and smaller diameter categories. Similarly, Forrester (2019) observed that trees with larger diameters exhibited higher values in total height and crown height compared to their smaller diameter counterparts. It is important to note that, in general, growth and development of species do not follow a linear pattern, but rather a logistic pattern, characterized by increasing and decreasing yields, as demonstrated by Salas-Eljatib (2020). This study also confirms that total height, crown height, third-order branch length, leaf blade length, and leaf base length tend to stabilize or show slower growth in two or more diameter categories, reinforcing their fit to the logistic model, a situation also reported by Zhu et al. (2021). This phenomenon could be related to both the developmental stage of the trees and the environmental pressures that individuals are exposed to.

The results reject the second hypothesis, since it was found that differences in diameter categories are linked to variations in growth characteristics. This aspect is crucial, especially because *G. robusta* is widely used in urban and peri-urban reforestation, as indicated by Mancilla Morales et al. (2024) and Saavedra-Romero et al. (2019). Due to the rapid growth rate of *G. robusta* in urban environments (Martíarena et al., 2013) it is essential to consider that changes in morphometry can occur in relatively short periods of time, which, in turn, can influence its aesthetic appearance regarding its diameter category (Giambra et al., 2019; Ramos Palacios, 2019).

Interián-Ku et al. (2009) also identified that diameter at breast height, total height, and crown height were significantly different ($p \leq 0.001$) among poles saplings and seedlings of *Caesalpinia gaumeri* Greenm. and *Gymnopodium floribundum* Rolfe in a tropical forest in southern Yucatán. This additional evidence supports the idea that the developmental stages of trees have a significant influence on their morphological characteristics. Therefore, these studies validate the results and emphasize the importance of taking

de los árboles, pero la compactación del suelo, como resultado del tránsito vehicular y peatonal, influye de manera negativa en variables como la altura y el diámetro (Jourgholami, 2018; Wang et al., 2019). Dado que los individuos de este estudio se encuentran un rango de entre 1 a 4 m de distancia del arroyo vehicular, es previsible que diversos factores estén afectando el crecimiento. Al respecto, Singh et al. (2020) compararon individuos de *G. robusta* en las orillas de carreteras con individuos en condiciones naturales y observaron efectos negativos en variables fisiológicas como la tasa de asimilación de carbono, tasa de transpiración y la eficiencia estomática. Lo anterior muestra que las condiciones periurbanas afectan el desarrollo del arbolado, por lo tanto, procesos distintos de crecimiento pueden ser esperados.

Es importante destacar que los árboles adultos, clasificados en las categorías diamétricas mayores, mostraron notable correspondencia con el modelo Attims, caracterizado por un mayor desarrollo de la copa, lo que proporciona más sombra y altura, aprovechando eficientemente el espacio vertical. En contraste, los individuos más jóvenes, pertenecientes a las categorías menores, se ajustan al modelo Stone que requiere espacios más amplios y presenta desarrollo de copa y altura inferiores que el modelo de Attims; sin embargo, esta característica favorece la penetración de luz, la regeneración de especies vegetales en el entorno, la poda y el manejo, cruciales para el mantenimiento en entornos urbanos (Chomicki et al., 2017; Hallé et al., 1978).

Los cambios en el modelo arquitectónico pueden estar influenciados por el estado de desarrollo de los individuos, situación que ya ha sido documentada por Camacho Moreno et al. (2017). En dicha investigación, los autores identificaron patrones distintos de crecimiento entre las categorías diamétricas de mayor tamaño y las categorías diamétricas más pequeñas. También Forrester (2019) observó que árboles con diámetros más grandes presentaban valores superiores en altura total y altura de copa en comparación con sus contrapartes de menor diámetro. Es importante señalar que, en términos generales, el crecimiento y desarrollo de las especies no siguen un patrón lineal, sino más bien uno logístico, caracterizado por rendimientos crecientes y decrecientes, como lo ha demostrado Salas-Eljatib (2020). El presente estudio también confirma que la altura total, altura de copa, longitud de ramas de tercer orden, longitud de la lámina y longitud de la base de las hojas tienden a estabilizarse o mostrar un crecimiento más lento en dos o más categorías diamétricas, lo que refuerza su ajuste al modelo logístico, situación que también fue reportada por Zhu et al. (2021). Este fenómeno podría estar vinculado tanto a la etapa de desarrollo de los árboles como a las presiones ambientales a las que los individuos están expuestos.

diameter class into account when analyzing the architecture and growth of tree species.

A detailed analysis of the morphometry and architecture of *G. robusta* contributes to the planning and management of urban and peri-urban plantations, an area that remains underexplored. However, the lack of information on environmental characteristics and management practices, such as pruning, irrigation, density management, and fertilization, may influence the morphometry of *G. robusta* and, consequently, its architecture. Including these factors in future research would provide a more comprehensive understanding of its adaptations and management in urban environments, optimizing the use of this species in limited spaces and enhancing reforestation strategies, as well as the planning of green areas in relation to the surrounding urban infrastructure.

The Hossfeld IV model stands out for its ability to represent the growth asymptote, as reflected in its parameter β_0 (García-Cuevas et al., 2022). This stabilization is observed at a specific dominant height of 13.82 m in the growth of *G. robusta* under the conditions studied. However, this value differs significantly from those reported by Barth (2018), who noted heights of up to 40 m in plantations in Argentina, and by Katembo Kasekete et al. (2022), who reported heights of 25–35 m in the Republic of Congo. These discrepancies can be attributed to the development locations of the populations, as the cited studies focused on plantations for commercial purposes, in contrast to the highly modified peri-urban and urban areas examined in the present study.

Information on architecture, morphometry and tree structure is fundamental for urban infrastructure planning. According to García García et al. (2023), it is preferable to avoid locating trees under power lines or to ensure that the maximum height of trees is lower than that of the wiring. Furthermore, Lyytimäki (2017) indicates that the architecture and morphometry of urban trees can cause damage to the surrounding urban infrastructure, depending on their location, diameter category, and crown size; therefore, it is important to consider these parameters in the choice of species for urban planning.

The fitted canopy cover model does not show asymptotic stabilization to help identify a dominant canopy cover. This is attributed to the lack of data from trees in the 30 cm diameter category (DC 30) in the present study, which have a canopy cover ranging from 9 to 106 m², so it would be desirable to expand the study area in future research. When comparing these results with those obtained in the urban park of Bosque de Chapultepec, Mexico City, with average crown cover

Los resultados rechazan la segunda hipótesis planteada, ya que se encontró que diferencias en las categorías diamétricas están vinculadas a variaciones en las características de crecimiento. Este aspecto es crucial, especialmente porque *G. robusta* se emplea extensamente en reforestaciones urbanas y periurbanas, como lo indican Mancilla Morales et al. (2024) y Saavedra-Romero et al. (2019). Debido a la rápida tasa de crecimiento de *G. robusta* en entornos urbanos (Martíarena et al., 2013) es esencial tener en cuenta que los cambios en la morfometría pueden ocurrir en lapsos relativamente cortos, lo que, a su vez, puede influir en su apariencia estética considerando su categoría diamétrica (Giambra et al., 2019; Ramos Palacios, 2019).

Interián-Ku et al. (2009) identificaron también que el diámetro normal, la altura total y la altura de copa fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.001$) entre brinzales, latizales y fustales de *Caesalpinia gaumeri* Greenm. y *Gymnopodium floribundum* Rolfe en una selva baja caducifolia del sur de Yucatán. Este respaldo adicional confirma la idea de que las etapas de desarrollo de los árboles ejercen influencia significativa en sus características morfológicas. Por tanto, dichos estudios validan los resultados y subrayan la importancia de considerar la categoría diamétrica al analizar la arquitectura y el crecimiento de las especies arbóreas.

El análisis detallado de la morfometría y arquitectura de *G. robusta* contribuye a la planeación y manejo de plantaciones urbanas y periurbanas, un área poco explorada. No obstante, la falta de información sobre las características ambientales y de actividades de manejo como podas, riegos, manejo de la densidad y fertilización pueden influir en la morfometría de *G. robusta* y, consecuentemente, en su arquitectura. La inclusión de estos factores en investigaciones posteriores permitiría una visión más integral de sus adaptaciones y manejo en entornos urbanos, optimizando el uso de la especie en espacios reducidos y mejorando las estrategias de reforestación, así como la planeación de áreas verdes en relación con la infraestructura urbana que las rodea.

El modelo Hossfeld IV destaca por su capacidad para representar la asíntota de crecimiento, visualizada a través de su parámetro β_0 (García-Cuevas et al., 2022). Esta estabilización se manifiesta a una altura dominante específica de 13.82 m en el crecimiento de *G. robusta* bajo las condiciones estudiadas. No obstante, este valor difiere significativamente de los informados por Barth (2018), quien señala alturas de hasta 40 m en plantaciones en Argentina, y de Katembo Kasekete et al. (2022), quienes reportan alturas de hasta 25–35 m en la República del Congo. Estas discrepancias pueden atribuirse a la ubicación de desarrollo de

between 24.9 and 31.7 m² (Benavides Meza & Fernández Grandizo, 2012), a narrower cover interval is observed, probably due to a mature population with well-developed individuals; however, the model fit shows $R^2 = 0.43$ regarding basal area, considerably lower than 0.82 obtained in the present study. This disparity can be attributed to the variability of species in Bosque de Chapultepec, in contrast to the single species approach (*G. robusta*). On the other hand, in the urban woodland of Montemorelos, Nuevo León, Mexico, canopy cover ranges from 5 to 107 m² (Canizales Velázquez et al., 2020), a range very similar to that examined in this study, suggesting that variability in canopy cover may be influenced by common factors in diverse urban environments.

Conclusions

The morphological characteristics and branching patterns observed confirm the alignment of *G. robusta* with the Stone model for smaller diameter categories and the Attims model for larger diameter categories. This indicates that tree diameter category and growth model can affect tree measurement and morphometric attributes of the species. Although the sampling design was unbalanced due to the limited number of individuals in the study area, advanced statistical techniques were applied to mitigate these effects, strengthening the validity of the results. Understanding the dominant height of the species can support its management in urban and peri-urban spaces. These findings are relevant for planning and utilizing the species as a widely used ornamental forest element, facilitating the identification of the most suitable diameter categories, heights, and growth models for diverse urban and peri-urban reforestation scenarios.

Acknowledgments

The authors thank the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) for providing support for training and education of research personnel, they also thank the Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) for the scholarship granted to the first author and thank the reviewers for their valuable comments and suggestions that contributed significantly to the improvement of this work.

las poblaciones, dichos estudios se enfocaron en plantaciones con fines comerciales, en contraste con las áreas altamente modificadas como zonas periurbanas y urbanas de la presente investigación.

La información sobre la arquitectura, morfometría y estructura arbórea es fundamental para la planificación de infraestructura urbana. Según García García et al. (2023), es preferible evitar la ubicación de árboles debajo de cables eléctricos o asegurarse de que la altura máxima de los árboles sea inferior a la del cableado. Además, Lyytimäki (2017) indica que la arquitectura y morfometría del arbolado urbano pueden ocasionar daños a la infraestructura urbana circundante, dependiendo de su ubicación, categoría diamétrica y tamaño de la copa; por lo tanto, es crucial considerar estos parámetros en la elección de especies para la planificación urbana.

El modelo de cobertura de copa ajustado no muestra una estabilización asintótica que ayude a identificar una cobertura de copa dominante. Esto se atribuye a la carencia de datos de individuos en la categoría diamétrica de 30 cm (CD 30) en el presente estudio, los cuales tienen una cobertura de copa que oscila entre 9 y 106 m², por lo que sería deseable ampliar el área de estudio en futuras investigaciones. Al comparar estos resultados con los obtenidos en el parque urbano del bosque de Chapultepec, Ciudad de México, con coberturas de copa promedio entre 24.9 y 31.7 m² (Benavides Meza & Fernández Grandizo, 2012), se observa un intervalo de cobertura más estrecho, debido probablemente a una población madura con individuos bien desarrollados; sin embargo, el ajuste del modelo muestra $R^2 = 0.43$ con respecto al área basal, considerablemente menor que 0.82 obtenido en el presente estudio. Esta disparidad puede atribuirse a la variabilidad de especies en el bosque de Chapultepec, en contraste con el enfoque de una sola especie (*G. robusta*). Por otra parte, en el arbolado urbano de Montemorelos, Nuevo León, México, la cobertura de copa oscila entre 5 y 107 m² (Canizales Velázquez et al., 2020), un rango muy similar al examinado en este estudio, lo cual sugiere que la variabilidad en la cobertura de copa puede estar influenciada por factores comunes en diversos entornos urbanos.

Conclusiones

Las características morfológicas y patrones de ramificación observados ratifican el ajuste de *G. robusta* al modelo Stone para categorías diamétricas pequeñas y al modelo Attims para las categorías diamétricas de mayor tamaño, lo que indica que la categoría diamétrica y el modelo de crecimiento del árbol pueden afectar los atributos dasométricos y morfométricos de la especie. Aunque el diseño

End of English version

References / Referencias

- Alanís-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A., Molina-Guerra, V. M., Gárate-Escamilla, H., & Sigala-Rodríguez, J. Á. (2022). Caracterización del arbolado urbano del centro de Hualahuises, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(73), 29–49. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i73.1271>
- Báez-Hernández, A., Herrera-Meza, G., Vázquez-Torres, M., Aquino-Bolaños, E. N., & Martínez, A. J. (2016). Allometric relationships of 19 mountain tropical rain forest tree species. *Botanical Sciences*, 94(2), 209c220. <https://doi.org/10.17129/botsci.252>
- Barth, S. R., Boca, T., Giménez, A. M., Joseau, M. J., Gauchat, M. E., & Fassola, H. E. (2018). Estimación de biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. implantada en la provincia de Misiones, Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 44(1), 30–40. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6480546.pdf>
- Bautista Cruz, A., González Cubas, R., Treviño Garza, E. J., Yerena Yamalle, J. I., Alanís Rodríguez, E., & Aguirre Calderón, O. A. (2022). Modelación de la biomasa aérea en bosques templados subtropicales secos en el noreste de México. *Bosque*, 43(3), 243–251. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002022000300243>
- Begazo Curie, K., & Jave Nakayo, J. (2018). Estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural en especies arbóreas de Lima, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 76–90. <https://doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1167>
- Beltrán-Rodríguez, L., Romero-Manzanares, A., Luna-Cavazos, M., & García-Moya, E. (2017). Variación arquitectónica y morfológica de *Hintonia latiflora* (Rubiaceae) en relación a la cosecha de corteza y factores ambientales. *Revista de Biología Tropical*, 65(3), 900–916. <http://doi.org/10.15517/rbt.v65i3.29444>
- Beltrán-Rodríguez, L., Sánchez-Gutiérrez, F., Sol-Sánchez, Á., Puc-Kauil, R., Hernández-Ramos, J., Vázquez-Cortez, V. F., Pozo-Santiago, C. O., & Montoya-Reyes, F. (2022). Incremento, alometría y sobrevivencia de plántulas de *Avicennia germinans* L. en Cárdenas, Tabasco. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25, 095. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4132>
- Benavides Meza, H. M., & Fernández Grandizo, D. Y. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera y Bosques*, 18(2), 51–71. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.182352>
- Brown, R. (1830). *Supplementum primum Prodromi florae Novae Hollandiae: exhibens proteaceas novas quas in Australasia legerund*. https://bibdigital.rjb.csic.es/medias/7c/a6/3c/09/7ca63c09-4d51-4c07-a465-96b977d35012/files/BRO_Suppl_Prodr.pdf
- Camacho Moreno, E., López Ortiz, S., Olguín Palacios, C., Suarez Islas, A., Valdez Hernández, J. I., & Pineda Herrera, E. (2017). Fenología y arquitectura arbórea de *Calyptanthus schiedeana* O. Berg. *Lysiloma acapulcense* (Kunth) Benth y *Tabebuia chrysantha* (Jacq.) G. Nicholson en agroecosistemas de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(40), 19–35. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i40.33>
- Canizales Velázquez, P. A., Alanís Rodríguez, E., Holguín Estrada, V. A., García García, S., & Chávez Costa, A. C. (2020). Caracterización del arbolado urbano de la ciudad de Morelos, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62), 111–135. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.768>
- de muestreo fue desbalanceado, debido al número limitado de individuos en el área de influencia del estudio, se aplicaron análisis estadísticos robustos para mitigar estos efectos que reforzaron la validez de los resultados. El conocimiento de la altura dominante de la especie puede apoyar su manejo en espacios urbanos y periurbanos. Estos resultados son relevantes para la planificación y utilización de la especie como elemento forestal de amplio uso ornamental, y permiten la identificación de las categorías diamétricas, alturas y modelos de crecimiento más adecuados para diversos espacios en reforestaciones urbanas y periurbanas.
- ## Agradecimientos
- Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por otorgar el apoyo a capacitación y formación de personal investigador, al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada al primer autor y a los revisores por sus valiosas observaciones y sugerencias que contribuyeron significativamente a la mejora de este trabajo.
- ## Fin de la versión en español
-
- Castellanos Vargas, I., García Calderón, N. E., & Cano Santana, Z. (2017). Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: Atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 51–64. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000100051
- Chomicki, G., Coiro, M., & Renner, S. S. (2017). Evolution and ecology of plant architecture: integrating insights from the fossil record, extant morphology, developmental genetics and phylogenies. *Annals of Botany*, 120(6), 855–891. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx113>
- Chudnoff, M. (1984). *Tropical timbers of the world*. USDA-Forest Service-Forest Products Laboratory. <http://www.tropicaltimber.info/wp-content/uploads/2015/06/USDA.TropicalTimbersoftheWorld-Chudnoff.Total1980version.pdf>
- El-Khateeb, M. A., Sakr, S. S., Hashish, K. I., Mazhar, A. A., & Abdel Magied, H. M. (2023). Effect of some mineral nutrients on vegetative growth, chemical constituents, and anatomical structure of *Grevillea robusta* seedlings. *Egyptian Journal of Chemistry*, 66(8), 191–208. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2022.168821.7088>
- Forrester, D. I. (2019). Linking forest growth with stand structure: Tree size inequality, tree growth or resource partitioning and the asymmetry of competition. *Forest Ecology and Management*, 447, 139–157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.053>
- García-Cuevas, X., Hernández-Ramos, J., Tamarit-Urias, J. C., Hernández-Ramos, A., & Quiñonez-Barraza, G. (2022). Modelos de índice de sitio en plantaciones de *Swietenia macrophylla* King en Quintana Roo, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(3), 387–387. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.3.387>

- García-Cuevas, X., Rodríguez-Medina, R. E., Hernández-Ramos, J., Ruiz-Duque, H., Hernández-Ramos, A., & Sáenz-Reyes, J. T. (2024). Índice de sitio en plantaciones forestales de *Pinus oocarpa* Shiede en Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(1). <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3765>
- García-Espinoza, G. G., Quiñonez-Barraza, G., Aguirre-Calderón, O. A., García-Magaña, J. J., & Hernández-Ramos, J. (2023). Ecuaciones de índice de diámetro para plantaciones comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindley en Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1). <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3454>
- García García, S. A., Rascón Solano, J., Vargas Flores, A. K., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., Molina Guerra, V. M., & Sandoval García, R. (2023). Caracterización arbórea, evaluación de daños y su impacto en la infraestructura en un campus universitario. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(80), 105–129. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i80.1397>
- García-Osorio, M. T., Plascencia-Escalante, F. O., Ángeles-Pérez, G., Montoya-Reyes, F., & Beltrán-Rodríguez, L. (2020). Producción y tasa de descomposición de hojarasca en áreas bajo rehabilitación en El Porvenir, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632099>
- Giambra, S., Venturella, G., Burruano, S., & Gargano, M. L. (2019). First report of *Diplodia africana* on *Grevillea robusta*. *Phytopathologia Mediterranea*, 58(3), 671–678. <https://doi.org/10.14601/Phyto-10745>
- Guigues Atoche, A. A. (2019). Evaluación de crecimiento de plántulas de *Cedrela odorata* y *Grevillea robusta* en diferentes sustratos durante su fase de propagación, Lima, Perú. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3897>
- Guzmán-Santiago, J. C., Santos-Posadas, H. M. D. L., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M., González-Cubas, R., Hernández-Aguilar, J. A., & Bautista-Cruz, A. (2023). Diámetro, altura y volumen en función del tocón para *Abies religiosa* en diferentes regiones de México. *Bosque*, 44(2), 387–399. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002023000200387>
- Hallé, F., Oldeman, R. A. A., & Tomlison, P. B. (1978). *Tropical trees and forests; an architectural analysis*. Springer-Verlag. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers20-09/09318.pdf
- Hernández-Ramos, J., Ángeles-Pérez, G., Pérez-Miranda, R., Reyes-Hernández, V. J., & Razo-Zárate, R. (2022a). Morfometría de copa para *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. y *Quercus rugosa* Née en Hidalgo, México. *Ciência Florestal*, 32, 1418–1438. <https://doi.org/10.5902/1980509865276>
- Hernández-Ramos, J., Reyes-Hernández, V. J., Fierros-González, A. M., Buendía-Rodríguez, E., Quiñonez-Barraza, G., & Santos-Posadas, H. M. D. L. (2022b). Morfometría de copa en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus montezumae* en Michoacán, México. *Bosque*, 43(3), 311–322. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002022000300311>
- Hossfeld, J. W. (1822). *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*. (4th ed.). Hennings, Gotha, Deutschland.
- Interián-Ku, V. M., Valdez-Hernández, J. I., García-Moya, E., Romero-Manzanares, A., Borja-de-la-Rosa, M. A., & Vaquera-Huerta, H. (2009). Arquitectura y morfometría de dos especies arbóreas en una selva baja caducifolia del sur de Yucatán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (85), 17–29. <https://doi.org/10.17129/botsoci.2300>
- Jourgholami, M. (2018). Effects of soil compaction on growth variables in Cappadocian maple (*Acer cappadocicum*) seedlings. *Journal of Forestry Research*, 29, 601–610. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0491-7>
- Katembo Kasekete, D., Ligot G., Mate Mweru, J. P., Drouet, T., Rousseau, M., Moango, A., & Bourland, N. (2022). Growth, productivity, biomass and carbon stock in *Eucalyptus saligna* and *Grevillea robusta* plantations in North Kivu, Democratic Republic of the Congo. *Forests*, (13), 2–24. <https://doi.org/10.3390/f13091508>
- Lyytimäki, J. (2017). Disservices of urban trees. In F. Ferrini, C. C. van den Bosch, & F. Alesio (Eds.), *Routledge handbook of urban forestry* (pp. 164–176). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315627106>
- MacGregor-Fors, I. (2008). Relation between habitat attributes and bird richness in a western Mexico suburb. *Landscape and Urban Planning*, 84(1), 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.06.010>
- Mancilla Morales, M., Mohedano Caballero, L., Granados Victorino, R. L., Granados Sánchez, D., & Corona Ambriz, A. (2024). Servicios ambientales de la vegetación arbórea de los parques de Texcoco de Mora, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(82), 69–88. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i82.1452>
- Martiarena, R. A., Von Wallis, A., Fernández, R. A., & Knebel, O. E. (2013). Efecto de la combinación de técnicas de establecimiento sobre el crecimiento inicial de *Grevillea robusta* A. Cunn. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(3), 387–397. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.07.046>
- Perreta, M. G., & Vegetti, A. C. (2005). Patrones estructurales en las plantas vasculares: una revisión. *Gayana Botánica*, 62(1), 9–19. <http://doi.org/10.4067/S0717-66432005000100003>
- Pineda-Herrera, E., Carreón-Santos, R. J., Valdez-Hernández, J. I., & Interián-Ku, V. M. (2019). Crecimiento en diámetro de tres especies arbóreas en una selva secundaria de Quintana Roo, México. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511601>
- Pineda-Herrera, E., Valdez-Hernández, J., López-López, M., Salgado-Ugarte, I., & Manzano-Méndez, F. (2011). Arquitectura de dos especies arbóreas de una Selva Alta Perennifolia de Oaxaca. In A. Endara-Agramont, A. Mora-Santacruz, & J. Valdez-Hernández (Eds.), *Bosques y árboles del trópico mexicano: Estructura, crecimiento y uso* (1.ª ed., pp. 23–36). Universidad de Guadalajara, CUCBA. https://www.researchgate.net/publication/264978533_Bosques_y_Arboles_del_Tropico_Mexicano_Estructura_Crecimiento_y_Usos
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing [software]*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramos Palacios, C. R. (2019). *Guía del arbolado y otras formas vegetales en situación de banqueta ciudad de San Luis Potosí*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. UASLP-SEGAM. <https://>

- ambiental.uaslp.mx/storage/imagenes/introduccion/Guiadelarbolado_y_otrasformasvegetales.pdf
- Richards, F. J. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10, 290–300. <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
- Rojas-Rodríguez, F., & Torres-Córdoba, G. (2020). Árboles del Valle Central de Costa Rica: reproducción de gravilia (*Grevillea robusta* A. Cunn.). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(40). <http://doi.org/10.18845/rfmk.v17i40.4910>
- Saavedra-Romero, L. D. L., Hernández-de la Rosa, P., Alvarado-Rosales, D., Martínez-Trinidad, T., & Villa-Castillo, J. (2019). Diversidad, estructura arbórea e índice de valor de importancia en un bosque urbano de la Ciudad de México. *Polibotánica*, (47), 25–37. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.47.3>
- Salas-Eljatib, C. (2020). Height growth-rate at a given height: A mathematical perspective for forest productivity. *Ecological Modelling*, 431, 109198. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109198>
- Schumacher, F. X. (1939). A new growth function curve and its application to timber-yield studies. *Journal of Forestry*, 37, 819–820.
- Schuster, J. C., Yoshimoto, J., & Monzón Sierra, J. (2023). *Biodiversidad de Guatemala* (vol. III). Universidad del Valle de Guatemala. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10238198>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Base de datos climatológica nacional. Estadística mensual*. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Mensuales/mex/mes15170.txt
- Singh, H., Yadav, M., Kumar, N., Kumar, A., & Kumar, M. (2020). Assessing adaptation and mitigation potential of roadside trees under the influence of vehicular emissions: A case study of *Grevillea robusta* and *Mangifera indica* planted in an urban city of India. *PloS ONE*, 15(1), e0227380. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227380>
- Tomlinson, P. B. (1983). Tree architecture: New approaches help to define the elusive biological property of tree form. *American Scientist*, 71, 141–149. <https://www.jstor.org/stable/27851897>
- Valverde, J. C., Méndez, D., & Arias, D. (2020). Efectos del defoliador *Atta cephalotes* Linnaeus en el crecimiento y el desarrollo fisiológico e hidráulico de árboles juveniles de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones controladas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(170), 214–226. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1030>
- Velasco Bautista, E., Cortés Barrera, E. N., González Hernández, A., Moreno Sánchez, F., & Benavides Meza, H. M. (2013). Diagnóstico y caracterización del arbolado del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 102–111. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.382>
- Vennetier, M., Zanetti, C., Meriaux, P., & Mary, B. (2015). Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes. *Plant and Soil*, 387, 81–101. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-2419-9>
- Wang, M., He, D., Shen, F., Huang, J., Zhang, R., Liu, W., Zhu, M., Zhou, L., Wang, L., & Zhou, Q. (2019). Effects of soil compaction on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soybean seedlings. *Plant and Soil*, 443(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05606-z>
- Zavaleta, A., Mandujano, S., & López-Téllez, C. (2023). Composición, estructura, diversidad y usos de la vegetación en un paisaje de la Reserva de Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, México. *Madera y Bosques*, 29(1), e2912416. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912416>
- Zhu, W., Liu, Z., Jia, W., & Li, D. (2021). Modelling the tree height, crown base height, and effective crown height of *Pinus koraiensis* plantations based on knot analysis. *Forests*, 12 (12), 1778. <https://doi.org/10.3390/f12121778>