



Volume equations and aboveground biomass expansion factors in *Quercus* sp. forests in Guanajuato, Mexico

Tarifas volumétricas y factores de expansión de biomasa aérea en bosques de *Quercus* sp. en Guanajuato, México

✉ [Bossuet G. Cortés-Sánchez](#)^{1*}; ✉ [Gregorio Ángeles-Pérez](#)²;
✉ [Héctor M. de los Santos-Posadas](#)²; ✉ [Casimiro Ordóñez-Prado](#)³;
✉ [Vidal Guerra-de la Cruz](#)¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Sitio Experimental Tlaxcala. Carretera Tlaxcala-Santa Ana Chiautempan km 2.5, Colonia Industrial. C. P. 90800. Tlaxcala, Tlaxcala, México.

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

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias- Campo Experimental San Martinito. Carretera Federal México-Puebla km 56, San Martinito. C. P. 74103. Tlahuapan, Puebla, México.

*Corresponding author: cortes.bossuet@inifap.gob.mx

Abstract

Introduction. Sustainable management of forest resources relies on the continuous improvement and updating of mathematical models that provide the most accurate information on forest goods and ecosystem services.

Objectives. To develop species-specific (SEVE) and multispecies (SEVM) additive systems of volume equation, as well as species-specific (FEBE) and multispecies (FEBM) biomass expansion factor equation systems, for estimating total biomass in six oak species from the Sierra of Santa Rosa, Guanajuato

Materials and methods. Data from 165 trees belonging to *Quercus rugosa*, *Q. obtusata*, *Q. sideroxyla*, *Q. coccolobifolia*, *Q. laurina* and *Q. candicans* were used. The destructive sampling method was applied to quantify total tree volume (TTV) as the sum of total stem volume and branch volume. SEVE and SEVM were fitted, along with FEBE and FEBM for stem, branches, and foliage, to estimate total biomass. Model performance was evaluated using the adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}), root mean square error, mean absolute percentage error, and mean absolute error.

Results. According to R^2_{adj} , SEVM explained 94.9 % of the variability in TTV, whereas SEVE explained between 0.91 and 0.98 across species. FEBM explained 96.6 % of the variability in total tree biomass, while FEBE explained between 93.4 and 98.3 %. On average, 51.4 % of total biomass was distributed in the stem, 46 % in branches and 2.6 % in foliage.

Conclusions. The developed additive systems allow for accurate estimation of both commercial volume and aboveground biomass.

Keywords: oak, forest management, allometric models, branch volume, total stem volume.

Resumen

Introducción. La gestión sostenible de los recursos forestales recae en la constante mejora y actualización de modelos matemáticos que provean la mayor información de los bienes y servicios de los bosques.

Objetivos. Generar sistemas aditivos de ecuaciones de volumen específicos (SEVE) y multiespecie (SEVM) y sistemas de ecuaciones de factores de expansión de biomasa específicos (FEBE) y multiespecie (FEBM) para la estimación de biomasa total en seis especies de encino de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato.

Materiales y métodos. Se utilizó información de 165 árboles pertenecientes a las especies *Quercus rugosa*, *Q. obtusata*, *Q. sideroxyla*, *Q. coccolobifolia*, *Q. laurina* y *Q. candicans*. Mediante el método destructivo se cuantificó el volumen total árbol (vta) a través del volumen rollo total y de ramas. Se ajustaron SEVE y SEVM, así como los FEBE y FEBM de fuste, ramas y follaje, para estimar biomasa total. Los sistemas se evaluaron mediante el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), raíz del error medio cuadrático, error absoluto promedio porcentual y error promedio absoluto.

Resultados. De acuerdo con R^2_{adj} , el SEVM explicó 94.9 % de la variabilidad del vta, mientras que los SEVE explicaron entre 0.91 y 0.98 para las especies. Los FEBM explicaron 96.6 % de variabilidad de biomasa total del árbol, y los FEBE, entre 93.4 y 98.3 %. En promedio, 51.4 % de la biomasa se localiza en el fuste, 46 % en las ramas y 2.6 % en el follaje.

Conclusiones. Los sistemas aditivos desarrollados permiten una estimación precisa tanto del volumen comercial como de la biomasa aérea.

Palabras clave:

encino, gestión forestal, modelos alométricos, volumen de ramas, volumen rollo total.

Please cite this article as follows (APA 7): Cortés-Sánchez, B. G., Ángeles-Pérez, G., de los Santos-Posadas, H. M., Ordóñez-Prado, C., & Guerra-de la Cruz, V. (2026). Volume equations and aboveground biomass expansion factors in *Quercus* sp. forests in Guanajuato, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 32, e25005. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2025.02.005>



Introduction

Mexico is the second center of diversity for *Quercus*, a genus widely distributed throughout the national territory with more than 160 species, of which 109 are endemic (Rosaliano-Evaristo et al., 2022). Oak timber production in Mexico accounts for 13.45 % (1026353 m³) of total national timber production (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2024). Oak forests and their associated communities cover approximately 14.54 million hectares of Mexican territory (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2023). Nevertheless, the use of oak species for timber purposes has been limited, mainly in forests mixed with pine. Limited knowledge of sawing process, wood transformation and industrialization techniques (Tamarit-Urias et al., 2021), together with the heterogeneity of physical-mechanical and anatomical properties among Mexican oaks, hinders their management and utilization compared with coniferous species.

At the national level, efforts have been made to update tree volume models to estimate total and merchantable volume through the Forest Biometric System (Sistema Biométrico Forestal, SiBiFor), which integrates volume equations, product distribution, site index, and growth for 11 states in the country (Vargas-Larreta et al., 2017a). Currently, there is an increasing need for information related to the biomass of individual trees and forests (Graciano-Ávila et al., 2019). In Mexico, most models have been developed and applied for pine species, whereas far fewer are available for broadleaf species (Rojas-García et al., 2015). In this context, several studies have developed volume models for some species of the genus *Quercus* sp. (Martínez-López & Acosta-Ramos, 2014; Tamarit-Urias et al., 2017; Vargas-Larreta et al., 2017a).

Aboveground forest biomass plays a key role in estimating stored carbon. Determining the magnitude of forests as carbon sinks or sources has been controversial, partly due to uncertainty in estimating stored forest biomass (Jagodziński et al., 2017). One alternative is the development of biomass expansion factors, which allow for straightforward estimation of biomass from volumes obtained through forest inventories. Biomass serves as an indicator of carbon content, representing the amount that can be released into the atmosphere or retained and stored in standing trees, stands, or landscapes (Martínez Angel et al., 2019; Pilli et al., 2024). Biomass content differs by species depending on climate and soil conditions and varies with forest type, stand age, productivity levels, and population density (Schepaschenko et al., 2018). Therefore, biomass expansion factors are useful when information on individual tree volume or stand volume

Introducción

México es el segundo centro de diversidad de *Quercus*, género distribuido ampliamente en todo el territorio nacional con más de 160 especies; 109 de ellas son endémicas (Rosaliano-Evaristo et al., 2022). La producción maderable de encino en México representa 13.45 % (1026353 m³) de la producción maderable nacional (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2024). Los bosques de encino y sus asociaciones cubren aproximadamente 14.54 millones de hectáreas del territorio mexicano (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2023). No obstante, el aprovechamiento de sus especies con fines maderables ha sido limitado, principalmente en bosques mezclados con pino. El conocimiento escaso sobre el proceso de aserrío y las técnicas de transformación e industrialización (Tamarit-Urias et al., 2021), aunado a las propiedades físico-mecánicas y anatómicas heterogéneas entre los encinos mexicanos, dificultan su cuidado y manejo en comparación con las coníferas.

A nivel nacional se han realizado esfuerzos por actualizar los modelos de cubicación de árboles para estimar volumen total y comercial mediante el Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor), el cual integra ecuaciones de volumen, distribución de productos, índice de sitio y crecimiento para 11 estados del país (Vargas-Larreta et al., 2017a). Actualmente, los requerimientos de información relacionada con la biomasa de árboles individuales y de los bosques han comenzado a ser necesarios (Graciano-Ávila et al., 2019). En México, la mayoría de los modelos se han desarrollado y aplicado para especies de pino, mientras que para latifoliadas se encuentran disponibles en menor proporción (Rojas-García et al., 2015); en este sentido, diversas investigaciones han desarrollado modelos de cubicación para algunas especies del género *Quercus* sp. (Martínez-López & Acosta-Ramos, 2014; Tamarit-Urias et al., 2017; Vargas-Larreta et al., 2017a).

La biomasa aérea forestal cumple un papel importante en la estimación de carbono almacenado. La determinación de la magnitud del sumidero o fuente de carbono de los bosques ha sido controvertida, en parte debido a la incertidumbre en la estimación de biomasa forestal almacenada (Jagodziński et al., 2017). Una alternativa es el desarrollo de factores de expansión de biomasa. Estos permiten estimar con facilidad la biomasa a partir del volumen obtenido mediante inventario. La biomasa es un indicador del contenido de carbono que representa la cantidad que puede ser liberada a la atmósfera o conservada y almacenada en el arbolado en pie, rodal o paisaje (Martínez Angel et al., 2019; Pilli et al., 2024). El contenido de biomasa es diferente para cada especie según el clima y las condiciones del suelo, y varía sustancialmente según el tipo de bosque, edad del rodal, niveles de productividad

is available, providing an effective means to estimate aboveground biomass.

In Guanajuato State, 85.5 % of timber production comes from oak species (SEMARNAT, 2021). In the Sierra of Santa Rosa Region, more than 14 oak species have been recorded in pure stands, which, in association with other species (*Pinus* sp., *Arbutus* sp. and *Arctostaphylos pungens* Kunth), represent the main aboveground component of the regional forest (Martínez-Cruz & Téllez-Valdés, 2004). Mining is carried out in the higher elevation of the Sierra; nevertheless, ecological integrity remains well conserved, particularly in areas distant from roads, where the continuity of oak forests functions as a biological corridor for the region (Arriaga et al., 2000).

Forest management in the Sierra of Santa Rosa has been practiced for more than five decades. The models commonly used were developed in the 1970s as part of the Guanajuato state inventory (Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG], 1976); in the region, updated volume models that provide detailed information on structural components of individual trees, allowing precise estimation of total tree volume (TTV) and quantification of aboveground biomass, have not been developed. In this context, the objectives of this study were: (i) to fit species-specific and multispecies volume equation systems to estimate TTV from branch volume and total stem volume, and (ii) to determine species-specific and multispecies biomass expansion factors using additive equation systems in *Quercus* forests of the Sierra of Santa Rosa, Guanajuato, Mexico.

Materials and methods

Study area

The study was conducted on properties in the Sierra of Santa Rosa, Guanajuato. This landscape is characterized by a temperate forest with uneven-aged stands of diverse oak species important for forestry. The Sierra of Santa Rosa is located at elevations ranging from 2000 to 2800 m within the municipalities of Guanajuato and Dolores Hidalgo, between the extreme coordinates 21° 12' 52.65" N - 101° 13' 30.80" W and 20° 59' 11.79" N - 101° 06' 23.36" W (Figure 1). The predominant climate is classified as C(w₂) and C(w₁)(w), temperate sub-humid, with annual mean temperature of 18.7 °C and annual precipitation of 660.7 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2008; Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2020). Forest management is based on the Mexican Method for the Management of Uneven-aged Forests (Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares, MMOBI), using individual- and group-selection harvests (Cabrera-Andrade et al., 2014).

y densidad de población (Schepaschenko et al., 2018). Por lo tanto, los factores de expansión de biomasa son útiles cuando se dispone de información de volumen individual o volumen de la masa forestal, siendo una alternativa eficaz para estimar biomasa aérea.

En el estado de Guanajuato, 85.5 % de la producción maderable procede de especies de encino (SEMARNAT, 2021). En la región Sierra de Santa Rosa se han registrado más de 14 especies de encinos en masas puras que, en asociación con otras especies (*Pinus* sp., *Arbutus* sp. y *Arctostaphylos pungens* Kunth), constituyen el principal componente aéreo del bosque de la región (Martínez-Cruz & Téllez-Valdés, 2004). En las partes altas de la sierra se practica la minería; a pesar de ello, la integridad ecológica está en buen estado de conservación, principalmente en las zonas alejadas de las carreteras, donde la continuidad de bosques de encinos funciona como un corredor biológico para la región (Arriaga et al., 2000).

El manejo forestal en la Sierra de Santa Rosa lleva más de cinco décadas. Los modelos empleados comúnmente han sido los generados en la década de 1970 en el inventario estatal de Guanajuato (Secretaría de Agricultura y Ganadería [SAG], 1976); en la región, no se han desarrollado modelos actualizados de volumen que brinden información detallada de componentes estructurales para árboles individuales, que permitan estimar el volumen total árbol (*vta*) con precisión y cuantificar su biomasa aérea. En este contexto, los objetivos de este trabajo fueron (i) ajustar un sistema de ecuaciones de volumen por especie y una multispecie para estimar *vta* a partir del volumen de ramas y del volumen rollo total árbol (ii) determinar los factores de expansión de biomasa por especie y una multispecie mediante sistemas de ecuaciones aditivas en bosques de *Quercus* de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se hizo en predios de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. Este paisaje se caracteriza por ser un bosque templado con rodales incoetáneos de diversas especies de encinos de importancia forestal. La sierra se encuentra a una elevación de 2000 a 2800 m dentro de los municipios de Guanajuato y Dolores Hidalgo, entre las coordenadas extremas 21° 12' 52.65" N - 101° 13' 30.80" O y 20° 59' 11.79" N - 101° 06' 23.36" O (Figura 1). El clima predominante es C(w₂) y C(w₁)(w), templado subhúmedo con temperatura media anual entre 18.7 °C y precipitación anual de 660.7 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2008; Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2020). La gestión forestal se basa en el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), mediante cortas de selección individual y en grupos (Cabrera-Andrade et al., 2014).

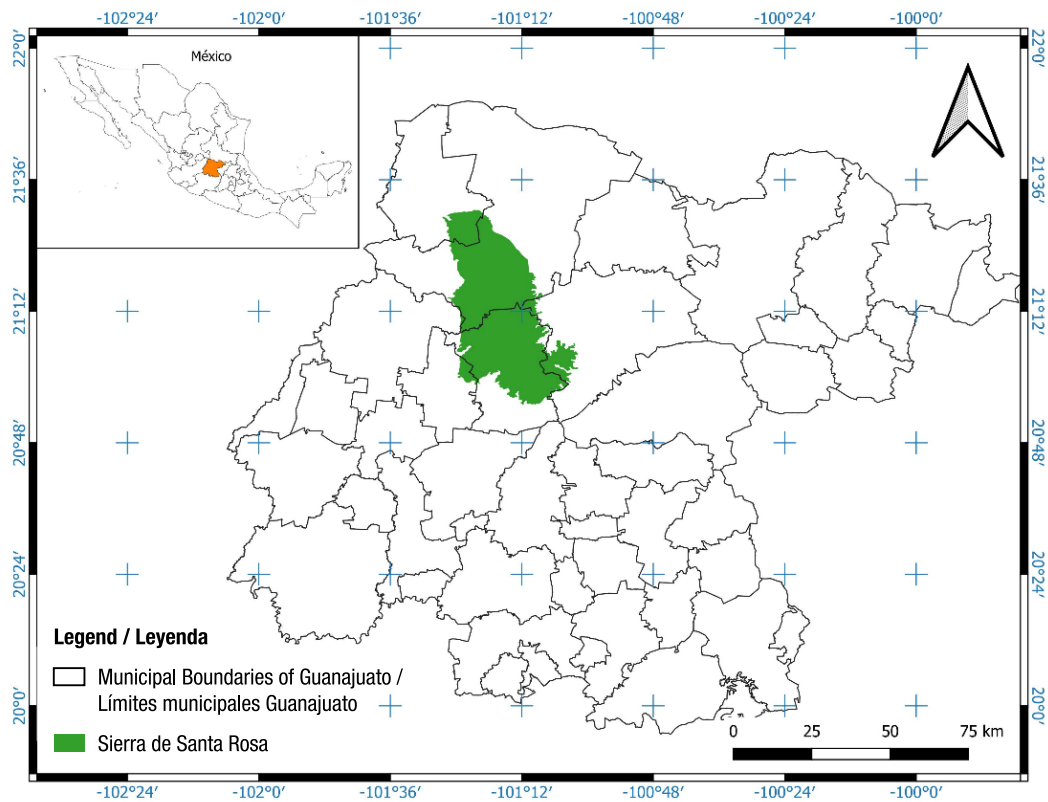


Figure 1. Location of the studied *Quercus* sp. forests in the Sierra of Santa Rosa, state of Guanajuato Mexico.

Figura 1. Localización de los bosques estudiados de *Quercus* sp. en la Sierra de Santa Rosa, estado de Guanajuato, México.

Data collection

The selection of an optimal sample size is typically empirical. Some models have been developed using as few as eight trees (Picard et al., 2012; Puc-Kauil et al., 2020). However, the studies compiled by Rojas-García et al. (2015) indicated that selecting between 20 and 35 trees for fitting allometric models can yield an adjusted coefficient of determination greater than 0.8. This goodness-of-fit estimator has been identified as one of the most important criteria in model selection and evaluation, according to Sileshi (2014).

Using data from 165 randomly selected trees, encompassing the full range of diameter at breast height (4.8 to 48.6 cm) and total height (3.55 to 20.6 m), we aimed to represent the existing variability within the forest stand. The number of trees sampled per species was distributed as follows: 34 individuals of *Quercus obtusata* Bonpl., 33 of *Q. sideroxylla* Bonpl., 30 of *Q. laurina* Bonpl., 30 of *Q. candicans* Née, 26 of *Q. rugosa* Née and 12 of *Q. coccolobifolia* Trel. Although an effort was made to obtain similar sample sizes for all species; this was not possible due to topographic and time constraints associated with the project. Species were selected based on their Relative Importance Value Index (RIVI) within the study area. Data used to estimate

Obtención de datos

La selección de un tamaño óptimo de muestra suele ser de forma empírica. Algunos modelos han sido ajustados a partir de ocho árboles (Picard et al., 2012; Puc-Kauil et al., 2020); sin embargo, los trabajos recopilados por Rojas-García et al. (2015) mostraron que con una selección de entre 20 y 35 árboles, para el ajuste de modelos alométricos, es posible obtener un coeficiente de determinación ajustado superior a 0.8. Este estimador de bondad de ajuste ha sido uno de los más importantes en la selección y evaluación de modelos de acuerdo con Sileshi (2014).

Con información de 165 árboles seleccionados aleatoriamente, que cubrieron todas las clases de diámetro normal (4.8 a 48.6 cm) y alturas (3.55 a 20.6 m), se buscó representar la variabilidad existente en la masa forestal. El número de árboles por especie se distribuyó de la siguiente manera: 34 árboles de *Quercus obtusata* Bonpl., 33 de *Q. sideroxylla* Bonpl., 30 de *Q. laurina* Bonpl., 30 de *Q. candicans* Née, 26 de *Q. rugosa* Née y 12 de *Q. coccolobifolia* Trel. Aunque se trató de tener una muestra similar para todas las especies no fue posible, debido a las limitaciones topográficas y temporales del proyecto. Las especies se seleccionaron con base en el Índice de Valor de Importancia Relativo (IVIR) del área de estudio. Los

the RIVI were obtained from field inventory plots established under the forest management program (Cabrera-Andrade et al., 2014).

For each selected tree, diameter at breast height was measured at 1.3 m above ground level prior to falling. Trees were then cut as close to ground level as possible, and total height, including the stump, was recorded. To obtain total stem volume (*TSV*), the stem was sectioned into 1 m intervals, and the diameter of each section was measured. Stem volume was calculated using Bailey's (1995) overlapping bolt method, and the tree tip volume was estimated as a cone. Branch volume (*BV*) for each individual was determined by scaling sections of variable length not exceeding 2 m using Smalian's formula, and branch tips were calculated using the cone formula. Thus, *TTV* was obtained as the sum of the two previous components (*TSV* and *BV*).

Fresh weight (*FW*) of each structural component (stem, branches, and foliage) was measured using 500 kg electronic scales with 0.1 kg precision. From each structural component, three samples per tree were collected; their *FW* was recorded in the field using a scale with a 10 kg capacity and 0.1 kg precision. To determine the dry weight/fresh weight ratio ($r = DW/FW$), samples were oven-dried at 70 °C to constant weight under laboratory conditions. This information was used to estimate moisture content and biomass for each structural component. Total biomass was calculated as the sum of the biomass of the tree components (Puc-Kauil et al., 2020; Soriano-Luna et al., 2015).

Volume equations

Volume equations typically involve one, two, or three input variables depending on the number of predictors included in the equation; additionally, they may be species-specific when developed for a single species or multispecies when applied to a group of species (Vargas-Larreta et al., 2018).

The models commonly used to estimate *TTV* include the combined-variable model, power models, and the Schumacher and Hall (1933) model. The latter has demonstrated strong capability in describing variability in $TSV = \alpha_0 DBH^{\alpha_1} Ht^{\alpha_2}$; where, *DBH* is the diameter at breast height of tree *i* (cm), *Ht* is the total height of the tree *i* (m) and α_i represents the coefficient estimated through regression analysis. According to Guzmán-Santiago et al. (2020), several authors agree that the Schumacher and Hall (1933) function provides accurate estimates for various hardwood and conifer species.

BV was estimated using the power model $BV = \beta_0 DBH^2$. This model is frequently used to describe variability

datos para la estimación del IVIR se tomaron de parcelas de inventario de campo del programa de manejo forestal (Cabrera-Andrade et al., 2014).

En cada árbol seleccionado, previo a su derribo, se midió el diámetro normal a 1.3 m sobre el suelo. Posteriormente, se cortó lo más cerca posible del suelo y se registró la altura total, incluyendo el tocón. Para obtener el volumen rollo total árbol (*vrta*), el fuste se seccionó en intervalos de 1 m y se registraron los diámetros de cada sección. El fuste se cubicó mediante el método de trozas traslapadas de Bailey (1995) y el volumen de punta del árbol se calculó como un cono. El volumen de ramas (*vram*) de cada individuo se determinó mediante la cubicación de secciones de longitud variable no mayor de 2 m con la fórmula de Smalian y la punta de ramas se cubicó con la fórmula del cono. De esta forma, el *vta* fue la suma de los dos componentes previos (*vrta* y *vram*).

El peso fresco (*Pf*) de cada componente estructural (fuste, ramas y follaje) se obtuvo con una báscula electrónica de 500 kg y 0.1 kg de precisión. De cada componente estructural se colectaron tres muestras por individuo; el *Pf* se registró en campo con una balanza de capacidad de 10 kg y precisión de 0.1 g. Para determinar la relación peso seco/peso fresco ($r = Ps/Pf$), las muestras en laboratorio se deshidrataron en una estufa a 70 °C hasta obtener peso constante. Con esta información se determinó el contenido de humedad y la biomasa por componente estructural. La biomasa total es la suma de la biomasa de los tres componentes (Puc-Kauil et al., 2020; Soriano-Luna et al., 2015).

Modelos para tarifas volumétricas

Las tarifas volumétricas suelen ser de una, dos o tres entradas dependiendo del número de variables que el modelo incluya; además, pueden ser simples cuando son desarrolladas para una especie o multiespecie para un grupo de especies (Vargas-Larreta et al., 2018).

Los modelos comúnmente empleados para determinar el *vta* son los de la variable combinada, los potenciales y el modelo de Schumacher y Hall (1933). Este último ha mostrado gran capacidad para describir la variabilidad del *vrta*: $vrta = \alpha_0 DBH^{\alpha_1} Ht^{\alpha_2}$; donde, *dn* es el diámetro de la sección normal del árbol *i* (cm), *at* es la altura total del árbol *i* (m) y α_i es el coeficiente estimado mediante la regresión. De acuerdo con Guzmán-Santiago et al. (2020), varios autores concuerdan en que la función de Schumacher and Hall (1933) garantiza estimaciones precisas para varias especies de latifoliadas y coníferas.

El *vram* se estimó con el modelo potencial $vram = \beta_0 dn^2$. Este modelo se emplea frecuentemente para describir la variabilidad del componente de ramas; el dn^2 se

in the branch component; DBH^2 was used to estimate this component, thereby forming a system of equations with greater parsimony by estimating only four parameters (Cruz-Cobos et al., 2023). These models were fitted simultaneously within an additive system of equations to individually estimate BV , TSV and TTV (Vargas-Larreta et al., 2017a). Accordingly, a specific system of equations was fitted for oak species and another for the species group. The species-specific volume equation system (SEVE) and the multispecies volume equation system (SEVM) were compared with the model developed in 1976 by the SAG (1976), based on their estimates and associated errors.

Biomass expansion factors

Biomass is linearly related to stand or tree volume (Boudewyn et al., 2007; Di Cosmo et al., 2016), such that total aboveground biomass (B_t), or its structural components (stem, branches, and foliage), can be estimated from volume by applying expansion factors:

$$B_s = \gamma_1 TTV$$

$$B_b = \gamma_1 TTV$$

$$B_f = \gamma_3 TTV$$

$$B_T = \sum B_i$$

where, B_s , B_b , B_f and B_T represent biomass (kg) of stem, branches, foliage, and total biomass respectively; γ_i is the constant biomass expansion factor for each structural component, and TTV is the total tree volume.

The proportion of biomass relative to TTV for each structural component was estimated by fitting linear equations within a system of simultaneous equations. The sum of these components equals the total biomass of the individual tree, consistent with the principle of additivity inherent to this method (Tamarit-Urias et al., 2025), for both individual species and species groups (FEBE and FEBM).

The FEBE and FEBM obtained in this study were compared with the biomass models developed for the study region by Cortés-Sánchez et al. (2019), based on analyses of predicted values and their associated errors.

Model fitting

The models were fitted using a system of equations that ensures the additivity property, which implies that the sum of the estimated volume of each component equals the total volume estimated directly by the total volume model obtained within a system of equations in which the fit is always optimal (Ordóñez-Prado et al., 2024; Soriano-Luna et al., 2015; Vargas-Larreta et

utilizó para estimar dicho componente y así constituir un sistema de ecuaciones con mayor parsimonia al solo estimar cuatro parámetros (Cruz-Cobos et al., 2023). Estos modelos se ajustaron de forma simultánea en un sistema de ecuaciones aditivo para estimar de forma individual $vram$, vrt y el vta (Vargas-Larreta et al., 2017a). De esta forma se ajustó un sistema de ecuaciones específico para las especies de encino y para el grupo de especies. Los sistemas de ecuaciones de volumen por especie (SEVE) y multiespecie (SEVM) se compararon con el modelo creado en 1976 por la SAG (1976), a través de sus estimaciones y errores.

Factores de expansión de biomasa

La biomasa está linealmente relacionada con el volumen del arbolado o rodal (Boudewyn et al., 2007; Di Cosmo et al., 2016), de tal forma que estimar la biomasa aérea total (B_t) o de sus componentes estructurales (fuste, ramas y follaje), a partir del volumen, es posible aplicando factores de expansión:

$$B_s = \gamma_1 vta$$

$$B_b = \gamma_1 vta$$

$$B_f = \gamma_3 vta$$

$$B_T = \sum B_i$$

donde, B_s , B_b , B_f y B_T es biomasa (kg) de fuste, ramas, follaje y total, respectivamente; γ_i es el factor de expansión de biomasa constante para cada componente estructural y vta es el volumen total árbol.

Con el ajuste de ecuaciones lineales se estimó la proporción de biomasa respecto al vta de cada componente estructural, a través de un sistema de ecuaciones simultáneo. La suma de estos elementos corresponde a la biomasa total del árbol individual, conforme al principio de aditividad inherente a esta técnica (Tamarit-Urias et al., 2025) para cada especie y grupos de especies (FEBE y FEBM).

Los FEBE y FEBM obtenidos en este estudio se compararon con los modelos de biomasa desarrollados para la región de estudio por Cortés-Sánchez et al. (2019), mediante los análisis de los predichos y sus errores.

Ajuste de modelos

Los modelos se ajustaron mediante un sistema de ecuaciones que garantiza la propiedad de aditividad, la cual consiste en que la suma del volumen estimado de cada componente es igual al volumen estimado directamente por el modelo de volumen total obtenido en un sistema de ecuaciones donde el ajuste es siempre el mejor posible (Ordóñez-Prado et al., 2024; Soriano-Luna et

al., 2017b; Zhang et al., 2017). This methodology was also applied to the estimation of aboveground biomass. Model fitting was conducted simultaneously using the Iterated Seemingly Unrelated Regression (ITSUR) method implemented through the MODEL procedure in SAS/ETS® (SAS Institute, 2011). Heteroscedasticity was correlated following the approach proposed by Dutcă et al. (2022), by testing different weighting factors related to the error variance. The reciprocal of DBH^2 ($1/DBH^2$) was the weighting factor that most effectively corrected residual heteroscedasticity.

Goodness-of-fit

Goodness of fit was assessed using the adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}). The root mean square error (RMSE), which reflects the precision of the estimates, was also considered, along with numerical and graphical analyses of the residuals to diagnose potential anomalies in model predictions. Model accuracy was further evaluated through cross-validation using the mean absolute percentage error (MAPE), the mean absolute error (MAE), and the correlation coefficient (r) between observed and predicted values, which helped assess the overall performance of the equations (Puc-Kauil et al., 2020; Sileshi, 2014).

Results and Discussion

Table 1 shows the ranges of the variables measured in the field for the 165 harvested trees, as well as the observed volume and biomass. *Q. rugosa* and *Q. laurina* exhibited greater volume, whereas the smallest trees sizes correspond to *Q. coccolobifolia*, which was distributed across low-productivity sites.

For all species, *TSV* represents, on average, 67.5 % of *TTV*; *Q. laurina* and *Q. obtusata* exhibited the lowest and highest proportion of *BV*, with 15.1 % and 32.5 %, respectively (Figure 2). Although several studies have quantified *BV* in oaks, an important variable for assessing the structure of broadleaf forests, none reports its proportion relative to *TTV* (Monárrez-González et al., 2024; Quiñonez-Barraza et al., 2019). In oaks, as in other broadleaf species, *BV* has been largely overlooked, as most studies have focused primarily on estimating stem volume or *TSV*; however, *BV* can account for a considerable proportion of *TTV* in broadleaf species (Guzmán-Santiago et al., 2020).

Additive equation system for volume estimation

The SEVM developed for the region, which included all harvested trees, showed good goodness-of-fit parameters. The variables *DBH* and *Ht* explained more than 90 % of the total volume. Table 2 presents the estimated coefficients as well as the RMSE. All parameters were highly significant. High goodness of fit was observed for

al., 2015; Vargas-Larreta et al., 2017b; Zhang et al., 2017). Esta metodología también se aplicó en la estimación de biomasa aérea. El ajuste se realizó de manera simultánea mediante el método de regresión iterativa aparentemente no relacionada (Iterated Seemingly Unrelated Regression, ITSUR) con el procedimiento MODEL del paquete estadístico de SAS/ETS® (SAS Institute, 2011). La heterocedasticidad se corrigió de acuerdo con lo propuesto por Dutcă et al. (2022), probando diferentes factores de ponderación relacionados con la varianza del error. El recíproco de dn^2 ($1/dn^2$) fue el factor de ponderación que mejor corrigió la heterocedasticidad de los residuales.

Evaluación de la bondad de ajuste

La bondad de ajuste se evaluó con el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), también se tomó en cuenta la raíz del error medio cuadrático (REMC) que define la precisión de las estimaciones, y con análisis numéricos y gráficos de los residuales que permiten el diagnóstico de posibles anomalías en la predicción de los modelos. Mediante validación cruzada se evaluó su precisión, el error absoluto promedio porcentual (MAPE, por sus siglas en inglés), el error promedio absoluto (MAE, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de correlación (r) de las observaciones y predichos que ayudaron a evaluar el comportamiento de las ecuaciones (Puc-Kauil et al., 2020; Sileshi, 2014).

Resultados y discusión

El Cuadro 1 muestra los intervalos de las variables medidas en campo de los 165 árboles cosechados, así como el volumen y biomasa observada. Las especies *Q. rugosa* y *Q. laurina* presentaron mayor volumen, mientras que las tallas más pequeñas correspondieron a *Q. coccolobifolia*, distribuida en los sitios de baja productividad.

Para todas las especies, el *v_{rta}* representa en promedio 67.5 % del *v_{ta}*; *Q. laurina* y *Q. obtusata* poseen la menor y mayor proporción de *v_{ram}* con 15.1 % y 32.5 %, respectivamente (Figura 2). Aunque varios trabajos determinan el *v_{ram}* de encinos, una variable importante en la evaluación de la estructura de los bosques de latifoliadas, ninguno muestra su proporción respecto al *v_{ta}* (Monárrez-González et al., 2024; Quiñonez-Barraza et al., 2019). En encinos, como en otras latifoliadas, el *v_{ram}* ha sido minimizado, ya que los estudios se han enfocado principalmente en la estimación del volumen del fuste o *v_{rta}*; no obstante, el *v_{ram}* llega a ser una proporción considerable del *v_{ta}* en latifoliadas (Guzmán-Santiago et al., 2020).

Sistema de ecuaciones aditivo para estimar volumen

El SEVM elaborado para la región, donde se incluyeron todos los árboles cosechados, presentó buenos parámetros de bondad de ajuste. Las variables *dn* y *at*

Table 1. Dendrometric parameters of oak species in the Sierra of Santa Rosa, Guanajuato, México.**Cuadro 1. Parámetros dendrométricos de especies de encino en la Sierra Santa Rosa, Guanajuato, México.**

Species / Especie	n	DBH (cm) / dn (cm)	Ht (m) / at (m)	TSV (m ³) / vrta (m ³)	BV (m ³) / vram (m ³)	TTV (m ³) / vta (m ³)
<i>Quercus rugosa</i>	26	7.6 - 44.5	5.85 - 17.8	0.016 - 0.9669	0.001 - 0.4599	0.0171 - 1.4268
<i>Quercus obtusata</i>	34	6.2 - 37.6	4.85 - 14.2	0.0116 - 0.593	0.0005 - 0.3381	0.0122 - 0.7996
<i>Quercus sideroxyla</i>	33	4.8 - 40.5	3.55 - 15.7	0.0042 - 0.7991	0.0001 - 0.3737	0.0044 - 1.1727
<i>Quercus coccolobifolia</i>	12	8.6 - 19.1	5.36 - 8.3	0.0194 - 0.1093	0.0036 - 0.0445	0.023 - 0.1429
<i>Quercus laurina</i>	30	5.8 - 48.6	4.35 - 20.6	0.0074 - 1.1369	0.0002 - 0.6694	0.0074 - 1.8063
<i>Quercus candicans</i>	30	6.6 - 41.6	6.09 - 16.85	0.0145 - 0.6793	0.0005 - 0.5963	0.0158 - 1.2755
General	165	4.8 - 48.6	3.55 - 20.6	0.0042 - 1.1369	0.0001 - 0.6694	0.0044 - 1.8063

DBH: diameter at breast height, Ht: total height, TSV: total stem volume, BV: branch volume, TTV: total tree volume.

dn: diámetro normal, at: altura total, vrta: volumen rollo total árbol, vram: volumen de ramas, vta: volumen total árbol.

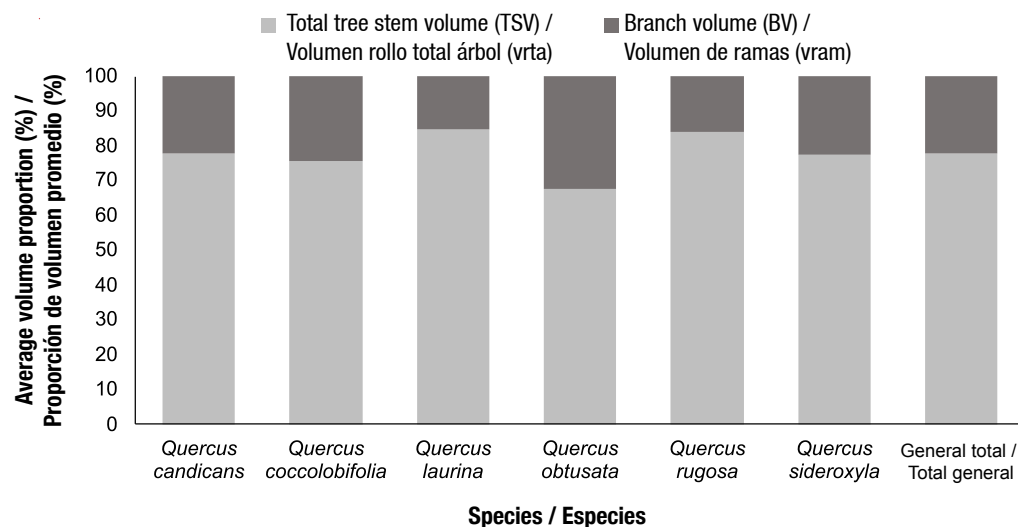


Figure 2. Average volume distribution by component (TSV: total stem volume, BV: Branch volume) relative to total tree volume in oak species.

Figura 2. Distribución de volumen promedio por componente (vrta: volumen rollo total árbol, vram: volumen de ramas) respecto al volumen total árbol en especies de encino.

TSV, whereas BV showed the lowest goodness of fit due to its high variability among individuals.

In the TSV model, α_0 scaling was applied within the exponential function to improve parameters sensitivity (Cortés-Sánchez et al., 2019; Soriano-Luna et al., 2015). SEVM explained 67 % of the variability in BV, whereas TTV exhibited the highest R^2_{adj} values, explaining 96 % of the volume variability. The weighting function $1/DBH^2$ improved variance homogeneity and the goodness-of-fit criteria for both structural components of the tree and total volume.

Species-specific equation systems generally explained more than 94 % of the variability in TSV except for *Q. obtusata* (85 %). For BV, the proportion of explained variability ranged from 57 and 81 %, while the best

explican más del 90 % del volumen total. El Cuadro 2 muestra los estimadores obtenidos, así como la REMC. Todos los parámetros fueron altamente significativos. Se observó que la bondad de ajuste de *vrta* fue alta, mientras que *vram* presentó la menor bondad de ajuste debido a su alta variabilidad entre los individuos.

En el modelo de *vrta* se empleó el escalamiento de α_0 dentro de la función exponencial, para mejorar la sensibilidad del parámetro (Cortés-Sánchez et al., 2019; Soriano-Luna et al., 2015). El SEVM explicó 67 % de la variabilidad del *vram*, mientras que el *vta* presentó los valores más altos de R^2_{adj} con 96 % de explicación de la variabilidad del volumen. La función de ponderación de $1/dn^2$ mejoró la homogeneidad de la varianza y los criterios de bondad de ajuste por componente estructural del árbol y volumen total.

Table 2. Estimated parameters and goodness-of-fit statistics for the multi-species volume equation system (SEVM) used to determine oak volume.**Cuadro 2. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del sistema de ecuaciones de volumen multiespecie (SEVM) para determinar volumen de encino.**

System of equation	Sistema de ecuaciones	RMSE/REMC	R ² _{adj}
$TSV = \exp(-9.94494) DBH^{1.94372} Ht^{0.891013}$	$vrta = \exp(-9.94494) dn^{1.94372} at^{0.891013}$	0.0440	0.9605
$BV = 0.000155 DBH^2$	$vram = 0.000155 dn^2$	0.0679	0.6703
$TTV = TSV + BV$	$vta = vrta + vram$	0.0721	0.9499

DBH: diameter at breast height (cm), Ht: total height (m), TSV: total stem volume (m³), BV: branch volume (m³), TTV: total tree volume (m³). RMSE: root means square error; R²_{adj}: adjusted coefficient of determination.

dn: diámetro normal (cm), at: altura total (m), vrta: volumen rollo total árbol (m³), vram: volumen de ramas (m³), vta: volumen total árbol (m³). REMC: raíz del cuadrado medio del error; R²_{adj}: coeficiente de determinación ajustado.

Table 3. Estimated parameters and goodness-of-fit statistics for species-specific volume equations systems (SEVE) used to determine oak species volume.**Cuadro 3. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistemas de ecuaciones de volumen específico (SEVE) para determinar volumen de las especies de encino.**

System of equations	Sistema de ecuaciones	RMSE	R ² _{adj}
<i>Quercus coccolobifolia</i>			
$TSV = \exp(-9.23249) DBH^{1.708401} Ht^{0.935352}$	$vrta = \exp(-9.23249) dn^{1.708401} at^{0.935352}$	0.00673	0.9433
$BV = 0.000093 DBH^2$	$vram = 0.000093 dn^2$	0.00630	0.7125
$TTV = TSV + BV$	$vta = vrta + vram$	0.00839	0.9523
<i>Quercus candicans</i>			
$TSV = \exp(-10.7672) DBH^{1.72206} Ht^{1.487913}$	$vrta = \exp(-10.7672) dn^{1.72206} at^{1.487913}$	0.0444	0.9486
$BV = 0.000142 DBH^2$	$vram = 0.000142 dn^2$	0.0839	0.5731
$TTV = TSV + BV$	$vta = vrta + vram$	0.0907	0.9152
<i>Quercus laurina</i>			
$TSV = \exp(-11.964) DBH^{1.669834} Ht^{1.921725}$	$vrta = \exp(-11.964) dn^{1.669834} at^{1.921725}$	0.0479	0.9787
$BV = 0.000128 DBH^2$	$vram = 0.000128 dn^2$	0.0920	0.6349
$TTV = TSV + BV$	$vta = vrta + vram$	0.0803	0.9703
<i>Quercus rugosa</i>			
$TSV = \exp(-10.8124) DBH^{1.821812} Ht^{1.387291}$	$vrta = \exp(-10.8124) dn^{1.821812} at^{1.387291}$	0.0434	0.9703
$BV = 0.000121 DBH^2$	$vram = 0.000121 dn^2$	0.0556	0.7271
$TTV = TSV + BV$	$vta = vrta + vram$	0.0455	0.9832
<i>Quercus sideroxyla</i>			
$TSV = \exp(-10.4932) DBH^{2.077075} Ht^{0.976965}$	$vrta = \exp(-10.4932) dn^{2.077075} at^{0.976965}$	0.0335	0.9621
$BV = 0.000161 DBH^2$	$vram = 0.000161 dn^2$	0.0419	0.8182
$TTV = TSV + BV$	$vta = vrta + vram$	0.0416	0.9752
<i>Quercus obtusata</i>			
$TSV = \exp(-11.1102) DBH^{1.861838} Ht^{1.476533}$	$vrta = \exp(-11.1102) dn^{1.861838} at^{1.476533}$	0.0477	0.8574
$BV = 0.000215 DBH^2$	$vram = 0.000215 dn^2$	0.0613	0.7208
$TTV = TSV + BV$	$vta = vrta + vram$	0.0526	0.9422

DBH: diameter at breast height (cm), Ht: total height (m), TSV: total stem volume (m³), BV: branch volume (m³), TTV: total tree volume (m³). RMSE: root means square error; R²_{adj}: adjusted coefficient of determination.

dn: diámetro normal (cm), at: altura total (m), vrta: volumen rollo total árbol (m³), vram: volumen de ramas (m³), vta: volumen total árbol (m³). REMC: raíz del cuadrado medio del error; R²_{adj}: coeficiente de determinación ajustado.

goodness-of-fit estimates were recorded for *TTV*; with explained volume variability exceeding 90 % in all cases. Table 3 presents the SEVE models and their estimated parameters. As noted by Simental-Cano et al. (2017), the Schumacher and Hall (1933) equation adequately represented the relationship between *TSV* as the dependent variable and diameter at breast height and total height as independent variables.

In this study, the RMSE ranged from 0.008 to 0.09, values lower than those reported by Simental-Cano et al. (2017) for oak species (0.08 and 0.15 m³). The volume of each structural component, as well as the *TTV* estimated using the SEVE and SEVM models, showed high goodness-of-fit and good precision. The *BV* of *Q. candicans* showed the lowest goodness of fit compared to the other species in this study, due to greater variability in branch volume. The estimated *TTV* was compared with the observed volume; the slope of the regression line and the correlation coefficient (*r*) were close to one (Figure 3).

Los sistemas de ecuaciones específicos, en la mayoría de los casos, explicaron más de 94 % de la variabilidad del *vrt* con excepción de *Q. obtusata* (85 %). Para *vram*, la variabilidad explicada del volumen de ramas estuvo entre 57 y 81 %, mientras que los mejores estimadores de bondad de ajuste se registraron para *vta*; ya que, en todos los casos, la explicación de la variabilidad del volumen fue superior a 90 %. El Cuadro 3 muestra los modelos del SEVE y sus parámetros estimados. Como mencionaron Simental-Cano et al. (2017), la ecuación de Schumacher y Hall (1933) representó adecuadamente la relación entre el *vrt* como variable dependiente y el diámetro normal y la altura total como variables independientes.

En este trabajo, la REMC osciló entre 0.008 y 0.09, valores menores que los obtenidos por Simental-Cano et al. (2017) para especies de encino (0.08 y 0.15 m³). El volumen de cada componente estructural, así como el *vta*, presentado en los SEVE y SEVM, mostraron alta bondad de ajuste y buena precisión. El *vram* de *Q. candicans* presentó la menor bondad de ajuste respecto

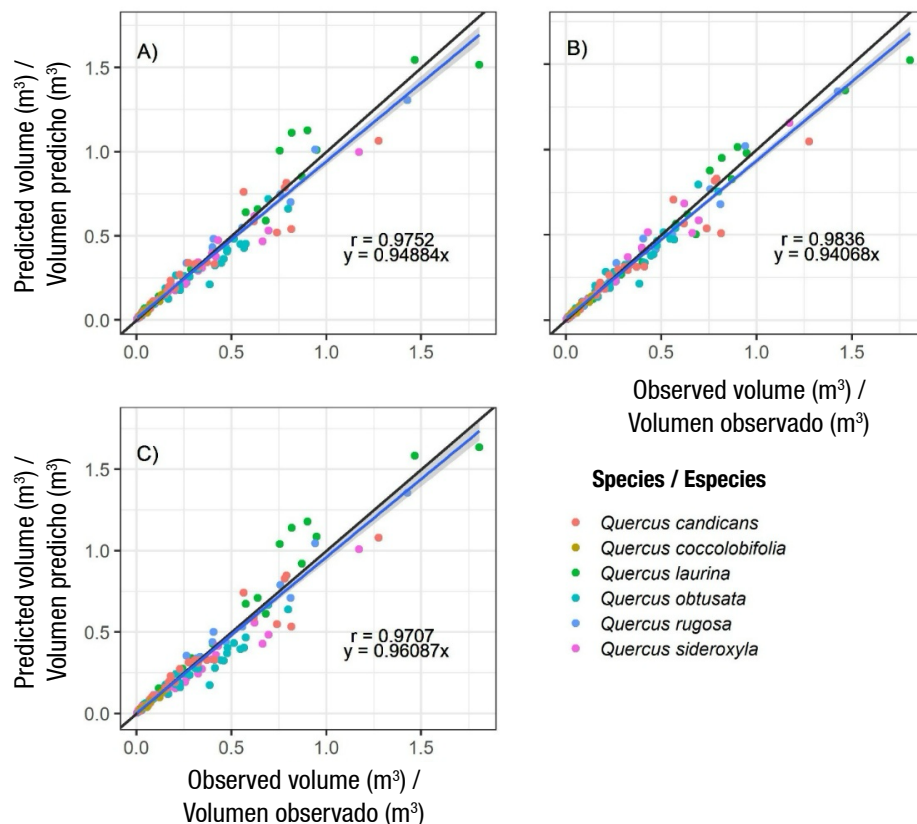


Figure 3. Relationship between observed and predicted total volume in oak species using the multispecies volume equation system (A), species-specific system (B) and the 1976 volume equation (C). The black line represents the 1:1 ratio. The blue line represents the linear regression between observed and predicted volume.

Figura 3. Relación entre volumen total observado y predicho en especies de encino mediante los sistemas de ecuaciones de volumen multiespecie (A), por especie (B) y ecuación de volumen 1976 (C). La línea negra es la relación 1:1. La línea azul representa la regresión lineal entre el volumen observado y predicho.

These volume equations were evaluated and compared using 10-fold cross-validation. The SEVM model showed a MAPE of 16.9 %, similar to the oak volume model used in the State Forest Inventory of Guanajuato (SAG, 1976). On the other hand, the SEVM better described volume variability in *TSV* and *BV*. Regarding MAE, the 1976 model showed the highest error. In contrast, the lower error was estimated for the SEVE models, which is why they were considered more suitable for the region (Figure 4). The use of SEVE models improved the evaluated goodness-of-fit metrics.

Biomass expansion factors

Figure 5 shows the linear relationship between tree volume and aboveground biomass, with a correlation coefficient of $r = 0.98$, indicating a strong correlation

a las otras especies de este estudio, debido a la mayor variabilidad del volumen de ramas. El *vta* estimado se comparó con el volumen observado; los valores de la pendiente de la recta de regresión y el coeficiente de correlación (r) fueron cercanos a uno (Figura 3).

Estas ecuaciones de volumen se evaluaron y compararon mediante validación cruzada en "10-fold". El modelo SEVM presentó un MAPE de 16.9 %, similar al modelo de volumen para encinos del inventario estatal forestal del estado de Guanajuato (SAG, 1976). Por otro lado, el SEVM describió mejor la variabilidad del volumen en el *vta* y *vram*. Respecto al MAE, el modelo de 1976 presentó el mayor error. En contraste, el menor error se estimó en los SEVE, razón por la que estos se consideraron más adecuados para la región (Figura 4). El empleo de modelos de SEVE mejoró las métricas de ajuste evaluadas.

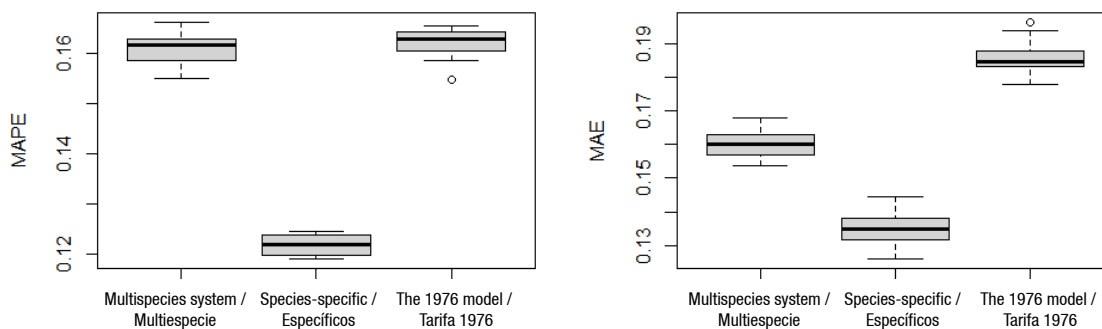


Figure 4. Mean absolute percentage error (MAPE) and mean absolute error (MAE) of volume estimates for *Quercus* species using the species-specific additive volume equation system (SEVE), the multispecies system (SEVM) and the 1976 model (SAG, 1976).

Figura 4. Error absoluto promedio porcentual (MAPE) y el error promedio absoluto (MAE) de las estimaciones de volumen de especies de *Quercus* mediante los sistemas aditivos de ecuaciones de volumen específicos (SEVE) y multispecie (SEVM) y el modelo de 1976 (SAG, 1976).

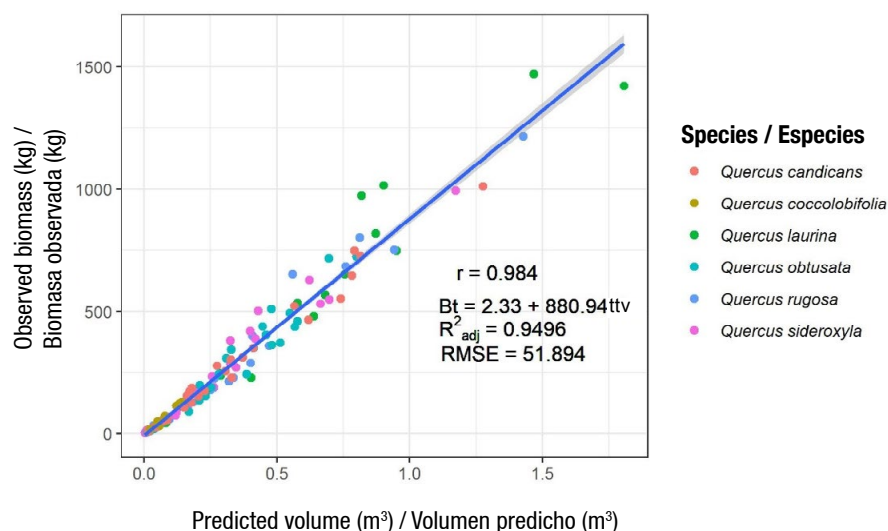


Figure 5. Correlation (r) between total biomass (Bt) and total tree volume (TTV) observed for oak species. The blue line represents the regression line.

Figura 5. Correlación (r) entre biomasa total (Bt) y volumen total árbol (*vta*) observados de las especies de encino. La línea azul es la línea de regresión.

between these variables. The linear regression model indicated that for each one-unit increase in volume (m^3), there is an increase of 880 kg in the aboveground biomass of individual tree. The observed biomass is similar to that reported in other studies, with wood densities ranging from 0.73 to 0.88 $g\cdot cm^{-3}$ (Ordóñez-Díaz et al., 2015; Tamarit-Urias et al., 2021).

A FEBM system of equations was fitted to estimate the biomass of structural components for TTV; their sum corresponds to the total aboveground tree biomass (Table 4). This system of equations is useful for estimating aboveground biomass when only volume information is available. The FEBM performance explained more than 95 % of the variability in total biomass, whereas for structural components it explained 91, 88 and 75 % in stem, branches, and foliage, respectively. The estimated parameters indicate that 51.4 % of the biomass is allocated to the stem, 46 % to the branches, and 2.6 % corresponds to the foliage biomass.

The biomass expansion factors in the FEBE systems of equations showed good goodness-of-fit performance, explaining 93 to 98 % of the variability in total biomass; the lowest performance was generally observed in the foliage models. The estimated parameters in the species-specific systems of equation indicated that stem biomass allocation ranges from 40 % (*Q. obtusata*) to 62.9 % (*Q. rugosa*) relative to total biomass (Table 5), which is similar to that reported by Vargas-Larreta et al. (2017b) for *Q. rugosa*, who indicated that stem biomass accounted for 59.5 %. In contrast, for branch biomass, the lowest value was 34.2 % in *Q. rugosa*, whereas the highest value was observed in *Q. obtusata* (57.7 %). Finally, for foliage biomass, *Q. candicans* had the lowest value at 1.7 % and *Q. sideroxylla* had the highest value at 3.2 % in relation to total biomass.

The FEBE accounted for more than 95 % of the variability in total biomass in five species; only in *Q. coccolobifolia* did they explain 93 % of the total biomass

Factores de expansión de biomasa

La Figura 5 evidenció la relación lineal entre el volumen y la biomasa aérea del arbolado con un coeficiente $r = 0.98$ que indica correlación alta entre dichas variables. El modelo de regresión lineal indicó que por cada aumento en unidad de volumen (m^3) existe un aumento de 880 kg en biomasa aérea de árboles individuales. La biomasa observada es similar a la señalada en otros trabajos con densidades de 0.73 a 0.88 $g\cdot cm^{-3}$ (Ordóñez-Díaz et al., 2015; Tamarit-Urias et al., 2021).

Un sistema de ecuaciones FEBM se ajustó para determinar la biomasa de los componentes estructurales a partir del *vta*; la suma de estos es la biomasa aérea total del árbol (Cuadro 4). Este sistema de ecuaciones es útil para estimar biomasa aérea cuando únicamente se dispone de información de volumen. El desempeño del FEBM explicó más del 95 % de la variabilidad de biomasa total, mientras que para los componentes estructurales fue 91, 88 y 75 % en fuste, ramas y follaje, respectivamente. Los parámetros estimados indican que 51.4 % de la biomasa se encuentra en el fuste, 46 % se localiza en las ramas y 2.6 % corresponde a la biomasa del follaje.

Los factores de expansión de biomasa en sistemas de ecuaciones de FEBE mostraron buen desempeño en su bondad de ajuste, ya que explicaron 93 al 98 % de la variabilidad de la biomasa total; el menor desempeño, generalmente, se observó en los modelos de follaje. Los parámetros estimados en los sistemas de ecuaciones específicos indican que la asignación de biomasa de fuste varía entre 40 % (*Q. obtusata*) y 62.9 % (*Q. rugosa*) con respecto a la biomasa total (Cuadro 5), lo cual es similar a lo reportado por Vargas-Larreta et al. (2017b) para *Q. rugosa*, quienes señalaron que la biomasa de fuste representó 59.5 %. Por otra parte, en la biomasa de ramas, el valor más bajo fue 34.2 % en *Q. rugosa*, mientras que los valores más altos los presentó *Q. obtusata* (57.7 %). Finalmente, en biomasa de follaje, *Q. candicans* tuvo el valor más bajo con 1.7 % y *Q. sideroxylla* tuvo el más alto con 3.2 % respecto a la biomasa total.

Table 4. Estimated parameters and goodness-of-fit statistics of the multispecies system of equation for estimating aboveground biomass of oaks.

Cuadro 4. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del sistema de ecuaciones multiespecie para determinar biomasa aérea de encinos.

System of equations	Sistema de ecuaciones	RMSE / REMC	R^2_{adj}
$B_s = 433.383 TTV$	$B_f = 433.383 vta$	43.9590	0.9163
$B_b = 387.5459 TTV$	$B_r = 387.5459 vta$	47.3128	0.8831
$B_f = 21.05082 TTV$	$B_h = 21.05082 vta$	3.9717	0.7515
$B_T = \sum B_i$	$B_T = \sum B_i$	53.5566	0.9660

B_s, *B_b*, *B_f* and *B_T*: biomass (kg) of stem, branches, foliage, and total, respectively; TTV: total tree volume (m^3); RMSE: root mean square error; R^2_{adj} : adjusted coefficient of determination.

B_f, *B_r*, *B_h* y *B_T*: biomasa (kg) de fuste, ramas, hojas y total, respectivamente; *vta*: volumen total del árbol (m^3); REMC: raíz del cuadrado medio del error; R^2_{adj} : coeficiente de determinación ajustado.

Table 5. Estimated parameters and goodness-of-fit statistics of species-specific biomass expansion factor (FEBE) systems of equations for *Quercus* species.**Cuadro 5. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistemas de ecuaciones para factores de expansión de biomasa específicos (FEBE) de las especies de *Quercus*.**

Systems of equations	Sistema de ecuaciones	RMSE/ REMC	R ² _{adj}	Systems of equations	Sistema de ecuaciones	RMSE/ REMC	R ² _{adj}
<i>Q. coccolobifolia</i>				<i>Q. candicans</i>			
$B_s = 497.2487 TTV$	$B_f = 497.2487 vta$	5.3319	0.9323	$B_s = 436.6264 TTV$	$B_f = 436.6264 vta$	30.8969	0.9498
$B_b = 406.4083 TTV$	$B_r = 406.4083 vta$	8.4051	0.8198	$B_b = 384.1045 TTV$	$B_r = 384.1045 vta$	30.0317	0.9430
$B_f = 0.444016 + 15.6209 TTV$	$B_h = 0.444016 + 15.6209 vta$	0.7953	0.1230	$B_f = 14.29054 TTV$	$B_h = 14.29054 vta$	3.5479	0.2512
$B_T = \sum B_i$	$B_T = \sum B_i$	10.1128	0.9342	$B_T = \sum B_i$	$B_T = \sum B_i$	33.5315	0.9836
<i>Q. sideroxyla</i>				<i>Q. laurina</i>			
$B_s = 393.269 TTV$	$B_f = 393.269 vta$	17.3858	0.9705	$B_s = 485.6 TTV$	$B_f = 485.6 vta$	65.2126	0.9261
$B_b = 427.5242 TTV$	$B_r = 427.5242 vta$	43.3336	0.8937	$B_b = 324.7282 TTV$	$B_r = 324.7282 vta$	51.8597	0.9221
$B_f = 27.96861 TTV$	$B_h = 27.96861 vta$	3.7559	0.7844	$B_f = 22.01321 TTV$	$B_h = 22.01321 vta$	3.7334	0.8975
$B_T = \sum B_i$	$B_T = \sum B_i$	42.3043	0.9681	$B_T = \sum B_i$	$B_T = \sum B_i$	94.5572	0.9520
<i>Q. obtusata</i>				<i>Q. rugosa</i>			
$B_s = 341.4853 TTV$	$B_f = 341.4853 vta$	32.2857	0.8501	$B_f = 515.2186 TTV$	$B_f = 515.2186 vta$	27.0249	0.9427
$B_b = 491.6089 TTV$	$B_r = 491.6089 vta$	41.9329	0.8882	$B_r = 280.8266 TTV$	$B_r = 280.8266 vta$	60.1164	0.7119
$B_f = 18.09704 TTV$	$B_h = 18.09704 vta$	2.3150	0.7635	$B_f = 22.99243 TTV$	$B_h = 22.99243 vta$	3.7536	0.9526
$B_T = \sum B_i$	$B_T = \sum B_i$	44.4904	0.9525	$B_T = \sum B_i$	$B_T = \sum B_i$	56.5834	0.9678

B_s , B_b , B_f and B_t : biomass (kg) of stem, branches, foliage, and total, respectively; TTV: total tree volume (m³); RMSE: root mean square error; R²_{adj}: adjusted coefficient of determination.

B_f , B_r , B_h y B_t : biomasa (kg) de fuste, ramas, hojas y total, respectivamente; vta : volumen total del árbol (m³); REMC: raíz del cuadrado medio del error; R²_{adj}: coeficiente de determinación ajustado.

variability. Likewise, the slope (y) and the correlation coefficient (r) were close to 1, indicating a strong agreement between predicted and observed values and confirming the high accuracy of the FEBE for biomass estimation (Figure 6).

The expansion factors shown in Figure 6 were evaluated and compared using 10-fold cross validation. The proposed FEBM and FEBE exhibited MAPE values below 19 %, while the models proposed by Cortés-Sánchez et al. (2019) showed the lowest MAPE values, likely because they were developed and fitted using diameter at breast height and total height as predictor variables. On the other hand, the difference in MAPE between the biomass expansion factors proposed in this study and the models of Cortés-Sánchez et al. (2019) was less than 4 %, while the mean absolute errors were marginally lower than those reported for the models of Cortés-Sánchez et al. (2019) (Figure 7).

Conclusions

The species-specific and multispecies volume equation systems proved to be highly reliable, explaining more than 90 % of the variability in total tree volume (TTV) for six *Quercus* species in the Sierra of Santa Rosa, Guanajuato. The species-specific (FEBE) and multispecies (FEBM) biomass expansion factor systems enabled accurate estimation (93.4 %-98.3 %) of total aboveground

Los FEBE explicaron más de 95 % de variabilidad de la biomasa total en cinco especies; únicamente, en *Q. coccolobifolia* explicaron 93 % de variabilidad de la biomasa total. De forma similar, los valores de la pendiente (y) y el coeficiente de correlación (r) fueron cercanos a 1, lo cual indica una fuerte relación entre valores predichos y observados, y que los FEBE son precisos para la estimación de biomasa (Figura 6).

Los factores de expansión representados en la Figura 6 se evaluaron y compararon mediante validación cruzada en “10-fold”. Los FEBM y FEBE propuestos presentaron valores de MAPE inferiores a 19 %, mientras que los modelos propuestos por Cortés-Sánchez et al. (2019) presentaron los MAPE más bajos, debido a que los modelos fueron creados y ajustados con variables de diámetro normal y altura total. Por otro lado, la diferencia entre factores de expansión de biomasa propuestos en este estudio y los modelos de Cortés-Sánchez et al. (2019) fue menor del 4 % del MAPE, mientras que los errores medios absolutos fueron marginalmente menores que los modelos de Cortés-Sánchez et al. (2019) (Figura 7).

Conclusiones

Los sistemas de ecuaciones de volumen específicos por especie y multiespecie demostraron ser altamente confiables, ya que explicaron más de 90 % de la

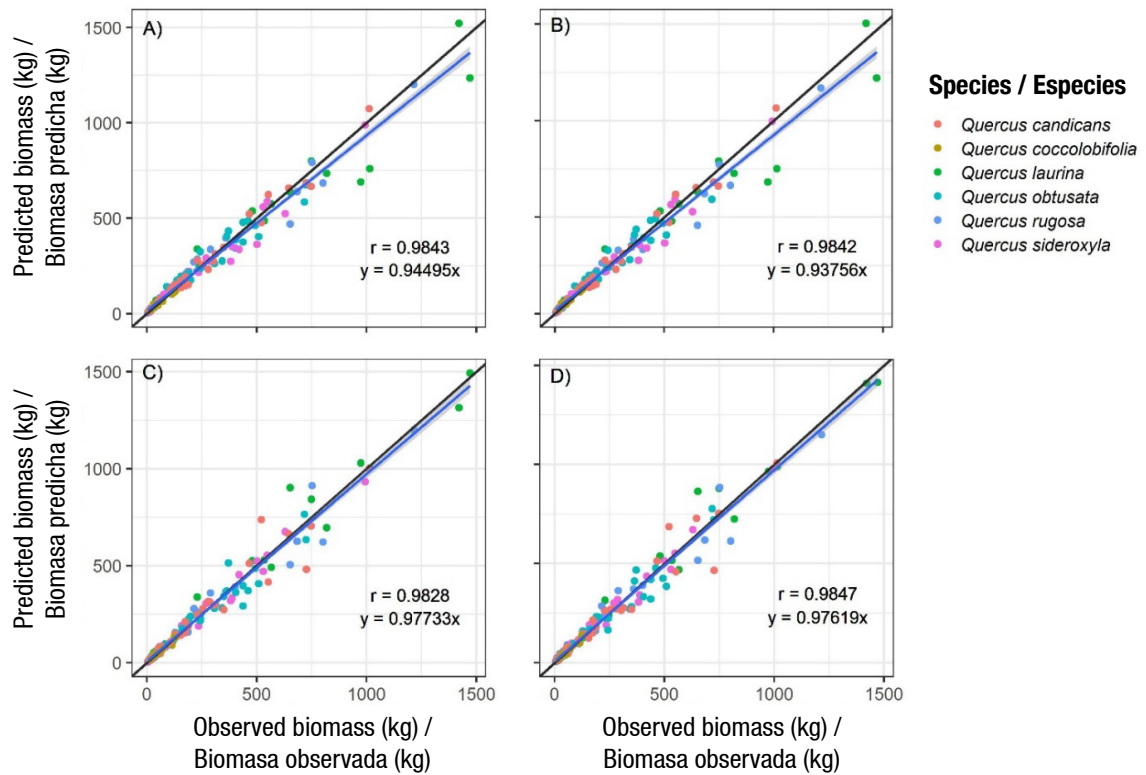


Figure 6. Relationship between (A) observed total biomass and multispecies biomass expansion factors (FEBM) and (B) observed total biomass and species-specific biomass expansion factors (FEBE) in oak species. C and D correspond to the multispecies and species-specific biomass equation, respectively, proposed by Cortés-Sánchez et al. (2019). The blue line represents the regression line.

Figura 6. Relación entre (A) biomasa total observada y factores de expansión de biomasa multiespecie (FEBM) y (B) biomasa total observada y factores de expansión de biomasa específicos (FEBE) en especies de encino. C y D son ecuaciones de biomasa multiespecie y específicos, respectivamente, propuestos por Cortés-Sánchez et al. (2019). La línea azul representa la línea de regresión.

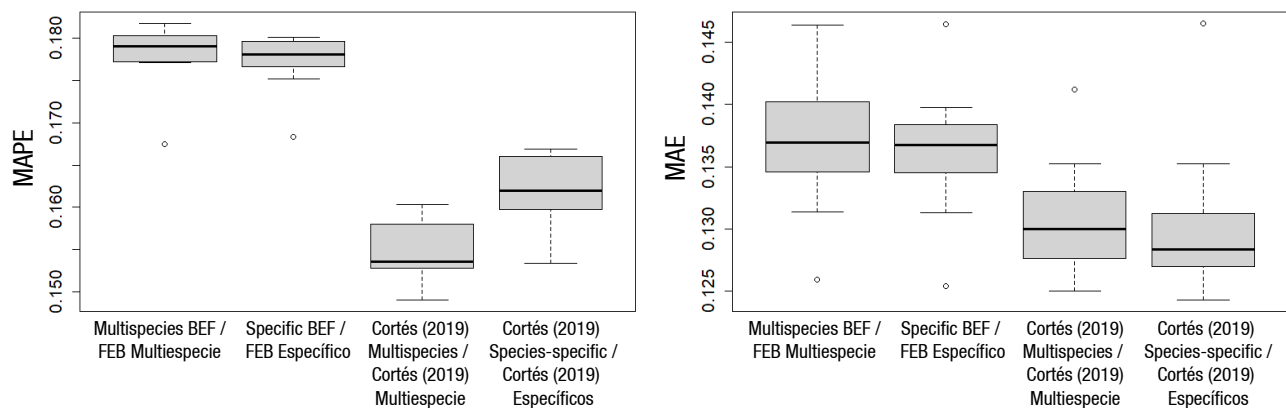


Figure 7. Mean absolute percentage error (MAPE) and mean absolute error (MAE) of the volumes estimates derived from species-specific and multispecies biomass expansion factors (BEF) in *Quercus*, and from the models proposed by Cortés-Sánchez et al. (2019).

Figura 7. Error absoluto promedio porcentual (MAPE) y el error promedio absoluto (MAE) de las estimaciones de volumen de los factores de expansión de biomasa (FEB) específicos y multiespecie en *Quercus*, y de los modelos propuestos por Cortés-Sánchez et al. (2019).

biomass from volume. The FEBM indicated that, on average, 51.4 % of biomass is allocated to the stem, 46 % to branches, and 2.6 % to foliage. These estimates reflect the actual biomass distribution in oak stands of the region and provide an effective tool for quantifying stored carbon. This study provides updated and reliable biometric tools to support sustainable forest management in central Mexico. The additive systems allowed precise estimation of merchantable volume and aboveground biomass, thereby facilitating timber harvest planning.

Acknowledgments

This research was funded by the United States Agency for International Development Sustainable Landscapes Program, through the USDA Forest Service Office of International Programs, and the Northern Research Station, under the project entitled “Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoramiento del manejo forestal en México”.

Conflict of interest declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

End of English version

References / Referencias

- Arriaga, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/regiones-terrestres-prioritarias-de-mexico>
- Bailey, R. L. (1995). Upper stem volumes from stem analysis data: an overlapping bolts method. *Canadian Journal of Forest Research*, 25(1), 170-173. <https://doi.org/10.1139/x95-020>
- Boudewyn, P., Song, X., Magnussen, S., & Gillis, M. (2007). *Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. <https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/entities/publication/29ed30f7-ba82-4750-8d5c-e043b4cab898>
- Cabrera-Andrade, A., Cabrear-Landeros, J. M., & Cabrera-Landeros, I. (2014). *Refrendo de la autorización de aprovechamiento de recursos forestales maderables “Industrial Santa Fé S. de R. L.”*. Consultores en Manejo Forestal Sustentable S. C.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). *Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF). Principales indicadores forestales (Ciclo 2015-2020)*. Retrieved October 15, 2025 from <https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020/>

variabilidad del volumen total árbol (*vta*) de seis especies de *Quercus* en la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. Los sistemas de factores de expansión de biomasa por especie (FEBE) y multiespecie (FEBM) permitieron la estimación precisa (entre 93.4 % y 98.3 %) de la biomasa aérea total a partir del volumen. El FEBM mostró que, en promedio, 51.4 % de la biomasa se localiza en el fuste, 46 % en ramas y 2.6 % en follaje. Tales estimaciones reflejan la distribución real de biomasa en los encinos de la región y proporcionan una herramienta eficaz para cuantificar el carbono almacenado. Este trabajo proporciona herramientas biométricas actualizadas y confiables para la gestión forestal sostenible en el centro de México. Los sistemas aditivos permitieron la estimación precisa del volumen comercial y biomasa aérea, facilitando la planificación del aprovechamiento maderable.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue financiado por el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos de América, a través de la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura y la Northern Research Station, a través del proyecto “Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoramiento del manejo forestal en México”.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

Fin de la versión en español

- Cortés-Sánchez, B. G., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M., & Ramírez-Maldonado, H. (2019). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y Bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521799>
- Cruz-Cobos, F., Quiñonez-Barraza, G., Hernández-Merino, V., Corral-Rivas, S., & Nava-Nava, A. (2023). Sistemas compatibles de ahusamiento y volumen comercial para dos especies de *Pinus* en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(77), 76-102. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i77.1383>
- Di Cosmo, L., Gasparini, P., & Tabacchi, G. (2016). A national-scale, stand-level model to predict total above-ground tree biomass from growing stock volume. *Forest Ecology and Management*, 361, 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.008>
- Dutcă, I., McRoberts, R. E., Næsset, E., & Blujdea, V. N. B. (2022). Accommodating heteroscedasticity in allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*, 505, 119865. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119865>

- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 119-127. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.119>
- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., & Vargas-Larreta, B. (2020). Forest volume estimation techniques with special emphasis on the tropics. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(2), 291-306. <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.07.061>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1000000. Unidades climáticas*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- Jagodziński, A. M., Zasada, M., Bronisz, K., Bronisz, A., & Bijak, S. (2017). Biomass conversion and expansion factors for a chronosequence of young naturally regenerated silver birch (*Betula pendula* Roth) stands growing on post-agricultural sites. *Forest Ecology and Management*, 384, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.051>
- Martínez-Cruz, J., & Téllez-Valdés, O. (2004). Listado florístico de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Botanical Sciences*, 74, 31-49. <https://doi.org/10.17129/botsci.1685>
- Martínez-López, J., & Acosta-Ramos, A. (2014). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para *Quercus laurina*, en Ixtlán, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 20, 59-70. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100006&nrm=iso
- Martínez Angel, L., De los Santos Posadas, H. M., Fierros González, A. M., Fierros Mateo, R., Pérez Miranda, R., Hernández Ramos, A., & Hernández Ramos, J. (2019). Factores de expansión y sistema de partición de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10, 107-132. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322019000100107&nrm=iso
- Monárrez-González, J. C., Márquez-Linares, M. A., López-Hernández, J. A., Pérez-Verdín, G., Quiñonez-Barraza, G., & García-Cuevas, X. (2024). Ecuaciones de volumen fustal-total y ahusamiento para especies maderables del ecosistema templado en Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(84), 4-28. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1440>
- Ordóñez-Díaz, J. A. B., Galicia-Naranjo, A., Venegas-Mancera, N. J., Hernández-Tejeda, T., Ordóñez-Díaz, M. d. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21(0). <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- Ordóñez-Prado, C., Tamarit-Urias, J. C., Nava-Nava, A., & Rodríguez-Acosta, M. (2024). Additive equations system to estimate aboveground biomass by structural component and total of three giant Bamboo species in Mexico. *CERNE*, 30, e-103267. <https://doi.org/10.1590/01047760202430013267>
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*. Food and Agricultural Organization of the United Nations and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. <https://www.fao.org/4/i3058e/i3058e.pdf>
- Pilli, R., Blujdea, V. N. B., Rougieux, P., Grassi, G., & Mubareka, S. B. (2024). Volume, increment, and aboveground biomass data series and biomass conversion and expansion factors for the main forest types of EU Member States. *Annals of Forest Science*, 81(1), Article 35. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01256-5>
- Puc-Kauil, R., Angeles-Perez, G., Valdez-Lazalde, J., Reyes-Hernandez, V., Dupuy-Rada, J., Schneider, L.,...García-Cuevas, X. (2020). Allometric equations to estimate above-ground biomass of small-diameter mixed tree species in secondary tropical forests. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 13(3), 165-174. <https://doi.org/10.3832/ifor3167-013>
- Quiñonez-Barraza, G., Zhao, D., de los Santos-Posadas, H. M., Santiago-García, W., Tamarit-Urias, J. C., & Nájera-Luna, J. A. (2019). Compatible taper, volume, green weight, biomass and carbon concentrations system for *Quercus sideroxyla* Bonpl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XXV(1), 49-69. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.050>
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendi, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835-864. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Rosaliano-Evaristo, R., Ávila-Akerberg, V., Franco-Maass, S., Valencia-A, S., & López Mathamba, L. A. (2022). Estructura y diversidad arbórea en bosques de encino del centro de México. *Madera y Bosques*, 28(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822449>
- Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). (1976). *Inventario forestal del estado de Guanajuato*. México: Subsecretaría Forestal y de la Fauna - Dirección General del Inventario Nacional Forestal
- SAS Institute. (2011). *SAS/STAT 9.3 User's Guide: Survey data analysis*. SAS institute.
- Schepaschenko, D., Moltchanova, E., Shvidenko, A., Blyshchyk, V., Dmitriev, E., Martynenko, O., See, L., & Kraxner, F. (2018). Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. *Forests*, 9(6), 312. <https://doi.org/10.3390/f9060312>
- Schumacher, F. X., & Hall, F. D. S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 719-734. <https://handle.nal.usda.gov/10113/IND43968352>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024). *Estadísticas estatales de producción forestal maderable y no maderable*. Retrieved December, 2024 from <https://snif.cnf.gob.mx/estadisticas-por-estados-de-produccion-forestal-maderable-y-no-maderable>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). *Anuario estadístico de la producción forestal 2018* (1.ª ed.). Author. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/anuarios-estadisticos-forestales>
- Sileshi, G. W. (2014). A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329, 237-254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.026>
- Simental-Cano, B., López-Sánchez, C. A., Wehenkel, C., Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J. G., & Corral-Rivas, J. J. (2017). Modelos de volumen específicos y regionales para 12 especies forestales en el estado de Durango, México. *Revista Chapingo*

- Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(2), 155-171. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.01.004>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2020). *Normales climatológicas*. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales5110/NORMAL11070.TXT>
- Soriano-Luna, M. d. I. Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtupán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1156>
- Tamarit-Urias, J. C., Aguilar-Sánchez, P., Flores-Velazquez, R., & Fuentes López, M. E. (2021). Aportes de investigación del INIFAP en tecnología de la madera y sus procesos de industrialización. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(Especial-1). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.1086>
- Tamarit-Urias, J. C., Hernández-Ramos, A., Ordóñez-Prado, C., Hernández-Ramos, J., & Buendía-Rodríguez, E. (2025). Sistemas de ecuaciones aditivas para inventarios del peso verde de la biomasa aérea de *Brahea dulcis* (Kunth) Mart. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16(91), 46-69. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i91.1548>
- Tamarit-Urias, J. C., Rojas-Díaz, E., Quiñonez-Barraz, G., Ordoñez-Prado, C., & Monárrez-González, J. C. (2017). Sistema de cubicación para árboles individuales de *Quercus* sp. en bosques bajo manejo de Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8, 69-88. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i40.37>
- Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., Aguirre-Calderón, C. G., Zamudio-Sánchez, F. J., López-Martínez, J. O., Corral-Rivas, J. J., Treviño-Garza, E.J., De los Santos-Posadas, H. M., Martínez-Salvador, M. (2018). *Manual del Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor): Herramientas para el manejo de los bosques templados y tropicales de México*. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD006165.pdf>
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., Santos-Posadas, H. M. D. I., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J. Martínez-Salvador, M. ...Aguirre-Calderón, C. G. (2017a). SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017b). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(8), 269. <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- Zhang, X., Cao, Q., Xiang, C., Duan, A., & Zhang, J. (2017). Predicting total and component biomass of Chinese fir using a forecast combination method. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10(4), 687-691. <https://doi.org/10.3832/ifor2243-010>