



ISSN 1405-0471

Madera y Bosques

Vol. 24, Núm. Especial ■ Invierno 2018 ■ Xalapa, Ver.



Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL CONACYT



INECOL
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, A.C.



Contenido

Editorial

[Editorial](#)

Alma S. Velázquez Rodríguez, Oscar Briones, Ben de Jong

Sección 1

[Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas](#)

Oscar Briones, Alberto Búrquez, Angelina Martínez-Yrizar, Numa Pavón, Yareni Perroni

[Almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México](#)

María Elizabeth Hernández, Patricia Moreno-Casasola Barceló

[El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México](#)

Marcos Casiano-Domínguez, Fernando Paz-Pellat, Marlén Rojo-Martínez, Sara Covaleda-Ocon, Deb Raj Aryal

[Camas de combustibles forestales y carbono en México](#)

J. Germán Flores-Garnica, Julio C. Wong-González, Fernando Paz-Pellat

[Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México](#)

Juan C. Montoya Jiménez, Jorge Méndez González, Librado Sosa Díaz, Cecilia G. Ruíz González, Alejandro Zermeño González, Juan A. Nájera Luna, Mario G. Manzano Camarillo, Alma S. Velázquez Rodríguez

Sección 2

[Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera](#)

Neydeli Ayala-Mendivil, Georgina Sandoval

Sección 3

[Escenarios de mitigación de emisiones para el sector rural del Estado de Chiapas utilizando modelos de estados y transiciones](#)

Sara Covaleda, Fernando Paz-Pellat, Alejandro Ranero

[Experiencias de gobernanza multinivel en México: innovación para la reducción de emisiones de carbono de los ecosistemas terrestres](#)

Antoine Libert-Amico, Tim Trench, Abelardo Rodríguez, María del Pilar Martínez-Morales

[Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación, asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales](#)

Lorena Soto-Pinto, Guillermo Jiménez-Ferrer

[El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México](#)

Alejandro Ranero, Sara Covaleda

[Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas](#)

Antoine Libert-Amico, Fernando Paz-Pellat



Dinámica del Carbono en la Biomasa de los Ecosistemas Terrestres

La revista *Madera y Bosques* y el Programa Mexicano del Carbono, presentan el primer número sobre la dinámica del carbono en la biomasa de los ecosistemas terrestres de México. El objetivo de esta colaboración es ofrecer a los lectores una serie de trabajos que abordan distintos aspectos de la biomasa -viva y muerta- en los ecosistemas terrestres y su papel en el ciclo del carbono, tanto desde un punto de vista ambiental-climático como social. El primer número está conformado por tres secciones: i) almacenes y flujos de carbono en la biomasa de los ecosistemas terrestres mexicanos; ii) análisis de estrategias biotecnológicas en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la biomasa y iii) análisis económico y socio-ambiental de la dinámica del carbono de la biomasa para el diseño de políticas públicas.

En la primera sección se incluyen cinco artículos que muestran un diagnóstico sobre el carbono en la biomasa en algunos de los principales ecosistemas terrestres, con un análisis de los factores que controlan su dinámica. El primero de ellos se enfoca en la biomasa aérea y subterránea de las zonas áridas, en las que el contenido de carbono supera al de cualquiera de los desiertos del mundo y, en algunos casos, alcanza valores cercanos a los característicos del bosque tropical caducifolio; se analiza la producción de hojarasca, sus tasas de descomposición y la respiración microbiana, además se destaca la influencia de la disponibilidad de agua en la regulación de la productividad primaria. El segundo trabajo es un meta análisis sobre los almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce, ecosistemas de notoria fragilidad, a través del estudio de dos de los principales almacenes, biomasa aérea y radical; se pone de manifiesto la escasa información respecto a los flujos de carbono, pero destaca el significativo incremento en las emisiones de bióxido de carbono y metano, cuando los humedales son transformados a potreros. En el tercero se presenta la información disponible respecto al contenido de carbono en biomasa y su variación temporal, en diferentes ecosistemas terrestres, con un enfoque de cronosecuencias para 21 tipos de vegetación, de los 50 reconocidos para México, lo que constituye una referencia sólida para establecer los compromisos en relación a mercados de carbono y escenarios en que se conseguirían metas de mitigación y adaptación al cambio climático. En el cuarto artículo se analiza el contenido de carbono y su dinámica en las camas de combustibles forestales, a través de su cuantificación en mantillo y material leñoso caído, ya que representa un factor importante en el calentamiento global. El quinto se centra en el ajuste de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea en *Pinus halepensis* en el estado de Coahuila, Méx., como paso esencial para minimizar la incertidumbre en la evaluación de carbono en especies forestales y poder analizar su influencia en la mitigación del cambio climático.

La segunda sección está constituida por un artículo que destaca la importancia del desarrollo biotecnológico en la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero a partir del manejo de la biomasa. Se describen los procesos de obtención de energía a partir de residuos de biomasa forestal, así como su potencial en la producción de diferentes tipos de bioenergía, señalando los desafíos y problemas que aún faltan por resolverse, para su uso eficiente a nivel nacional.

La tercera sección presenta cinco trabajos que abarcan la parte económica y social del manejo de la biomasa en la disminución de gases de efecto invernadero y la importancia de incluir información con un sólido sustento científico como base de las políticas públicas. En el primero se generaron curvas de costos de abatimiento y escenarios de mitigación para el estado de Chiapas, Méx., utilizando modelos de estados y transiciones para ocho regiones, con la finalidad de conocer los impactos asociados a la transición entre un tipo de vegetación inicial y otro final, en términos de carbono y factores socioeconómicos; se consideraron costos de oportunidad positivos y negativos, subsidio, crédito y

tasa de interés. El segundo aporta elementos de discusión alrededor del tema de gobernanza, a través de los resultados de un estudio sobre gobernanza multinivel y gestión del carbono a nivel de paisaje, realizado en México en el marco de las acciones tempranas para reducir emisiones por deforestación y degradación forestal (REDD+); se abarca la relación entre gobernanza y gobernabilidad al mostrar las innovaciones y obstáculos que enfrentan las iniciativas de coordinación entre diferentes niveles de gobierno y actores de la sociedad civil. El tercero, presenta una detallada visión de las contradicciones socio ambientales que se presentan en el proceso de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas agroforestales, ya que desde la perspectiva de la producción de alimentos y madera, así como desde las funciones ecosistémicas, los sistemas agroforestales manejados en pequeña escala son estratégicos, pero presentan limitaciones severas desde la perspectiva de los productores, imposibles de omitirse para el establecimiento de beneficios locales y globales. El cuarto presenta una síntesis de los mecanismos de financiamiento empleados para la mitigación de emisiones en el sector forestal a nivel internacional y las experiencias desarrolladas en México; se analizan las oportunidades de mitigación del sector Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura, para cumplir con los compromisos de México ante la comunidad internacional. Para cerrar este número, el quinto artículo presenta un estudio en el que se analizan los planes y programas de respuesta al cambio climático para el sector cafetalero en el contexto de la epidemia de roya del cafeto en Chiapas, Méx.; se discuten las sinergias entre mitigación y adaptación al cambio climático por medio del análisis de la campaña a favor de los almacenes de carbono y la biodiversidad en cafetales bajo sombra, con énfasis en la deforestación, degradación forestal y pérdida de servicios ecosistémicos que ha generado la actual crisis del café bajo sombra, con propuestas de atención que benefician tanto a ecosistemas como a comunidades cafetaleras.

Las conclusiones generales que surgen de estos trabajos son: i) existen numerosos vacíos y sesgos en las investigaciones sobre carbono en la biomasa de los ecosistemas terrestres de México, por lo que es importante tomar en cuenta esas áreas de oportunidad y fomentar el desarrollo de investigación enfocada a la satisfacción de las carencias; ii) el aprovechamiento de la biomasa vegetal constituye una importante fuente de reducción de emisiones, proceso en el que los desarrollos biotecnológicos desempeñan un papel fundamental y iii) la biomasa como almacén de carbono y sus flujos, constituyen una parte fundamental en la reducción de emisiones a la atmósfera y la mitigación del cambio climático, pero no pueden considerarse al margen de las componentes económica y social que son las que, finalmente, determinan el éxito o fracaso de las iniciativas locales, regionales o nacionales.

La perspectiva multidimensional que se presenta en esta síntesis del estado del conocimiento del almacén de la biomasa y del ciclo de carbono y sus interacciones en los ecosistemas terrestres de México, permite aproximar el desarrollo de políticas públicas fundamentadas en conocimiento científico desde una perspectiva de obtener balances entre la visión global (cambio climático) y la local (productores y comunidades), requiriendo construir puentes con enfoques de “abajo hacia arriba” y de “arriba hacia abajo”, que converjan en mecanismos multinivel que sean viables en el contexto de país y sus diferencias locales y regionales. La tarea no es fácil y requiere colaboraciones multidisciplinarias y multiinstitucionales para reducir la brecha entre el conocimiento científico, las políticas públicas y la realidad social y económica de los productores y comunidades de las diferentes regiones del país.

Alma S. Velázquez Rodríguez, Oscar Briones y Ben de Jong
Editores



forestales afectados por incendios. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(3), 37-52.

Manuscrito recibido el 22 de marzo de 2017
Aceptado el 27 de enero de 2018
Publicado el 26 de noviembre de 2018

Este documento se debe citar como:

Flores-Garnica, J. G., Wong-González, J. C., & Paz-Pellat, F. (2018). Camas de combustibles forestales y carbono en México. *Madera y Bosques*, 24(Núm. esp.), e2401893. doi:10.21829/myb.2018.2401893



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.



Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México

Aboveground biomass and volume equations for *Pinus halepensis* Mill., in Coahuila, Mexico

Juan C. Montoya Jiménez¹, Jorge Méndez González^{1*}, Librado Sosa Díaz¹, Cecilia G. Ruíz González¹, Alejandro Zermeño González², Juan A. Nájera Luna³, Mario G. Manzano Camarillo⁴ y Alma S. Velázquez Rodríguez⁵

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Buenavista Saltillo, Coahuila, México.

² Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Riego y Drenaje. Buenavista Saltillo, Coahuila, México.

³ Instituto Tecnológico de El Salto. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Durango, Durango, México.

⁴ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Centro de Calidad Ambiental. Monterrey, Nuevo León, México.

⁵ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias. El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México. almaver@uaemex.mx

* Autor de correspondencia: jmendezg@hotmail.com.

RESUMEN

Realizar estudios para medir la biomasa en ecosistemas terrestres es fundamental para evaluar los almacenes de carbono y cómo las especies forestales contribuyen a la mitigación del cambio climático. El objetivo de este estudio fue ajustar ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea y volumen de *Pinus halepensis* Mill. en la sierra de Zapalinamé, Coahuila. Se partió de la hipótesis de que las variables diámetro basal y altura predicen adecuadamente la biomasa aérea y el volumen de *P. halepensis*. Se utilizaron 40 árboles, con diámetro basal que varió de 25 cm a 75 cm. La biomasa de fuste y ramas (64%) fue en promedio el doble que la de hojas y ramillas (36%) y su proporción aumentó con respecto a la altura total del árbol, de acuerdo con la ecuación: $y = 53.4 + 1.2x$. Los mejores ajustes fueron en volumen ($R^2 = 0.82$) y biomasa total ($R^2 = 0.77$) con ecuaciones alométricas de forma lineal logarítmica, con diámetro y altura como variables independientes ($\ln y = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db^2H)$). La biomasa aérea de *P. halepensis* fue 2.5 veces más pequeña que la de otras especies de coníferas, debido posiblemente a que los árboles de esta especie se ramifican casi desde la base del árbol. En promedio, 85% del árbol presentó ramas de entre 5 cm y 10 cm de diámetro.

PALABRAS CLAVE: alometría, método destructivo, plantación, Zapalinamé-Saltillo.

ABSTRACT

Conducting studies to measure biomass in terrestrial ecosystems is essential to assess carbon stores and how forest species contribute to the mitigation of climate change. The objective of this study was to adjust allometric equations to estimate aerial biomass and volume of *Pinus halepensis* Mill. in the Sierra de Zapalinamé, Coahuila. It was assumed that the variables basal diameter and height adequately predict aerial biomass and volume of *P. halepensis*. 40 trees were used, with basal diameter that varied from 25 cm to 75 cm. The biomass of stem and branches (64%) was, on average, double that of leaves and twigs (36%) and its proportion increased with respect to the total height of the tree, according to the equation: $y = 53.4 + 1.2x$. The best fits were in volume ($R^2 = 0.82$) and total biomass ($R^2 = 0.77$) with allometric equations of logarithmic linear form, with diameter and height as independent variables ($\ln y = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db^2H)$). Aerial biomass of *P. halepensis* was 2.5 times smaller than that of other coniferous species, possibly due to the fact that the trees of this species branched almost from the base of the tree, on average 85% of the tree presented branches between 5 cm and 10 cm in diameter.

KEYWORDS: allometry, destructive method, plantation, Zapalinamé-Saltillo.

INTRODUCCIÓN

El origen de la aceleración del cambio climático se ha atribuido a las actividades antropogénicas, especialmente al incremento en el uso combustibles fósiles (*Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC], 2013); la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) aumenta en promedio 1 Gt año⁻¹ y las emisiones de CO₂eq alcanzan casi 50 Gt año⁻¹, esto ha permitido un aumento de temperatura de 0.05 °C en los últimos 15 años (IPCC, 2014). México se ubica entre los primeros diez países con emisiones altas de CO₂, con 2% del total (Martínez y Fernández, 2004). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2010) ha demostrado que los bosques, a través del procesos de la fotosíntesis, son los mayores reservorios de carbono del mundo almacenando en su biomasa 289 Gt y varios autores (Acosta, Vargas, Velásquez y Etchevers, 2002; Avendaño, Acosta, Carrillo y Etchevers, 2009; Aguirre y Jiménez, 2011) demuestran que los ecosistemas forestales son una alternativa biótica para almacenar carbono y de esa manera reducir la cantidad de CO₂ atmosférico a través del proceso de la fotosíntesis, siendo esta una de las mejores formas de mitigar los efectos del cambio climático.

La mejor forma para estimar la biomasa vegetal es a través del método directo (Méndez, Luckie, Capó y Nájera, 2011), del cual se derivan ecuaciones alométricas (Chave *et al.*, 2005; Návar, 2009). Para tener mejores estimaciones de biomasa es preferible probar diferentes ecuaciones (Fonseca, Alice y Rey, 2009), lo más común es usar combinaciones de variables dendrométricas fáciles de medir como diámetro normal y altura (Chave *et al.*, 2005; Méndez *et al.*, 2011); aunque otros autores (Návar, González, Graciano, Dale y Parresol, 2004; De los Ríos y Návar, 2010; Douterlungne, Herrera, Ferguson, Siddique y Soto, 2013) han demostrado que el diámetro basal del árbol es un buen estimador de biomasa y puede ser calculado directamente a partir del diámetro normal.

La importancia de contar con ecuaciones alométricas de biomasa es que a través de ellas es posible estimar de forma indirecta la cantidad de fijación de carbono en árboles individuales y extrapolar a cierta área y, con ello,

evaluar la contribución de las especies en el amortiguamiento de los GEI, así como aportar información para fortalecer la política ambiental y gestión silvícola. *Pinus halepensis* Mill. es una especie endémica del Mediterráneo Occidental, se distribuye en regiones semiáridas y sub-húmedas, en altitudes que van de 0 m snm a 2600 m snm y con precipitación anual de 350 mm a 700 mm (Fady, Semerci y Vendramin, 2003). Por la característica que presenta de tener un rápido crecimiento, en 1929 fue introducida a México con motivos de restauración de ecosistemas (Cedeño y Pérez, 2007) y actualmente su uso se ha expandido en el centro y noreste de México. Por la importancia y gran uso de esta especie en el norte de México y, por otra parte, la escasez de ecuaciones de volumen y biomasa en esta especie, es necesario contar con ecuaciones alométricas para cuantificar almacenes de carbono.

OBJETIVOS

Seleccionar la ecuación alométrica que mejor estime el volumen y la biomasa aérea en árboles individuales de *P. halepensis* en la sierra de Zapalinamé, Coahuila México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Esta investigación se realizó en una plantación de *P. halepensis* de aproximadamente 40 años de edad, la cual fue establecida en varias etapas desde 1960 al 1978 en los terrenos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, dentro de la sierra de Zapalinamé, al sureste de Saltillo Coahuila, México (25°20'41.75"N y 101°01'30.63"O; Datum WGS84). La plantación se estableció en hileras, siguiendo curvas de nivel con una distancia de aproximadamente 6 m entre árboles. La densidad fue 296 árboles ha⁻¹ y es una de las plantaciones más grandes del país, con más de 1000 ha. El área se ubica a una altitud de 1800 m, posee una pendiente de 10%, exposición oeste y existen dos tipos de suelo (Litosol y Xerosol cálcico). La precipitación varía desde 250 mm hasta 400 mm, el clima es árido semicálido (Bsohw) y la temperatura oscila entre 18 °C y 22 °C (García, 1998).



Cuantificación de biomasa y volumen

El estudio se realizó con información de 40 árboles de *P. halepensis* que fueron seleccionados durante la ampliación de la carretera Saltillo-Zacatecas, en 2015. Antes de ser derribados, los árboles fueron medidos en diámetro a la base (*Db*), diámetro normal (*Dn*) diámetro de copa (*Dc*) y altura total (*H*). Después del derribo, cada árbol se troceó a longitud de no más de 150 cm, para separarlo en dos componentes: 1) hojas y ramillas (ramillas < 5 cm diámetro) y 2) fuste y ramas (ramas > 5 cm diámetro).

A cada componente se le determinó en campo el peso fresco total con báscula TecnoCour (México), con capacidad de 980.7 N (100 kg) y 4.9 N (0.5 kg) de resolución. El peso de muestras pequeñas (< 98.1 N; 10 kg) se obtuvo con una báscula Nuevo León (México) con capacidad de 980.7 N (100 kg) y 9.8 N (0.1 kg) de precisión. De cada árbol se obtuvieron cinco muestras de entre 19.6 N (2 kg; para hojas y ramillas) y 68.6 N (7 kg; para fuste y ramas), las cuales fueron pesadas en fresco para determinar el contenido de humedad. Las muestras completas se secaron en estufa Blue M. modelo 246F (U.S.A.), a temperatura de 70 °C hasta obtener peso constante. La biomasa se calculó a partir de la diferencia entre el contenido de humedad y peso fresco del componente (Picard, Saint-André y Henry, 2012) definiéndose como: biomasa de hojas y ramillas (*Bhr*), biomasa de fuste y ramas (*Bfr*) y por suma de ambas, biomasa total (*Bt*). El volumen (*Vol*) de cada troza del fuste y de ramas se calculó a partir de la

fórmula de Smalian y, por suma, se obtuvo el volumen total del árbol en metros cúbicos.

Ajuste y selección de ecuaciones para cuantificar biomasa y volumen

Para cuantificar biomasa aérea y volumen de *P. halepensis* se probaron cinco ecuaciones alométricas (Tabla 1) propuestas por Picard, Saint-André y Henry (2012), obteniendo sus coeficientes de regresión por el método de mínimos cuadrados. La selección del mejor modelo estadístico se obtuvo acorde con Chave *et al.* (2005), usando el Criterio de Información Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) y error estándar del modelo (S_{xy}). Además se consideraron otros estadísticos e indicadores de capacidad predictiva de los modelos como el Criterio de Información Bayesiano (BIC, por sus siglas en inglés), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj.) y el coeficiente de variación (CV), considerando la significancia estadística de los coeficientes de regresión ($p \leq 0.01$) (Douterlungne *et al.*, 2013; Cuenca, Jadán, Cueva y Aguirre, 2014). Para corregir el sesgo causado por la transformación logarítmica en la variable de respuesta, se obtuvo el factor de corrección ponderado (Sprugel, 1983). Los análisis estadísticos se realizaron usando el programa R (R Development Core Team, 2015).

RESULTADOS

De un total de 40 árboles, 67.5% mostraron bifurcación de fuste a menos de 1.3 m de altura, este alto porcentaje

TABLA 1. Ecuaciones alométricas probadas para cuantificar biomasa aérea y volumen de fuste y ramas en *Pinus halepensis* Mill. en la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México.

No.	Ecuación	Tipo de ajuste	Varianza
1	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db) + \varepsilon$	Lineal simple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$
2	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db^2 H) + \varepsilon$	Lineal simple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$
3	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db) + \beta_2 \ln(H) + \varepsilon$	Múltiple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$
4	$Y = \beta_0 + \beta_1 Db^2 H + \varepsilon$	Lineal ponderada	$\text{Var}(\varepsilon) = \alpha Db^{2c}$
5	$y / Db = \beta_0 / Db^2 + \beta_1 H + \varepsilon$	Lineal	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$

Donde *y* = biomasa (de cada componente en kg) y volumen (m³); *Db* = diámetro a la base (cm); *H* = altura total (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = coeficientes de regresión; *ln* = logaritmo natural; ε = error; σ = varianza; α y *c* = coeficientes de ponderación.

fue base para considerarlos como un solo árbol. El diámetro basal de los árboles promedió 46.86 cm \pm 10.75 cm, 13.5 cm más que el promedio del diámetro normal. La altura de los árboles varió desde 7.12 m hasta 13.86 m (19%), pero el volumen desde 0.130 m³ hasta un máximo de 1.338 m³ (53%). La biomasa total (seca) mínima fue de 102.1 kg (*Db* = 26.9 cm) y la máxima de 1352.3 kg (*Db* = 75.4 cm) (Tabla 2). Es importante mencionar que se obtuvieron 3508 trozas, midiendo un total de 7016 diámetros, de los cuales 85% varió de 5 cm a 10 cm; el resto osciló entre 15 cm y 75 cm de diámetro.

El porcentaje de biomasa de fuste y ramas de *P. halepensis* incrementó 1.2% por cada unidad de altura total; y como consecuencia, la biomasa de hojas y ramillas disminuyó 1.3% con la altura del árbol (Fig. 1A). La relación *Bfr/Bhr* indicó que en *P. halepensis* la biomasa de fuste y ramas fue en promedio 2.02 veces más que la biomasa de hojas (Fig. 1B). La densidad de la madera de *P. halepensis* (*volumen de fuste y ramas/biomasa de fuste y ramas*) fue en promedio 0.607 t/m³ (Fig. 1C) y fue menos variable en árboles con diámetro basal menor a 45 cm, en comparación con árboles con diámetro mayor.

Ecuaciones para la estimación de la biomasa y volumen

Para ahorrar espacio solo se muestran las ecuaciones de mejor ajuste (Tabla 3). La ecuación 2 (Tabla 1) es la expresi-

ón lineal del modelo alométrico $y = e^a x^b$ y es una variación del modelo de potencia ($y = ax^b$), usando “*x*” como una variable combinada diámetro y altura. Esta fue la que mejor predijo la biomasa de fuste y ramas, total y volumen, siendo en este orden de menor a mayor ajuste del modelo (R^2 de 0.74 a 0.82).

Aunque los ajustes de los modelos de este estudio no fueron muy altos, en ningún caso se encontraron datos estadísticamente aberrantes. Todos los modelos fueron estadísticamente significativos ($p < 0.0001$); la variación más alta de los modelos se observó en biomasa de ramas ($CV = 26.7\%$) y la menor en volumen (22.63%). El factor de corrección, además de corregir el sesgo, mejoró las estimaciones de biomasa de todos los componentes y de volumen en 3%, que ha sido el valor promedio obtenido en varios estudios similares.

La estimación de biomasa de hojas y ramillas, fuste y ramas, biomasa total y volumen fueron representados con el mejor modelo (Fig. 2A, 2B, 2C, 2D). Al comparar la precisión de la estimación de biomasa y volumen, se encontró que en general los datos observados *versus* datos estimados de los árboles, que midieron entre 34 cm y 60 cm de diámetro basal, se distribuyeron por encima y por debajo de la recta $y = x$, (relación 1:1). En árboles con diámetro basal fuera de estos límites, la ecuación sobrestimó y subestimó (área sombreada) respectivamente, tanto la biomasa como el volumen de *P. halepensis* (Fig. 2E, 2F,

TABLA 2. Estadísticas descriptivas de árboles usados para generar ecuaciones de biomasa y volumen de *P. halepensis* Mill., en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México.

Estadístico	<i>Db</i>	<i>Dn</i> ¶	<i>H</i>	<i>Bhr</i>	<i>Bfr</i>	<i>Bt</i>	<i>Vol</i>
Promedio	46.86	33.36	9.83	175.84	349.05	524.89	0.592
Mínimo	26.90	30.00	7.12	23.41	78.65	102.06	0.130
Máximo	75.45	39.50	13.86	487.67	864.70	1352.37	1.338
Desv. estándar	10.75	3.10	1.86	84.70	183.07	257.61	0.313
Varianza	10.75	9.63	1.87	83.91	183.07	258.26	0.310
Coef. de variación	22.94	9.30	18.92	48.17	52.45	49.08	52.87

Donde: *Db* = diámetro a la base (cm); *Dn* = diámetro normal; *H* = altura (m); *Bhr* = biomasa en hojas y ramillas (kg); *Bfr* = biomasa en fuste y ramas (kg); *Bt* = biomasa total (kg); *Vol* = volumen (m³). ¶ = *Dn* de 13 árboles con bifurcación de fuste < 1.3 m de altura.

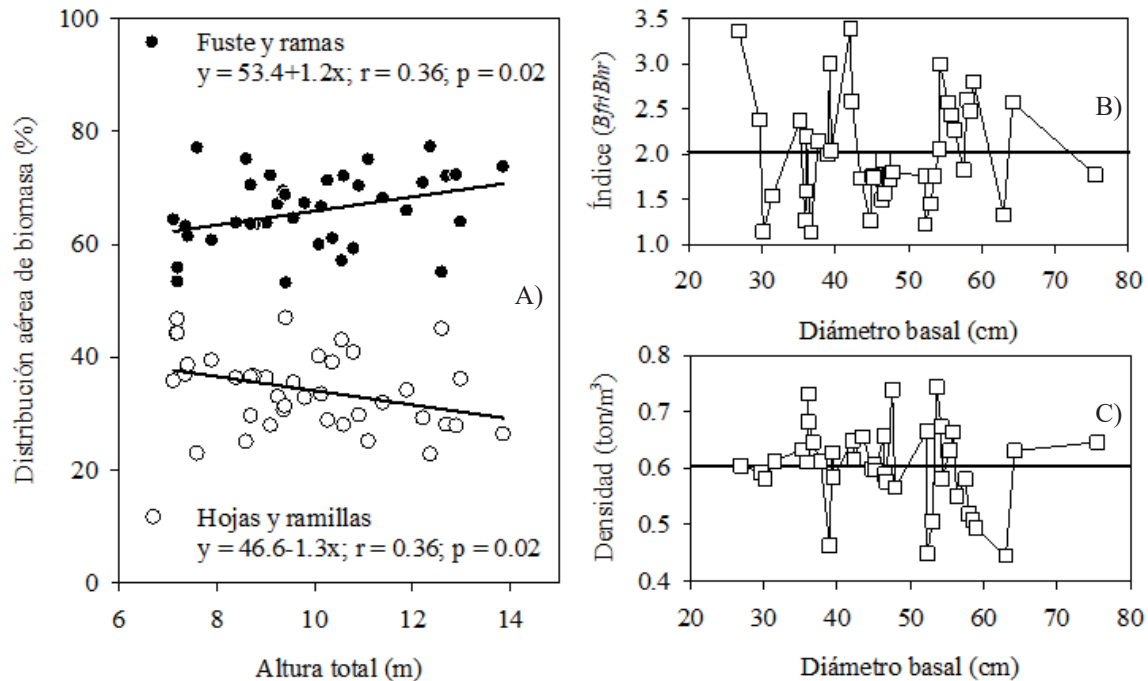


FIGURA 1. Distribución porcentual de biomasa aérea en función de altura total (A), relación Bfr/Bhr (B) y densidad de la madera de *P. halepensis* Mill. en función del diámetro basal (C).

2G, 2H). Las distancias verticales más grandes (errores en la predicción) corresponden básicamente a cuatro árboles cuyos diámetros basales fueron: 36.7 cm, 42.1 cm, 58.9 cm y 63 cm.

El error promedio porcentual más alto (32%) ocurrió en la biomasa de hojas y ramillas en la categoría de diámetro de 25 cm a 30 cm (Fig. 3A). En esa categoría el error promedio para la biomasa de fuste y total fue de 11.3% y 13.8%, respectivamente (Fig. 3B, 3C). Los errores más bajos se registraron entre las categorías de 30 cm y 60 cm de Db, promediando 2.1% para biomasa de hojas y ramillas (Fig. 3A), 3.0% para fuste y ramas (Fig. 3B) y 0.9% para la biomasa total (Fig. 3C). La ecuación 2 (Tabla 1) fue la que mejor estimó biomasa y se ajustó mejor al volumen de *P. halepensis* (Tabla 3). Su error porcentual en las diferentes categorías de diámetro basal fue homogéneo (Fig. 3D), promediando 4.7% (línea blanca del gráfico).

El análisis de una muestra de 122 árboles de *P. halepensis* procedentes de la misma área de estudio mostró alta correlación ($r = 0.97$) entre Dn y Db (Fig. 4A) y paralelismo

(misma pendiente, $b = 1.00$) según la ecuación $y = x$. Dicha ecuación se desplaza hacia un sentido positivo solamente 7.31 unidades de Db con respecto a la relación 1:1. Es decir, para uso de las ecuaciones de este estudio y especie, la transformación de Dn a Db puede hacerse eficientemente por medio de la ecuación señalada (Fig. 4A). La altura total de *P. halepensis* también puede ser estimada eficientemente mediante un modelo lineal (Fig. 4B). La relación Db/H (Fig. 4C) y Db/Dn (Fig. 4D) siguieron una tendencia logarítmica negativa.

DISCUSIÓN

En *P. halepensis* la mayor cantidad de biomasa aérea se distribuyó en el fuste y ramas (64%) con respecto a biomasa total, el resto (hojas y ramillas) representó en promedio 36%.

Este patrón fue similar al encontrado para *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* Lind., con 60% y 58% en fuste y 40% y 42% en hojas y ramas (Méndez *et al.*, 2011). En *Pinus montezumae* Lamb., el mayor porcentaje de biomasa se presentó en fuste (77%) y en ramas y hojas promedió 9% (Carrillo, Acosta, Flores, Juárez y Bonilla, 2014). Por su

TABLA 3. Coeficientes de regresión y estadísticos de ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea y volumen de *P. halepensis* Mill. en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México.

No.	Modelo	R^2_{aj}	S_{xy}	CV	Valor de p	AIC	BIC	FC
1	$Ln(Bhr) = Ln -2.5619 (\pm 1.48) + 1.9910 (\pm 0.38) Ln(Db)$	0.70	46.49	26.70	$1.27e^{-12}$	16.27	21.34	1.03
3	$Ln(Brf) = -2.6779 (\pm 1.49) + 0.8463 (\pm 0.15) Ln(Db^2H)$	0.74	92.81	26.59	$9.02e^{-14}$	15.39	20.46	1.03
3	$Ln(Bt) = -1.8737 (\pm 1.34) + 0.8077 (\pm 0.13) Ln(Db^2H)$	0.77	124.74	23.84	$1.36e^{-14}$	6.62	11.69	1.03
3	$Ln(Vol) = -9.7582 (\pm 1.33) + 0.9161 (\pm 0.13) Ln(Db^2H)$	0.82	0.13	22.63	$2.36e^{-16}$	6.26	11.33	1.03

Donde: *ln* = logaritmo natural; *Bhr* = biomasa en hojas y ramillas (kg); *Bfr* = biomasa en fuste y ramas (kg); *Bt* = biomasa total (kg); *Vol* = volumen (m³); R^2_{aj} = coeficiente de determinación ajustado; S_{xy} = error estándar (kg); CV = coeficiente de variación (%); valor de p = significancia estadística; AIC = Criterio de Información Akaike; BIC = Criterio de Información Bayesiano; FC = factor de corrección; ± = intervalo de confianza de 95% del coeficiente de regresión.

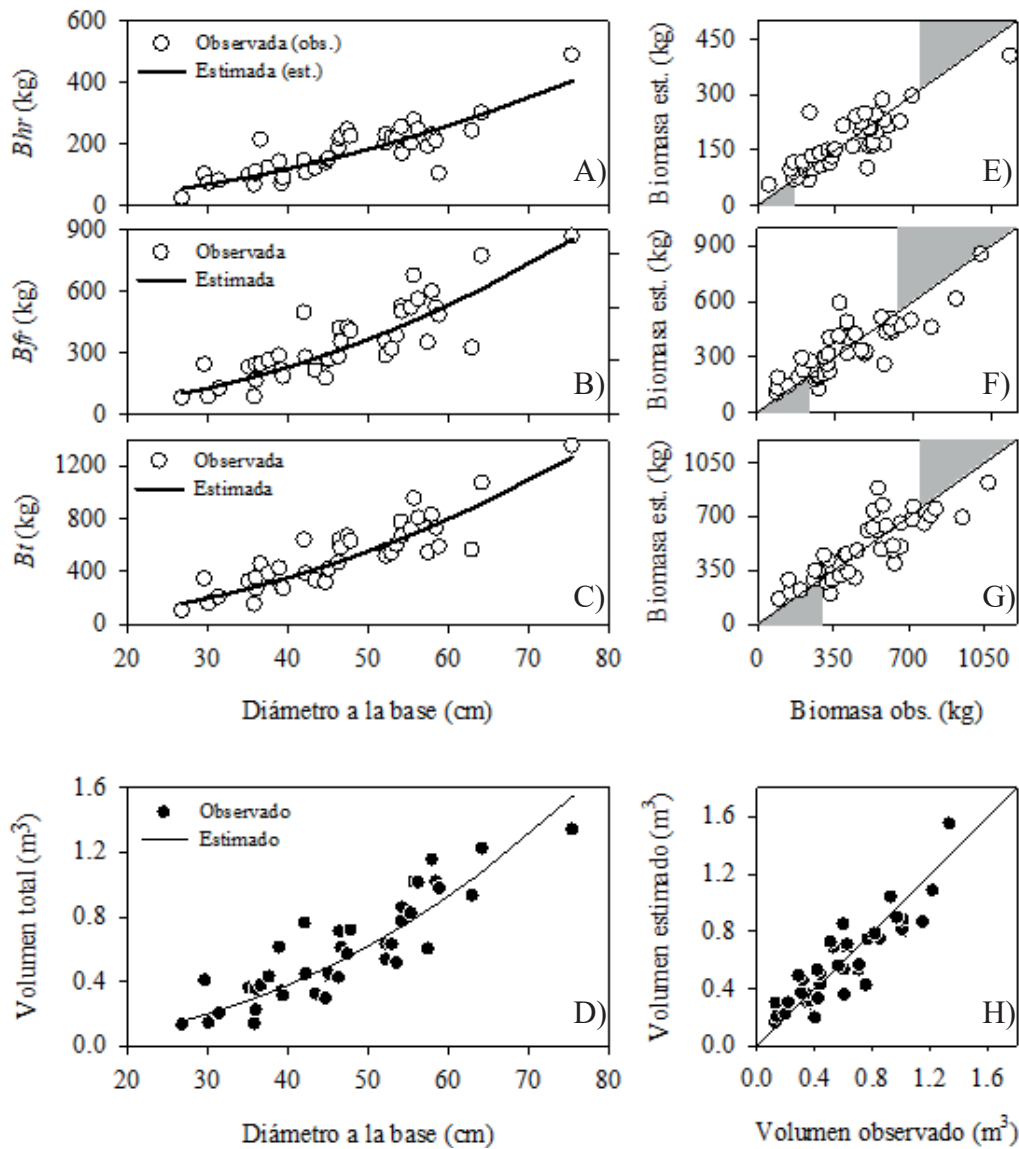


FIGURA 2. Biomasa estimada en: (A) hojas y ramillas, (B) fuste y ramas, (C) total; (D) volumen y (E-H) comparación de la capacidad predictiva del modelo en *P. halepensis* Mill., en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México.

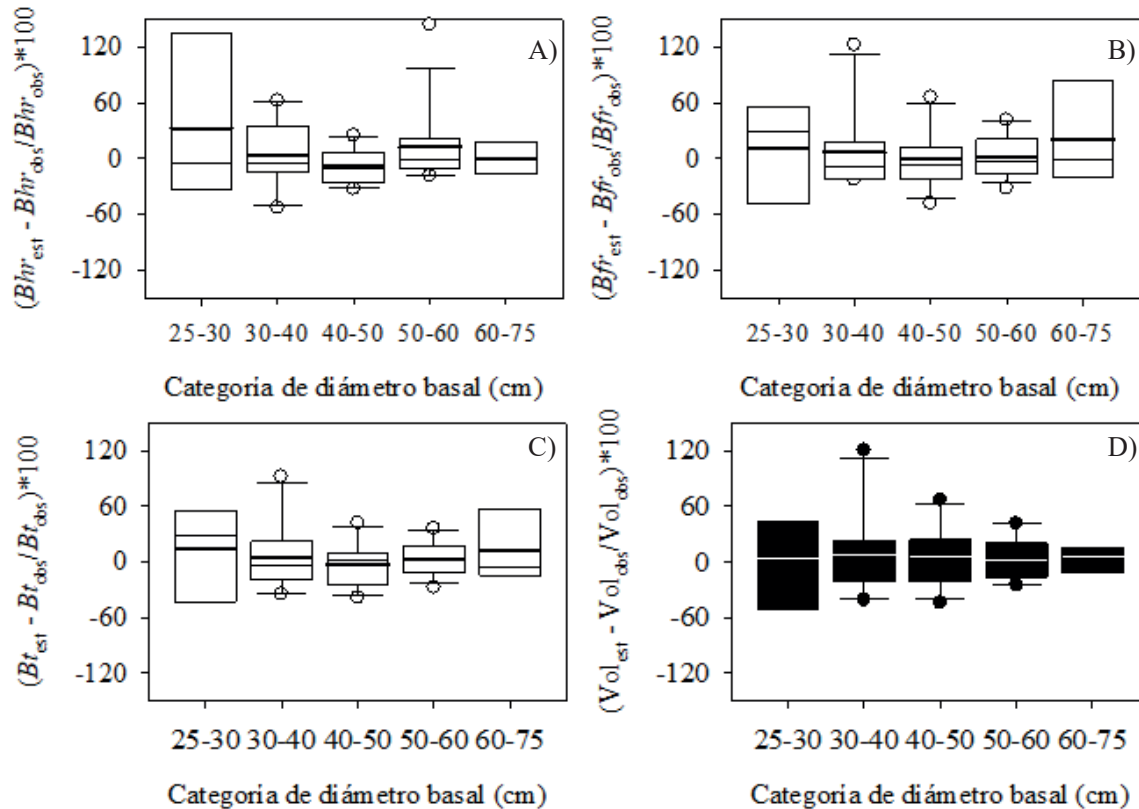


FIGURA 3. Error porcentual en biomasa de hojas y ramillas (A), de fuste y ramas (B), total (C) y en volumen (D) en *P. halepensis* Mill., en la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México.

parte Rodríguez *et al.* (2012) registraron que la distribución de biomasa en *P. patula* Schl. *et* Cham. fue 92.9%, 4.7% y 2.4% para fuste, ramas y follaje, respectivamente.

Al estimar la biomasa de *P. halepensis*, usando diámetros normales de 25 cm, 35 cm y 45 cm, y compararla con la biomasa aérea de otras especies, se encontró que en general la mayoría de las especies almacenaron más biomasa que *P. halepensis* (Fig. 5A). *P. arizonica* Engelm., para esos mismos diámetros normales, almacenó 2.0, 2.2 y 2.4 veces más, representando en promedio 130 326 kg y 644 kg de biomasa y hasta de 3.2 veces más en *P. montezumae* Lamb. para el diámetro de 45 cm (Carrillo *et al.*, 2014). La magnitud del error (S_{xy}) de estimación de biomasa no fue totalmente dependiente de la dimensión de la variable “y” (Fig. 5B), sino que dependió del tipo (simple, múltiple, etc.) y del número de variables independientes consideradas en el modelo. Los ajustes de los modelos (R^2)

encontrados en la literatura (Fig. 5C) son altos ($R^2 > 0.91$) y mayores a los de *P. halepensis* y no son proporcionales al tamaño de muestra (Fig. 5D).

En árboles de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham. la biomasa en fuste fue casi 85% del total, mientras que en ramas y hojas fue 7% y 8%, respectivamente (Avenidaño *et al.*, 2009). A pesar de que las hojas representan la menor cantidad de biomasa con respecto al total en casi todas las especies, algunos autores (Rodríguez *et al.*, 2012) sugieren que esta debe ser estimada con precisión, especialmente por su relación con la fotosíntesis y productividad primaria neta. Específicamente para *P. halepensis*, López *et al.* (2013) demostraron que las hojas fueron el componente más activo, cuyas variaciones dependieron de la precipitación y temperatura y de los sitios en donde ocurre el mayor flujo de carbono de la vegetación al suelo.

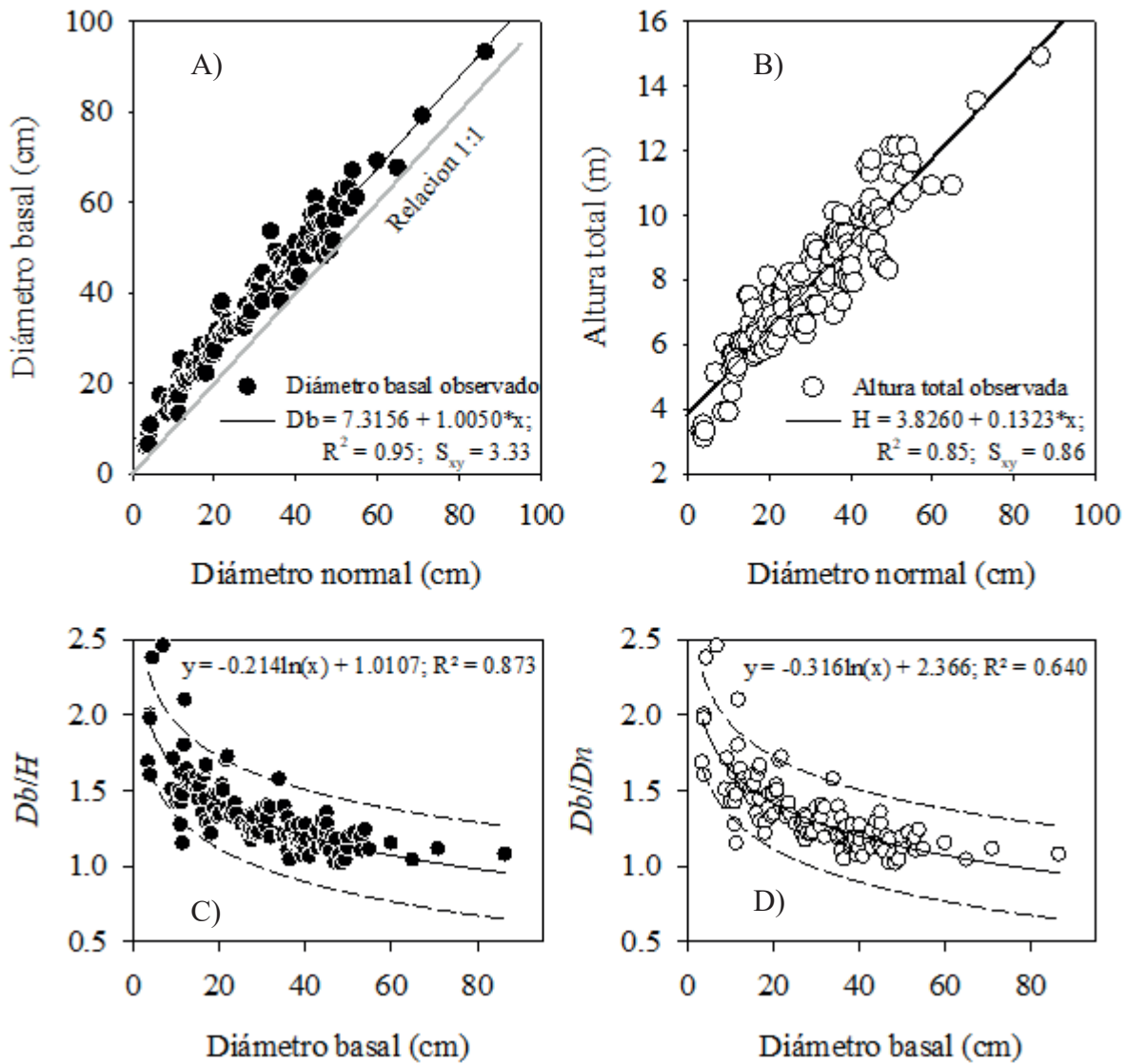


FIGURA 4. Relaciones: diámetro normal-diámetro basal (A), diámetro normal-altura total (B) e índices: diámetro basal-altura (C), diámetro basal-diámetro normal (D) de una muestra de árboles de *P. halepensis* Mill. en la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México.

En este, como en varios estudios, se ha demostrado que la biomasa total es el componente mejor estimado (Návar, 2009; Fonseca *et al.*, 2009; Méndez *et al.*, 2011; Cuenca *et al.*, 2014). En contraste, la biomasa de ramas presenta la mayor variación y es en este componente en donde ocurre el menor ajuste, independientemente de la especie y el género (Aguirre y Jiménez, 2011).

La ecuación con la variable combinada (diámetro-altura) que mejor predijo biomasa de *P. halepensis* en este estudio se ha utilizado también para estimar el volumen

de esta especie (Návar y Domínguez, 1997) y en la mayoría de otras especies (Muñoz *et al.*, 2012). La mayoría de las ecuaciones alométricas se han desarrollado con la variable diámetro normal (Picard *et al.*, 2012; Cuenca *et al.*, 2014), aunque por las características de la especie y lo práctico de medir algunas variables de árbol, varios autores han usado diámetro basal (Návar *et al.*, 2004; De los Ríos y Návar, 2010; Douterlungne *et al.*, 2013).

Cabe destacar que el peso seco de especies registrado por Brown (1997), Návar (2009) y Carrillo *et al.*

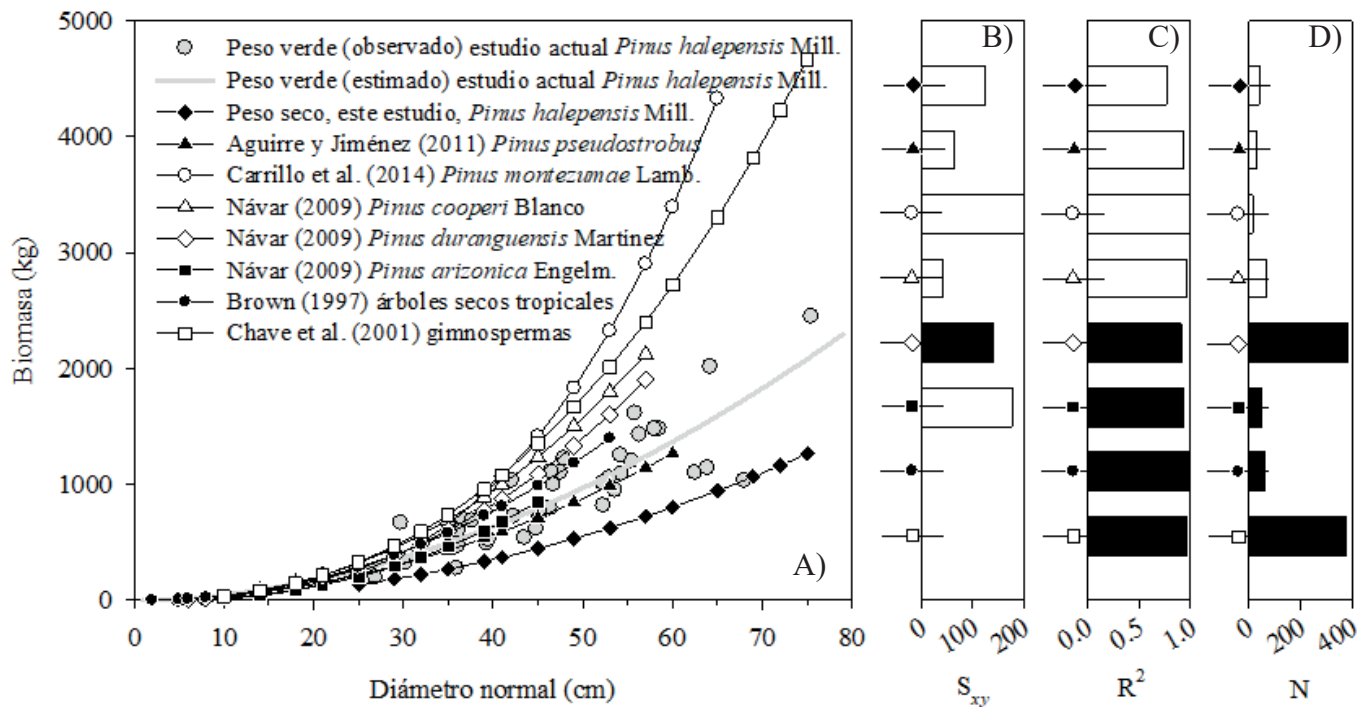


FIGURA 5. Comparación de la biomasa aérea (seca y fresca) de *P. halepensis* Mill. con la biomasa seca de diferentes especies (A), estadísticos: error de estimación (B), ajuste (C) y número de observaciones (D) de ecuaciones usadas para estimar biomasa aérea de las especies del lado izquierdo.

(2014) (Fig. 4A) es aún mayor que el peso verde de *P. halepensis* de este estudio, variando desde 1.2 (*P. arizonica*) hasta 1.8 veces más (*P. montezumae*), pero en promedio 1.2 veces más que *P. halepensis*. El peso verde de *P. halepensis* registrado aquí es similar al peso seco de *P. pseudostrobus* registrado por Aguirre y Jiménez (2011). Diferencias de almacenes de biomasa específicas e inter-específicas han sido documentadas por Nívar (2009) y Chave, Riéra y Dubois (2001), demostrándose que estas son dependientes de las condiciones de crecimiento (Méndez *et al.*, 2011) y de la calidad de sitio (Nívar, 2009), de la misma especie y de la densidad del rodal (Aguirre y Jiménez, 2011).

El número de árboles con que se han desarrollado las ecuaciones de biomasa ha sido variable, desde 15 (Carrillo *et al.*, 2014) hasta 384 (Nívar, 2009) (Fig. 4B). Particularmente en México, más de 50% de los estudios de ecuaciones alométricas para cuantificar biomasa se han construido usando desde 10 hasta 40 árboles.

Algunos autores, para mejorar la estimación de biomasa, han sugerido incluir en el modelo la densidad de la madera (Chave *et al.*, 2005; Picard *et al.*, 2012) o usar modelos múltiples y polinomiales (Chave *et al.*, 2005) con densidad, área del tronco, diámetro y altura. El valor de densidad básica de la madera de *P. halepensis* de este estudio (0.607 t/m^3) es muy similar al obtenido por Centre de la Propietat Forestal (2004) para esta misma especie (0.610 t/m^3).

CONCLUSIONES

La mejor predicción de biomasa aérea y volumen de *P. halepensis* se logró con la ecuación que incluyó la variable combinada diámetro y altura en forma logarítmica, mientras que el diámetro por sí solo mostró estimaciones sesgadas. Los errores más altos (subestimación) de biomasa aérea de *P. halepensis* ocurrieron en las categorías de diámetro inferiores, lo cual se debió a la alta variación del diámetro-altura en edades tempranas. La biomasa aérea

de *P. halepensis* fue hasta 2.5 veces menor que la de otras especies de coníferas que no se ramifican desde la base del árbol. Ochenta y cinco por ciento de las ramas de *P. halepensis* variaron entre 5 cm y 10 cm de diámetro, contrario a lo que se ha registrado para la mayoría de las coníferas. La particularidad de la especie se reflejó también en menor ajuste de los modelos alométricos en comparación con otras especies de coníferas.

RECONOCIMIENTOS

Al jefe de departamento de Recursos Naturales y de Suelos de la UAAAN, por apoyar con las instalaciones para secado de muestras, así como a estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal de la UAAAN, cursando la materia de epidimetría 2015, quienes participaron en los trabajos de campo de este estudio.

REFERENCIAS

- Acosta, M., Vargas, J., Velásquez, M., & Etchevers, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36, 725-736.
- Aguirre, O. A., & Jiménez, J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2, 73-83.
- Avendaño, D. M., Acosta, M., Carrillo, F., & Etchevers, J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32, 233-238.
- Brown, S. (1997) *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. Forestry Paper 134. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization [FAO].
- Carrillo, F., Acosta, M., Flores, E., Juárez, J. E., & Bonilla, E. (2014). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5), 779-793. doi: 10.29312/remexca.v5i5.901
- Cedeño, H., & Pérez, D. R. (2007). *La legislación forestal y su efecto en la restauración en México*. Instituto Nacional de Ecología. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/467/cedenoyperrez.html>.
- Chave, J., Riéra, B., & Dubois, M-A. (2001). Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 79-96. doi: 10.1017/S0266467401001055
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ..., & Yakamura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x
- Centre de la Propietat Forestal (2004). Annexa Indicadors dendromètrics. En Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Centre de la Propietat Forestal, *Manual de redacció de plans tècnics de gestió i millora forestal (PTGMF) i plans simples de gestió forestal (PSGF)*. Instruccions de redacció i l'inventari forestal (pp. 211-314). Barcelona, España.
- Cuenca, M. E., Jadán, O., Cueva, K., & Aguirre, C. (2014). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *CEDAMAZ*, 4, 21-31.
- De los Ríos, E., & Nívar, J. J. (2010). Root allometry of two subtropical plant communities of northeastern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, 123-134.
- Douterlungne, D., Herrera, A. M., Ferguson, B. G., Siddique, I., & Soto, L. (2013). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia*, 47, 385-397.
- Fady, B., Semerci, H., & Vendramin, G. (2003). *Technical guidelines for genetic conservation and use for Aleppo pine (Pinus halepensis) and Brutia pine (Pinus brutia)*. Rome, Italy: International Plant Genetic Resources Institute.
- Fonseca, G., Alice, W., F., & Rey, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30, 36-47. doi: 10.4067/S0717-92002009000100006
- García, E. (1998). *Climas, Clasificación de Köppen, modificado por García*. Carta de climas, escala 1:1 000 000. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio].



- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2013). Resumen para responsables de políticas. En T. F. Stocker, D. Qin, G-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, ..., & P. M. Midgley (Eds.), *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change. En O. R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, ..., & J. C. Minx (Eds.), *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Nueva York. Cambridge University Press.
- López, J. D., Méndez, J., Nájera, J. A., Cerano, J., Flores, J. D., & Nájera, J. A. (2013). Producción de hojarasca en *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus cembroides* Zucc. y su relación con algunos factores climáticos. *Agrociencia*, 47, 497-510.
- Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*. México: Instituto Nacional de Ecología.
- Méndez, J., Luckie, S. L., Capó, M. A., & Nájera, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl., y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*, 45, 479-491.
- Muñoz, H. J., Velarde, J. C., García, J. J., Sáenz, J. T., Olvera, E. H., & Hernández, J. (2012). Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3, 11-22.
- Návar, J., & Domínguez, P. A. (1997). Ajuste de modelos de volumen y funciones que describen el perfil diamétrico de cuatro especies de pino plantadas en el nordeste de México. *Investigación Agraria: Sistemas Forestales*, 6, 147-162.
- Návar, J. J., González, N., Graciano, J. J., Dale, V., & Parresol, B. (2004). Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 10(2), 17-28. doi.. 10.21829/myb.2004.1021272
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257, 427-434. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal*. Roma: FAO.
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Del trabajo de campo a la predicción*. Rome-Montpellier: Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
- R Development Core Team (2015). *R. A Language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de <http://www.R-project.org>.
- Rodríguez, G., De Los Santos, H. M., González, V. A., Aldrete, A., Gómez, A., & Fierros, A. M. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 18(1), 25-41. doi: 10.21829/myb.2012.1811116
- Sprugel, D. G. (1983). Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, 64, 209-210.

Manuscrito recibido el 23 de diciembre de 2017

Aceptado el 7 de marzo de 2018

Publicado el 26 de octubre de 2018

Este documento se debe citar como:

Montoya J., J. C., Méndez G., J., Sosa D., L., Ruíz G., C. G., Zermeño G., A., Nájera Luna, J. A., Manzano C., M. G., & Velázquez R., A. S. (2018). Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México. *Madera y Bosques*, 24(Núm. esp.), e2401880. doi: 10.21829/myb.2018.2401880



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.