



Estimación **alométrica** de **biomasa arbórea** mediante un enfoque generalizado a nivel de especie y multiespecie

Allometric estimation of tree biomass through a generalized approach at species and multispecies level

Fernando Paz Pellat^{*}, Víctor Salas Aguilar², Alma Velázquez Rodríguez³ y Cristóbal Sánchez Sánchez⁴

¹ GRENASER, Colegio de Postgraduados. *Campus* Montecillo. Montecillo, Estado de México, México.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Geoinformática. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

³ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias. *Campus* El Cerrillo. Toluca, Estado de México, México.

⁴ Colegio de Postgraduados. Postgrado en Ciencias Forestales. *Campus* Montecillo. Montecillo, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: ferpazpel@gmail.com

RESUMEN

Los ecosistemas terrestres tienen almacenes en la biomasa aérea (B) de alta importancia para acciones de mitigación del cambio climático a través de mecanismos tales como REDD+. Para obtener posibles compensaciones financieras por evitar deforestar o degradar los bosques, además de la conservación, incrementar los almacenes de carbono y manejo forestal sustentable, es necesario evaluar los errores de estimación de biomasa y carbono, que generalmente están asociados al modelo alométrico usado. Los modelos alométricos sobre las relaciones entre diámetro normal (D) y altura total (H) con la biomasa usan técnicas estadísticas que no aprovechan las relaciones entre los parámetros de los modelos, ni las relaciones entre las constantes y exponentes de cada modelo, por lo que en este trabajo se presenta un marco teórico generalizado aplicable a nivel de monoespecies y multiespecies, el cual fue aplicado a un conjunto de 684 mediciones de D, H y B, provenientes de 23 bases de datos de especies individuales. Los resultados obtenidos, cuando se cuenta con datos, prácticamente no presentaron error cuando se consideraron todos los parámetros. Cuando faltó información de un parámetro, las estimaciones realizadas con diferentes aproximaciones mostraron errores de estimación comparables con los obtenidos por los métodos clásicos de generación de modelos alométricos generalizados. El proceso metodológico desarrollado sirve de base para plantear cambios en los enfoques de generación de información alométrica, para simplificar modelos y para reducir los errores en la estimación de la biomasa y el carbono.

PALABRAS CLAVE: carbono, ecosistemas terrestres, estimaciones específicas y generalizadas, relación entre exponentes alométricos, punto común de intersección.

ABSTRACT

The total aboveground biomass (B) of terrestrial ecosystems has carbon stocks of high importance for mitigation actions of climate change through mechanisms such as REDD+. To be able to access possible financial compensation to avoid deforestation or degradation of forests, in addition to conservation, increase of stocks and sustainable forest management, it is necessary to evaluate biomass and carbon estimation errors, which are generally associated with the allometric model used. The common allometric models, relationships between normal diameter (D) and total height (H) with biomass, use statistical techniques that do not take advantage of the relations between the exponents of the models, nor the relationships between the constants and exponents of each model. This work presents a generalized theoretical framework applicable at the level of monospecies and multispecies, which is applied to a set of 684 measurements of D, H and B, from 23 databases of individual species. The results obtained, when all the parameters were available, were practically without error. In the cases of lack of information of a parameter, the estimations made under different approximations showed estimation errors comparable with those obtained by the classical methods of development of generalized allometric models. The methodological process presented serves as the basis for the proposal of changes in the allometric information generation approaches, to simplify and reduce errors in estimating biomass and carbon.

KEYWORDS: carbon, terrestrial ecosystems, specific and generalized estimates, allometric exponents relationships, common point intersection.

INTRODUCCIÓN

Los almacenes y flujos de carbono de la biomasa aérea en los ecosistemas terrestres son de alto interés, dado su potencial de secuestro de carbono con relación al cambio climático (Ruesch y Gibbs, 2008; Carré, Hiederer, Blujdea y Koeble, 2010). En lo general, las estimaciones de la biomasa aérea de comunidades arbóreas son realizadas con el uso de ecuaciones alométricas (tipo $Y = kX^z$) que relacionan el diámetro normal o D (medido a 1.3 m de altura) y la altura o H (variables X), principalmente, de las especies arbóreas con la biomasa o B (variable Y) (Brown, 1997). Las estimaciones del carbono forestal muestran una dependencia del medio ambiente (Clark, Clark y Read, 1998; de Castilho *et al.*, 2006) que se reflejan en los parámetros de las ecuaciones alométricas utilizadas, por lo que es necesario comprender estos controles.

En el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el mecanismo REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación evitada más conservación, incremento de almacenes y manejo forestal sustentable) plantea posibles compensaciones financieras por evitar la deforestación y degradación forestal (Gibbs, Brown, Niles y Foley, 2007; Miles y Kapos, 2008), por lo que resulta muy importante evaluar la incertidumbre asociada a las estimaciones de la biomasa y el carbono (Pelletier, Kirby y Potvin, 2010; Nickless, Scholes y Archibald, 2011). Entre los errores de estimación de la biomasa (Parresol, 1999; Chave *et al.*, 2004), la principal fuente de incertidumbre es la asociada a la selección de un modelo alométrico para estimar la biomasa y el carbono de los árboles (Pelletier *et al.*, 2010; Molto, Rossi y Blanc, 2013).

Las principales relaciones alométricas usadas en las estimaciones de biomasa (Brown Gillespie y Lugo, 1989; Chave *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2017) son: (1) $B = a_d D^{bd}$ y (2) $B = a_v (D^2 H)^{bv}$, aunque existen funciones más complejas. Se ha argumentado que la inclusión de la altura de los árboles en las ecuaciones alométricas contribuye a la disminución de los errores de estimación (Feldpausch *et al.*, 2012; Chave *et al.*, 2005 y 2014). La relación entre la altura y el diámetro normal es generalmente del tipo potencial

(3) $H = a_{hd} D^{bhd}$ (Niklas, 1994; O'Brien, Hubbell, Spiro, Condit y Foster, 1995; Feldpausch *et al.*, 2011; 2012; Hulschof, Swenson y Weiser, 2015), aunque los modelos asintóticos se ajustan bien a la relación H-D, H en función de D (Thomas, 1996; Feldpausch *et al.*, 2012; Hulschof *et al.*, 2015; Fayolle *et al.*, 2016).

Al considerar que los parámetros de las ecuaciones alométricas varían en forma intra e interespecífica (Pretzsch y Dieler, 2012) y que son dependientes del tipo de bosque o sitio (Fayolle *et al.*, 2016), entre otros factores, se han realizado compendios a escalas regionales y nacionales de estos para realizar estimaciones de biomasa y carbono en inventarios forestales o de vegetación (Henry *et al.*, 2011; Návar, Ríos, Pérez, Rodríguez y Domínguez, 2013; Rojas-García, de Jong, Martínez y Paz, 2015), donde predomina el modelo de la ecuación (1). Dadas las limitaciones de compilar ecuaciones alométricas de todas las especies de una región o país y la dependencia de los parámetros a nivel de sitio, zona o región, se han propuesto ecuaciones generalizadas para su uso en términos multiespecies y por tipo de bosque o vegetación (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2005 y 2014; Feldpausch *et al.*, 2012). Estas ecuaciones usan datos de muestreos destructivos para extraer información de D, H y B, además de la densidad de la madera. Un enfoque alternativo en la construcción de ecuaciones alométricas generalizadas, modelo de la relación (1), es usar las ecuaciones específicas o locales para generar puntos artificiales a los que se les ajusta una ecuación general (Pastor, Aber y Melillo, 1984; Jenkins, Chojnacky, Heath y Birdsey, 2003).

En términos empíricos, la relación entre los parámetros a_d y b_d de la ecuación (1) ha sido analizada con el uso de un conjunto de ecuaciones alométricas para la misma especie (diferentes sitios de muestreo) o para un conjunto de especies diferentes para establecer una relación potencial $a_d = A b_d^{-B}$ (Zianis y Mencuccini, 2004; Návar, 2010a; Méndez, Turlan, Ríos y Nájera, 2012; Sileshi, 2014), donde A y B son constantes del ajuste estadístico. Adicionalmente se ha establecido una relación exponencial $a_d = A \exp(-B b_d)$ (Fehrmann y Kleinn, 2006; Pilli, Anfodillo y Carrer, 2006; Zapata-Cuatas, Sierra y Alleman, 2012; Zhang *et al.*,



2016). En el caso de la relación entre H y D, ecuación (3), se han establecido también relaciones entre los parámetros a_{hd} y b_{hd} (Djomo, Ibrahima, Saborowski y Gravenhorst, 2010; Lines, Zavala, Purves y Coomes, 2012; Zhang *et al.*, 2016; Fayolle *et al.*, 2016). La interpretación de los parámetros k y z de la ecuación alométrica $Y = kX^z$ ha sido discutida desde hace tiempo (Lumer, 1939; Lumer, Anderson y Hersh, 1942; White y Gould, 1965), concluyéndose que el parámetro z está relacionado con el proceso en análisis, pero la constante k no tiene una interpretación biológica y su valor es dependiente de las unidades de medida utilizadas. El conocimiento de la relación entre a_d y b_d (u otros parámetros de otras relaciones alométricas) permitiría reducir la dimensionalidad del problema de estimación a solo un parámetro (Návar, 2010b).

En otra perspectiva, el establecimiento de una relación entre los parámetros de las ecuaciones (1) a (3), adicionalmente permite simplificar el proceso de estimación ya que solo se requiere un parámetro (constante o exponente) para estimar el otro. En el caso de los parámetros de las relaciones alométricas, Ketterings, Coe, vanNoordwijk, Ambagau' y Palm (2001), Zianis y Mencuccini (2004), Price, Enquist y Savage (2007), Návar (2010b) y Zhang *et al.* (2016) han mostrado relaciones entre ellos, con base en diferentes argumentos teóricos.

OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar el marco teórico general para analizar ecuaciones alométricas a nivel de especies individuales y multiespecies o especies en multisitios con la consideración de incorporar relaciones que simplifiquen el problema de estimación. Para esto, se analizan datos analíticos de múltiples especies a nivel nacional e internacional para validar el enfoque propuesto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Relación entre constantes y exponentes de atributos de los árboles

Una de las relaciones alométricas más utilizadas ha sido (Feldpausch *et al.*, 2012; Chave *et al.*, 2005 y 2014):

$$B = a_v(D^2H)^{b_v} \quad (1)$$

donde a_v y b_v se interpretan como parámetros del ajuste empírico por regresión estadística. El exponente b_v habitualmente tiene valores menores o iguales a 1.0 (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2005 y 2014; Feldpausch *et al.*, 2012).

Adicionalmente, las siguientes relaciones pueden aplicarse:

$$B = a_d D^{b_d} \quad (2)$$

$$B = a_h H^{b_h} \quad (3)$$

La relación entre D y H puede ser establecida como:

$$H = a_{hd} D^{b_{hd}} \quad (4)$$

La ecuación (4) puede ser reformulada para D como:

$$D = a_{dh} H^{b_{dh}} = \left(\frac{a_d}{a_v}\right)^{\frac{1}{b_v}} H^{\frac{b_d}{b_v}} \quad (5)$$

La relación entre los exponentes de las ecuaciones (1), (2) y (4) puede ser establecida de la siguiente manera: al sustituir la ecuación (3) en la (1) se obtiene:

$$B = a_v(a_{hd})^{b_v} D^{b_v(2+b_{hd})} \quad (6)$$

la cual, al compararla con la ecuación (2), permite establecer:

$$a_d = a_v(a_{hd})^{b_v} \quad (7)$$

$$\ln(a_d) = \ln(a_v) + b_v \ln(a_{hd}) \quad (8)$$

$$b_d = b_v(2 + b_{hd}) \quad (9)$$

Algo similar puede ser establecido para la relación entre los exponentes de las ecuaciones (1), (3) y (5), al sustituir la ecuación (5) en la (1):

$$B = \left[a_v \left(\frac{1}{a_{hd}} \right)^{\frac{2b_v}{b_{hd}}} \right] H^{\left(\frac{2}{b_{hd}} + 1 \right)} \quad (10)$$

por lo que al compararla con la ecuación (3) se puede establecer:

$$a_h = a_v \left(\frac{1}{a_{hd}} \right)^{\frac{2b_v}{b_{hd}}} \quad (11)$$

$$b_h = b_v \left(\frac{2}{b_{hd}} + 1 \right) \quad (12)$$

Si el objetivo es estimar B con la ecuación (1) o (2), las relaciones (7) u (8) y (9) establecen que para el caso $b_v = 1$ es posible obtener el valor del coeficiente b_d del coeficiente b_{hd} . Si se desconocen a_v y b_v , entonces no es posible establecer una relación simple con a_d y b_d . Price *et al.* (2007), Nívar (2010) y Zhang *et al.* (2016) encontraron las mismas relaciones en el contexto del modelo WBE (West, Brown y Enquist) de ramificación fractal de plantas vasculares (West, Brown, Enquist, 1999) y, bajo la consideración de $b_v = 1$. A diferencia de este enfoque teórico, los desarrollos que se presentan son consecuencia directa del sistema de ecuaciones definido, sin ninguna consideración de tipo teórico, solo derivaciones matemáticas simples.

Solamente usando la información de datos D y H es posible establecer relaciones de (D^2H) con D y H al igualar las relaciones (1) y (2), y (1) y (3):

$$(D^2H) = \left(\frac{a_d}{a_v} \right)^{\frac{1}{b_v}} D^{\frac{b_d}{b_v}} = a_{hd} D^{(2+b_{hd})} = a_{vd} D^{b_{vd}} \quad (13)$$

$$(D^2H) = \left(\frac{a_h}{a_v} \right)^{\frac{1}{b_v}} H^{\frac{b_h}{b_v}} = \left(\frac{1}{a_{hd}} \right)^{\frac{2}{b_{hd}}} H^{\left(\frac{2}{b_{hd}} + 1 \right)} = a_{vh} H^{b_{vh}} \quad (14)$$

Relación entre los parámetros de una relación alométrica

Para establecer una relación entre la constante (a_d) y el exponente (b_d) para un conjunto de parámetros del modelo alométrico de la relación (2) de diferentes especies de arboles o de la misma especie y diferentes sitios de muestreo, se puede partir de la propiedad de que los parámetros de un conjunto de líneas rectas que se intersectan en un punto común tienen una relación lineal entre ellos (Paz, Odi, Cano, Bolaños y Zarco, 2009). En el caso de las relaciones alométricas discutidas previamente, particularmente la ecuación (2), se tiene que con una transformación logarítmica se consigue:

$$\ln(B) = \ln(a_d) + \ln(D)b_d \quad (15)$$

que es una línea recta en el espacio log-log. En este espacio transformado, para un conjunto de líneas rectas con intersección en un punto común, los parámetros se relacionan como (Lumer, 1936):

$$a_d = B_{od} \exp [-\ln(D_{od}) b_d] \quad (16)$$

$$\ln(a_d) = \ln(B_{od}) - \ln(D_{od}) b_d \quad (17)$$

donde el punto de intersección en el espacio log-log estará dado por $[\ln(D_{od}), \ln(B_{od})]$ y en el aritmético por (D_{od}, B_{od}) .

La relación (16) o (17) se observó desde hace tiempo en el campo de la alometría (Hersh, 1931) y se ha discutido ampliamente (Lumer *et al.*, 1942; White y Gould, 1965). Fehrmann y Kleinn (2006) y Picard, Rutishauser, Ploton, Ngomanda y Henry (2015b) discuten estas correlaciones en el marco teórico adecuado, pero sin investigar sus propiedades para reducir la dimensionalidad del problema de ajustes en alometría.

En la relación (17), el signo de $\ln(D_{od})$ es positivo si $D_{od} < 1$, dado que $\ln(D_{od}) < 1$; negativo si $D_{od} > 1$, dado que



$\ln(D_{od}) > 1$ y, para $D_{od} = 1$, $\ln(D_{od}) = 0$, por lo que $\ln(a_d)$ es constante para cualquier valor de B_{od} ; es decir, a_d es independiente de b_d . La figura 1 muestra las relaciones para los tres casos, las cuales se basan, parcialmente, en White y Gould (1965).

Para el caso de la relación (1), con líneas rectas en el espacio log-log que se intersectan en un punto, se tiene:

$$\ln(a_v) = \ln(B_{ov}) - \ln[(D^2H)_{ov}]b_v \quad (18)$$

donde $[\ln(D^2H)_{ov}, \ln(B_{ov})]$ representa el punto de intersección en el espacio $D^2H - B$ transformado logarítmicamente. Algo similar se obtiene para la relación (3) entre H y D:

$$\ln(a_{hd}) = \ln(H_o) - \ln[D_{oh}]b_{hd} \quad (19)$$

Al sustituir $\ln(a_{hd})$ de la relación (8) en la (19) se obtiene:

$$\frac{1}{b_v} [\ln(a_d) - \ln(a_v)] = \ln(H_o) - \ln[D_{oh}]b_{hd} \quad (20)$$

por lo que el coeficiente b_v y a_v puede obtenerse de:

$$b_v = \frac{[\ln(a_d) - \ln(a_v)]}{\ln(H_o) - \ln[D_{oh}]b_{hd}} = \frac{[\ln(a_d) - \ln(a_v)]}{\ln(a_{hd})} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \ln(a_v) &= \ln(a_d) - b_v [\ln(H_o) - \ln[D_{oh}]b_{hd}] = \\ &= \ln(a_d) - b_v \ln(a_{hd}) \end{aligned} \quad (22)$$

Relaciones similares entre los parámetros de las relaciones alométricas pueden ser obtenidas al sustituir las relaciones (8) y (9) en las relaciones (17) y (18).

La figura 1 muestra el caso de un conjunto de ecuaciones alométricas para la misma especie y diferentes sitios o para varias especies, indicando patrones en fun-

ción de la localización del punto de intersección de las líneas rectas. Una formulación alternativa para el caso de los datos de una especie es suponer que cada par de datos medidos (H o D, B o D^2H , B o H, D) corresponde a una ecuación alométrica particular, además de que todas las relaciones tienen un punto en común “virtual”, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 2. Los desarrollos siguientes se aplican a esta situación.

Efecto de las unidades de medida en las relaciones alométricas

En los ajustes a los datos experimentales, la relación (16) o (17) generalmente muestra dispersión ($R^2 < 1$), lo que denota que el punto de intersección de las líneas rectas es una zona común (Lumer *et al.*, 1942; White y Gould, 1965). Dadas las unidades generalmente usadas en las relaciones alométricas (p.ej. cm para D), la intersección (zona) es para valores mayores que 1, por lo que el signo de la relación (16) o (17) es negativo.

Lumer *et al.* (1942) y White y Gould (1965), observaron que al cambiar las unidades de medida (incremento; p.ej. de cm a dm) la correlación de las relaciones (16) o (17) se incrementa, destacando su dependencia. La relación alométrica general $Y_o = k_o(X_o)^z$, con unidades originales X_o , Y_o y constante k_o (z es independiente de las unidades de medida), puede plantearse como función de las unidades de medida de X y Y (Lumer, 1939; Lumer *et al.*, 1942; White y Gould; 1965). Un cambio en las unidades de X y Y puede presentarse como un cambio de X_o a $q_x X_o (= X_q)$ y de Y_o a $q_y Y_o (= Y_q)$, por lo que se obtiene:

$$\frac{q_y Y_o}{q_y} = k_o \left(\frac{q_x X_o}{q_x} \right)^z \Rightarrow Y_q = q_y \left(\frac{k_o}{q_x^z} \right) X_q^z = k_q X_q^z \quad (23)$$

Al usar $q_x > 1$ en la ecuación (16) o (17), por ejemplo, el coeficiente de determinación R^2 se incrementa. Para valores de $q_x < 1$, para el punto o zona de intersección negativa (Fig. 1), el signo de la relación (16) o (17) se vuelve positivo.

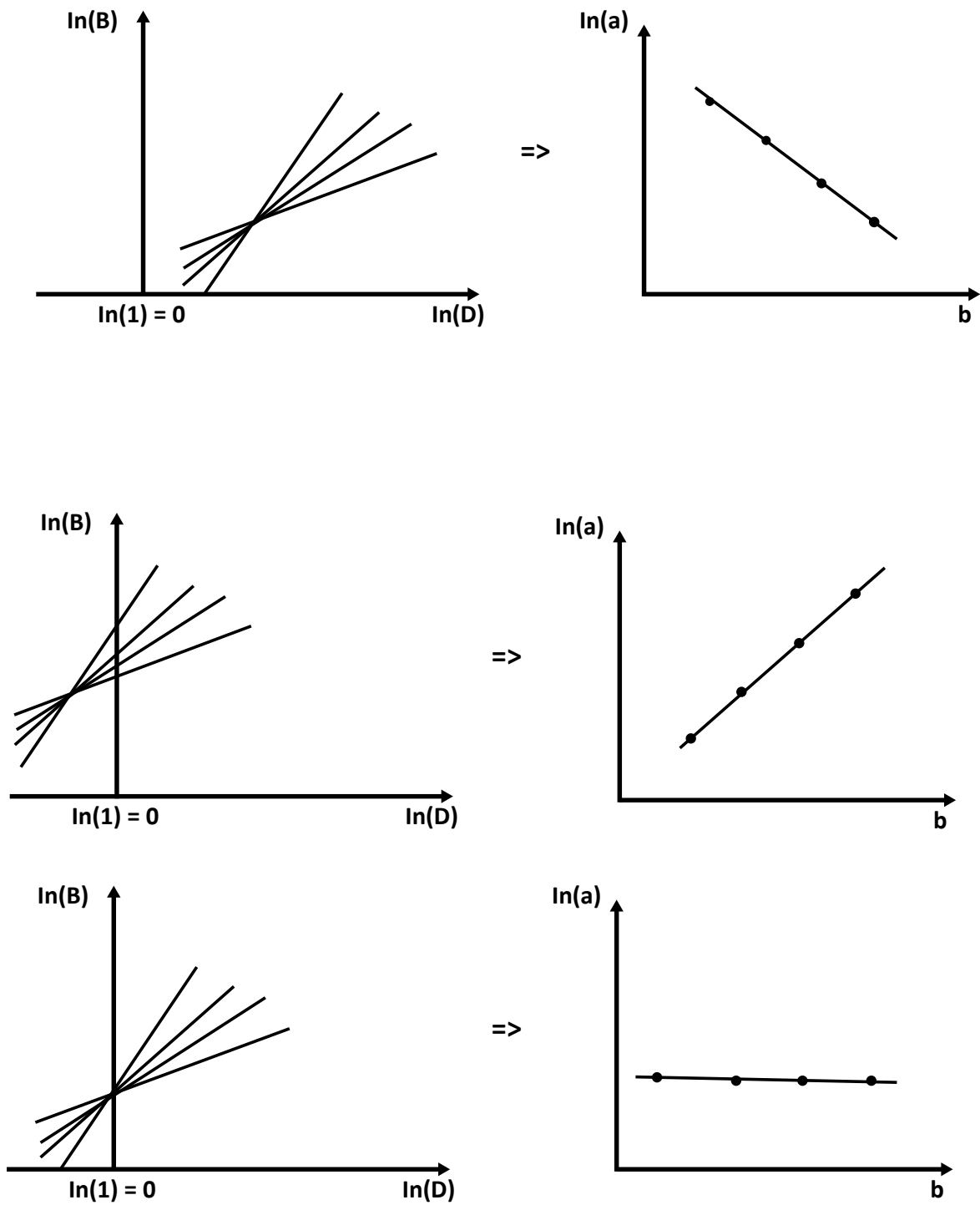


FIGURA 1. Patrones de intersección de un conjunto de líneas rectas en función de la localización del punto de intersección en el espacio log-log con relación a $\ln(1) = 0$ y relación entre los parámetros de la recta $\ln(B) = \ln(a) + \ln(D)b$.

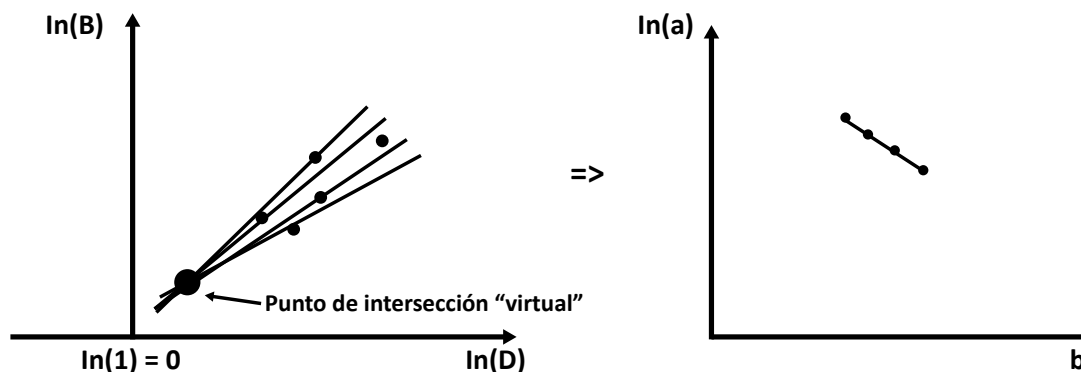


FIGURA 2. Espacio log-log de D-B para el caso de una sola especie donde las líneas generadas pasan por cada punto muestral y se interceptan en un punto común “virtual”.

Ajuste estadístico del modelo alométrico y métricas de error

El modelo potencial $Y = kX^z$ generalmente se ajusta mediante el uso de una transformación logarítmica:

$$\ln(Y) = \ln(k) + z\ln(X) \quad (24)$$

El espacio de la transformación logarítmica será usado en lo siguiente para analizar los métodos de estimación planteados, para evitar el problema de sesgos en las transformaciones inversas (Baskerville, 1972; Sprugel, 1983; Crow y Shimizu, 1988).

El modelo alométrico ajustado en el espacio log-log puede ser analizado en función de su pendiente e intersección (sesgo):

$$\ln(Y)_{estimado} = c + d \ln(Y)_{medido} \quad (25)$$

Adicional al uso del coeficiente de determinación R^2 en el espacio logarítmico, el ajuste estadístico de los modelos puede analizarse usando la raíz del error cuadrático medio (RECM), $S = \ln(Y)$:

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \hat{S}_i)^2} \quad (26)$$

y por el error absoluto medio (EAM), en porcentaje:

$$EAM = 100 \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - \hat{S}_i}{S_i} \right| \right\} \quad (27)$$

Bases de datos de mediciones de atributos de los árboles

En la tabla 1 se muestran las características de las bases de datos de D, H y B de las especies analizadas. Los datos fueron obtenidos de publicaciones en la literatura.

Las especies analizadas fueron seleccionadas para tener un nivel mínimo de diversidad de especies de diferentes tipos de bosques; aunque resulta claro que esto es solo una aproximación. Se buscó que las bases de datos seleccionadas cumplieran con el objetivo de tener un número de mediciones adecuado o cubrir un intervalo de medición representativo de los atributos de la especie.

En el caso de *Quercus phellus* L. (Parresol, 1999), los datos publicados de biomasa estaban en términos de materia verde, por lo que utilizaron los contenidos de humedad de Schlaegel (1981) para convertirlos a materia seca.

De las 690 mediciones disponibles, se eliminaron seis datos: cuatro por estar muy cercanos al punto de intersección “virtual” utilizado ($D = 0.6$ cm) y dos por ser considerados como datos anómalos (“outliers”).

TABLA 1. Bases de datos utilizadas para los análisis.

No.	Especie	Sitio	Lugar	No. Datos	D min (cm)	D max (cm)	H min (m)	H max (m)	B min (kg)	B max (kg)	Autor
1	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	Superior National Forest	Minnesota, USA	32	0.90	35.40	2.20	23.80	0.11	559.05	Woods, Feiveson y Botkin (1991)
2	<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.	Superior National Forest		31	2.90	23.00	2.90	19.95	0.96	204.61	Woods <i>et al.</i> (1991)
3	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	Cloquet Forestry Center	Minnesota, USA	15	7.10	23.10	10.10	20.00	6.55	121.19	Jokela, Shannon y White (1981)
4	<i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl. <i>et</i> Cham.	San Felipe Hidalgo Nanacamilpa	Tlaxcala, México	26	5.70	79.00	6.79	45.46	5.39	3,600.77	Avendaño Hernández, Acosta Mireles, Carrillo Anzures y Etchevers Barra (2009)
5	<i>Quercus magnoliaefolia</i> Née	R.B. Sierra de Huautla	Morelos, México	12	6.50	31.50	5.00	16.40	9.00	863.70	Gómez-Díaz, Etchevers-Barra, Monterrosos-Rivas, Campos-Alez y Tinoco-Rueda (2011)
6	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	Chicken Creek	Utah, USA	14	3.00	27.40	3.80	17.70	1.67	269.65	Johnston y Bartos, (1977)
7	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	Gros Ventre	Wyoming, USA	6	13.50	36.00	6.30	20.40	17.84	399.74	Johnston y Bartos, (1977)
8	<i>Quercus phellos</i> L.	Mississippi Delta	Mississippi, USA	39	21.80	80.50	18.30	35.10	196.29	3,709.89	Parresol, (1999) y Schlaegel, (1981)
9	<i>Pinus montezumae</i>	Sierra Nevada	Estado de México, México	15	7.20	65.90	3.99	36.05	5.25	4,485.98	Carrillo Anzúres, Acosta-Mireles, Flores-Ayala, Juárez-Bravo y Bonilla (2014)
10	<i>Rhamnus cathartica</i>	Southern and Southeastern Wisconsin	Wisconsin, USA	15	1.20	24.70	2.90	13.00	0.26	230.14	Mascaro y Schnitzer, (2011)
11	<i>Endospermum chinensis</i>	Kalimantan	Borneo Indone-siano	34	3.20	100.50	5.30	36.00	1.46	7,085.56	Manuri <i>et al.</i> (2016)



TABLA 1. Bases de datos utilizadas para los análisis. Continuación...

No.	Especie	Sitio	Lugar	No. Datos	D min (cm)	D max (cm)	H min (m)	H max (m)	B min (kg)	B max (kg)	Autor
12	<i>Paramichelia braianensis</i>	Kalimantan	Borneo Indone-siano	36	3.10	98.00	5.70	39.00	2.02	8,628.90	Manuri et al. (2016)
13	<i>Garuga pierrei</i>	Kalimantan	Borneo Indone-siano	40	4.20	93.00	5.90	38.00	2.55	9,658.18	Manuri et al. (2016)
14	<i>Schima superba</i>	Kalimantan	Borneo Indone-siano	33	3.40	84.50	3.40	33.00	1.84	8,315.20	Manuri et al. (2016)
15	<i>Parashorea stellata</i> Kurz	Kalimantan	Borneo Indone-siano	30	1.90	115.00	4.20	46.20	0.96	11,197.39	Manuri et al. (2016)
16	<i>Sinosideroxylon Bonii</i> .	Kalimantan	Borneo Indone-siano	30	1.80	114.30	3.30	33.80	0.60	8,879.06	Manuri et al. (2021)
17	<i>Pinus monophylla</i>	Nevada and Eastern California	Nevada y California, USA	76	0.40	115.60	1.40	14.00	0.33	3,137.20	Miller, Meeuwig y Budy (1981)
18	<i>Juniperus osteosperma</i>	Nevada and Eastern California	Nevada y California, USA	33	4.10	50.50	2.70	9.40	11.70	956.30	Miller et al. (1981)
19	<i>Olea europaea</i> L.	Manu Angetu Forest	Etiopia	30	3.00	80.00	3.00	18.00	9.08	1,971.39	Kebede y Soro-messa (2018)
20	<i>Laguncularia racemosa</i>	Bertioga	Sao Paulo, Brazil	46	0.60	20.00	1.20	12.10	0.10	193.25	Gomez Soares y Schaeffer-Novelli (2005)
21	<i>racemosa</i>	Guaratiba	Rio de Janeiro, Brazil	32	1.10	22.20	1.94	10.80	0.28	212.85	Gomez Soares y Schaeffer-Novelli (2005)
22	<i>Rhizophora mangle</i>	Bertioga	Sao Paulo, Brazil	33	1.30	19.40	1.80	11.40	0.32	310.23	Gomez Soares y Schaeffer-Novelli (2005)
23	<i>Rhizophora mangle</i>	Guaratiba	Rio de Janeiro, Brazil	32	1.50	22.00	1.90	15.10	0.35	279.71	Gomez Soares y Schaeffer-Novelli (2005)

RESULTADOS

Ajustes específicos

Cada base de datos (Tabla 1) se procesó para estimar los parámetros de las relaciones B-D, H-D y B-D²H, ecuaciones en el espacio transformado log-log. La tabla 2 muestra los parámetros estimados por regresión lineal ordinaria en el espacio log-log con sus coeficientes de determinación asociados a este espacio.

En la tabla 2 se muestran los parámetros de la relación (9) entre los exponentes, la cual se cumple bien (Fig. 3).

Para estimar los parámetros de las relaciones B-D²H, B-D y H-D, ecuaciones (1), (2) y (4), se definió un punto de intersección de las líneas ajustadas (ver esquema en la Fig. 2). El valor seleccionado fue $D = 0.6$, $\ln(D=0.6) = -0.511$, mismo valor usado también para D²H. El valor de B, relación (2), se estimó de la ecuación ajustada (Tabla 2) para cada base de datos, cuyos parámetros siguen el patrón mostrado en la figura 2. El valor de intersección $[\ln(0.6), \ln(a_d) + b_d \ln(0.6)]$, espacio B-D, fue usado para estimar los parámetros de las líneas analizadas en el espacio log-log al

usar cada dato de las bases (especies) analizadas, ya con dos puntos se definió la ecuación de la línea recta. Puesto que se conoció el punto de intersección (constante a_d), entonces solamente es necesario estimar b_d usando la relación (9), figura 3. La figura 4 muestra los resultados obtenidos por este procedimiento, donde el error de estimación es prácticamente nulo.

El problema asociado al proceso de estimación es que se requiere conocer la pendiente b_v , la cual generalmente no está disponible en las compilaciones de ecuaciones alométricas. Aun si se realiza una regresión forzando que $b_v = 1$, generalmente con errores cercanos a utilizar b_v variable, para estimar b_d de la relación (9) sin error, es necesario estimar a_d de la relación (7), por lo que se requiere conocer a_v .

Para tener un contexto de los resultados del uso de las ecuaciones alométricas específicas o locales, cuyos parámetros están mostrados en la tabla 2, la figura 5 muestra los errores de estimación, que en teoría es el mejor resultado posible de ajustes de modelos alométricos que toman en consideración cada caso (especie) en particular.

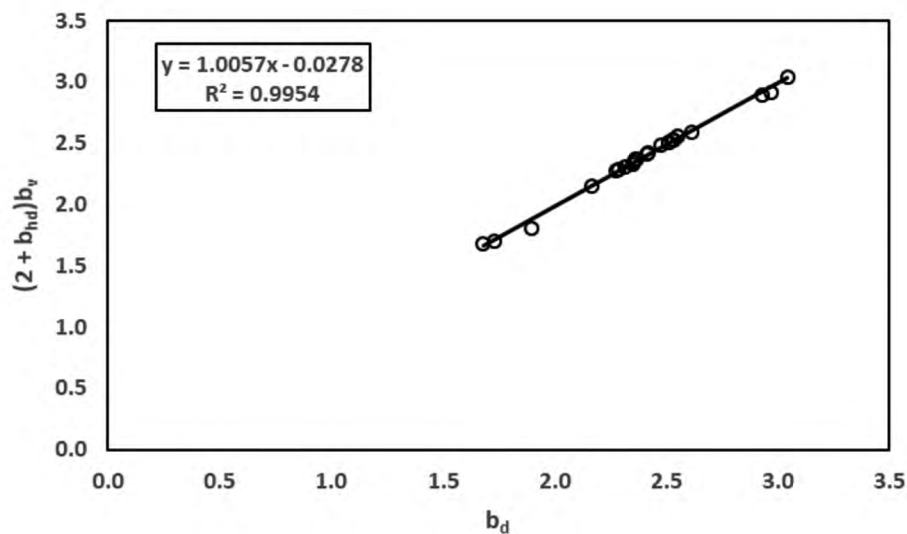


FIGURA 3. Relación (6) entre los exponentes para los datos de la tabla 1.



TABLA 2. Parámetros de las ecuaciones alométricas de las bases de datos de la tabla 1 obtenidos por regresión lineal en espacio log-log.

No.	Especie	$\ln(a_d)$	b_d	R^2	$\ln(a_{hd})$	b_{hd}	R^2	$\ln(a_v)$	b_v	R^2	$(2+b_{hd})b_v$
1	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	-2.2432	2.4151	0.9942	0.8896	0.6847	0.9784	-3.0423	0.8999	0.9953	2.4161
2	<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.	-2.2421	2.3574	0.9835	0.3162	0.8486	0.9071	-2.4748	0.8234	0.9826	2.3455
3	<i>Betula papyrifera</i> Marsh.	-2.5524	2.3707	0.9724	1.4260	0.4937	0.7649	-3.8972	0.9493	0.9814	2.3673
4	<i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl. et Cham.	-2.6404	2.5104	0.9934	0.7669	0.7109	0.9376	-3.3461	0.9256	0.9970	2.5092
5	<i>Quercus magnoliifolia</i> Née	-3.3674	2.9334	0.9764	0.6071	0.7101	0.7462	-3.9201	1.0680	0.9729	2.8944
6	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	-2.2057	2.3511	0.9979	0.6141	0.6458	0.8502	-2.6983	0.8806	0.9903	2.3299
7	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	-4.6386	2.9753	0.9847	0.0560	0.8026	0.6512	-4.5249	1.0414	0.9890	2.9186
8	<i>Quercus phellos</i> L.	-1.3714	2.1683	0.9775	2.2855	0.2595	0.3947	-3.5003	0.9537	0.9850	2.1549
9	<i>Pinus montezumae</i>	-4.3414	3.0466	0.9909	-0.3920	0.9667	0.9400	-3.9261	1.0256	0.9950	3.0426
10	<i>Rhamnus cathartica</i>	-1.7746	2.2899	0.9975	1.0937	0.4490	0.9145	-2.7893	0.9337	0.9976	2.2866
11	<i>Endospermum chinensis</i>	-2.5775	2.5157	0.9900	1.3511	0.4973	0.9011	-3.9190	1.0055	0.9906	2.5110
12	<i>Paramichelia braianensis</i>	-1.9040	2.4230	0.9825	1.4416	0.4766	0.8448	-3.3143	0.9784	0.9892	2.4231
13	<i>Garuga pierrei</i>	-2.2028	2.5313	0.9864	1.2999	0.5064	0.9232	-3.5200	1.0104	0.9907	2.5325
14	<i>Schima superba</i>	-2.2015	2.5343	0.9940	1.0465	0.5922	0.8933	-3.2089	0.9761	0.9970	2.5302
15	<i>Parashorea stellata</i> Kurz	-1.7687	2.3668	0.9882	1.1990	0.5512	0.9457	-2.8930	0.9289	0.9933	2.3698
16	<i>Sinosideroxylon Bonii</i> .	-1.6846	2.3168	0.9954	1.0820	0.5436	0.9118	-2.6448	0.9084	0.9944	2.3106
17	<i>Pinus monophylla</i>	-0.6502	1.8994	0.9500	0.4158	0.4593	0.8362	-0.6714	0.7352	0.9412	1.8081
18	<i>Juniperus osteosperma</i>	-0.2413	1.7348	0.8852	0.5871	0.3803	0.6388	-0.5615	0.7141	0.8619	1.6998
19	<i>Olea europaea</i> L. subsp. <i>cuspidata</i>	0.0856	1.6836	0.9381	0.7974	0.4715	0.7377	-0.4601	0.6815	0.9510	1.6843
20	<i>Laguncularia racemosa</i>	-2.3175	2.5558	0.9630	0.4546	0.7528	0.8411	-2.7431	0.9291	0.9792	2.5576
21	<i>Laguncularia racemosa</i>	-1.6683	2.2792	0.9863	0.8241	0.5705	0.8821	-2.3825	0.8836	0.9859	2.2713
22	<i>Rhizophora mangle</i>	-2.0156	2.6172	0.9911	0.4519	0.7370	0.8411	-2.391	0.9454	0.9821	2.5876
23	<i>Rhizophora mangle</i>	-1.6093	2.4810	0.9897	0.6247	0.7222	0.9370	-2.1785	0.9118	0.9900	2.4821

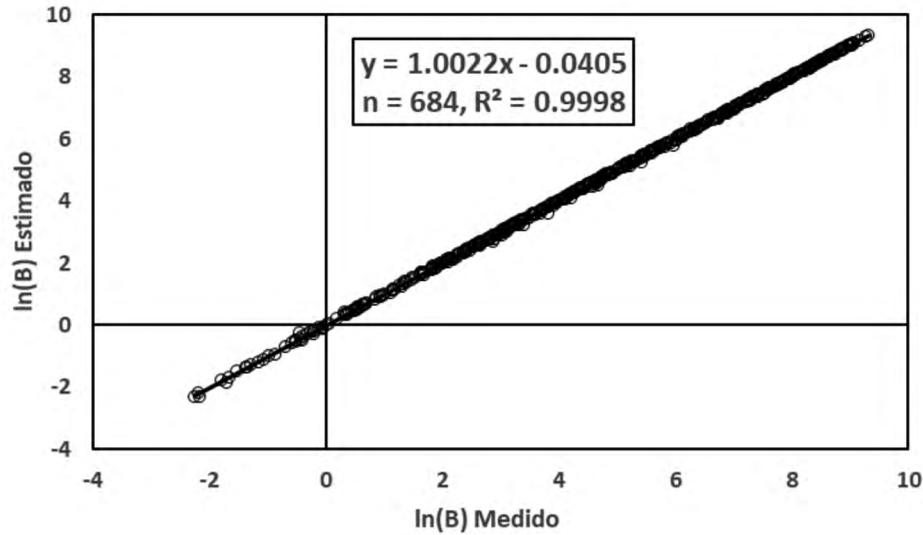


FIGURA 4. Estimaciones obtenidas usando el procedimiento introducido, caso de b_v conocido.

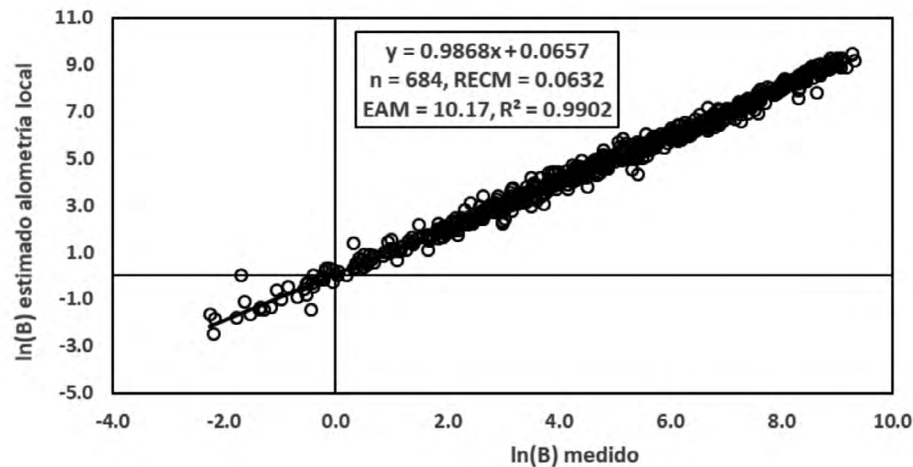


FIGURA 5. Estimaciones obtenidas usando ecuaciones alométricas específicas o locales.

Ajustes específicos con intersección común

Con base en la metodología mostrada en la figura 2, la figura 6 muestra la relación D-H para toda la base de datos, donde se estableció un punto de intersección general en $(-2.15, -0.65)$. Para cada par de datos se determinó su pendiente usando el dato del punto de intersección y los datos fueron ordenados de acuerdo con los valores de las pendientes para establecer líneas rectas $\ln(H) = a_{hd} + b_{hd}\ln(D)$, agrupando valores comunes de pendientes en forma no traslapada. La tabla 3 muestra los parámetros

de las líneas rectas definidas en el proceso, donde los ajustes estadísticos muestran pequeños errores de estimación.

Para cada línea recta entre $\ln(D) - \ln(H)$ ajustada a los datos de la figura 6 se ajustaron a estos datos líneas rectas entre $\ln(D) - \ln(B)$, $\ln(H) - \ln(B)$ y $\ln(D^2H) - \ln(B)$.

La figura 7 muestra la relación entre $\ln(a_d) - b_d$ de la relación $\ln(D) - \ln(B)$, que muestra un patrón con una zona de intersección común definiendo relaciones entre la intersección de las líneas $\ln(D) - \ln(H)$ con las líneas $\ln(D) - \ln(B)$.

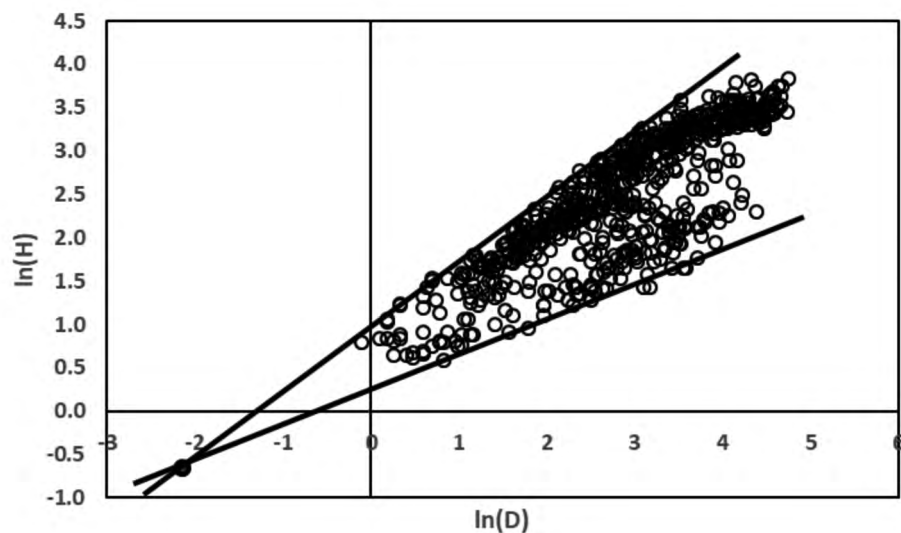


FIGURA 6. Relación $\ln(D) - \ln(H)$ para la base de datos completa, con un punto “virtual” de intersección de las líneas rectas.

TABLA 3. Parámetros de la relación $\ln(D) - \ln(H)$ de la figura 6.

No.	$\ln(a_{dh})$	b_{dh}	R^2
1	-0.2330	0.3960	0.9793
2	-0.2546	0.4271	0.9901
3	-0.2993	0.4606	0.9922
4	0.3633	0.4740	0.9970
5	0.4240	0.4876	0.9979
6	0.5161	0.4775	0.9953
7	0.5076	0.5554	0.9949
8	0.5539	0.5969	0.9945
9	0.6236	0.6450	0.9970
10	0.6324	0.7230	0.9989
11	0.7656	0.6476	0.9981
12	0.7823	0.6691	0.9988
13	0.8175	0.6842	0.9989
14	0.8608	0.6933	0.9988
15	0.9184	0.7030	0.9973
16	0.9675	0.7284	0.9976

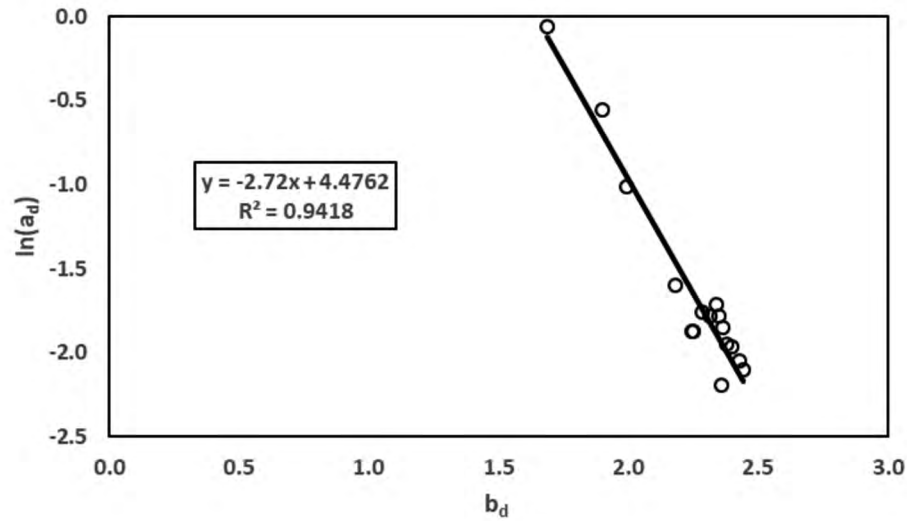


FIGURA 7. Relación entre b_d y $\ln(a_d)$ para las líneas $\ln(D) - \ln(B)$ asociadas a líneas $\ln(D) - \ln(H)$

Con los parámetros estimados de las líneas asociados a cada relación $\ln(D) - \ln(H)$, se realizó un ajuste por regresión multivariada lineal con interacciones para estimar b_d :

$$b_{d\text{est}} = 111.56 + 0.258a_{dh} - 108.35b_{dh} + 43.76\ln(b_{dh}) + 71.84b_{dh}\ln(b_{dh}) \quad (28)$$

con $R^2 = 0.974$, error estándar = 0.0418.

En vez de utilizar los valores de b_d medidos se utilizaron los valores b_d estimados por regresión para estimar $\ln(ad)$:

$$\ln(a_d)\text{est} = 5.411 + 1.998b_{dh} - 3.655b_{d\text{est}} \quad (29)$$

con $R^2 = 0.953$, error estándar = 0.137

La figura 8 muestra los resultados del proceso de estimación con el uso de $\ln(a_d)$ y b_d estimados, donde se observaron errores de estimación dentro del intervalo esperado.

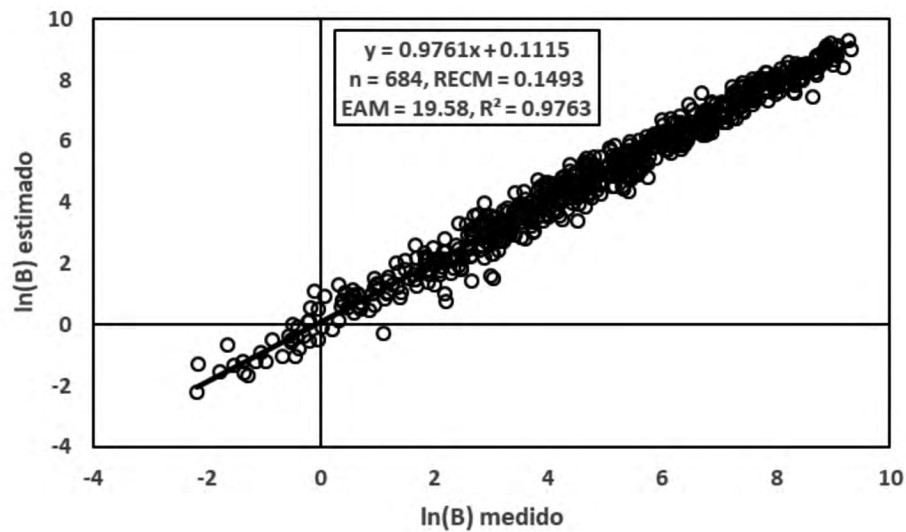


FIGURA 8. Estimación de $\ln(B)$ usando $\ln(a_d)$ y b_d estimados por el proceso del punto de intersección “virtual” en el espacio $\ln(D) - \ln(H)$.



La figura 9 muestra que los coeficientes de determinación (R^2) asociados a las líneas rectas entre $\ln(D)$ y $\ln(H)$ para las relaciones entre $\ln(D) - \ln(B)$, o $\ln(D^2H) - \ln(B)$, y $\ln(H) - \ln(B)$, tuvieron patrones directamente proporcionales. Esto implica que las estimaciones de la figura 8 tienen mayores errores cuando los patrones $\ln(B) = \ln(a_d) + b_d \ln(D)$ o $\ln(B) = \ln(a_h) + b_h \ln(H)$ tuvieron mayores errores en los ajustes. De acuerdo con estos resultados, es necesaria la búsqueda de un punto “virtual” de intersección que permita que las líneas rectas entre $\ln(D)$ y $\ln(H)$ tengan asociadas líneas rectas con valores altos de R^2 .

Para analizar los errores asociados a las líneas rectas $\ln(D) - \ln(H)$, en la figura 10 se muestra el patrón entre

$\ln(H) - \ln(B)$, en donde se definió un punto de intersección “virtual” dado por $(-0.1, -5.7)$. El proceso de selección de datos para estimar los parámetros de las líneas rectas fue similar al caso del patrón $\ln(D) - \ln(H)$. La tabla 4 muestra los parámetros ajustados a las líneas rectas $\ln(H) - \ln(B)$, donde se observan valores de R^2 superiores a 0.99, implicando errores de estimación mínimos.

La figura 11 muestra la relación entre los coeficientes de determinación (R^2) ajustados a los datos de las líneas rectas $\ln(H) - \ln(B)$, donde se observa que los errores en las rectas $\ln(H) - \ln(B)$ son directamente proporcionales a los de las rectas $\ln(D) - \ln(H)$.

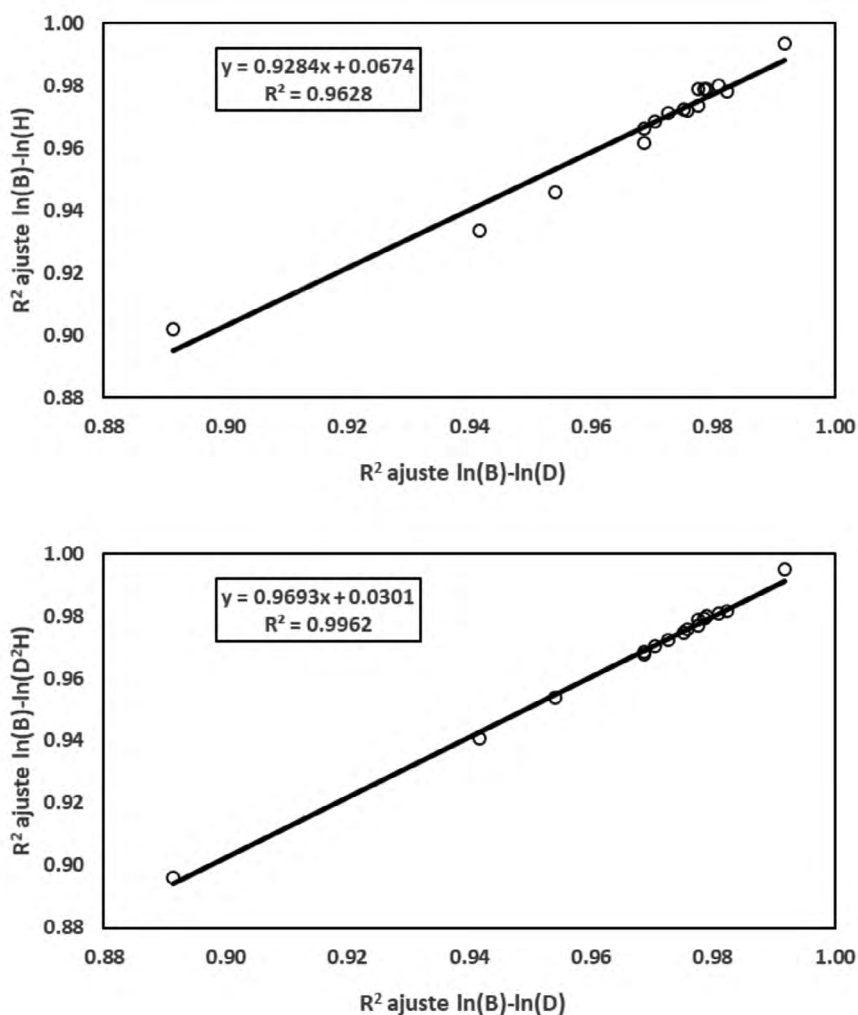


FIGURA 9. Relación entre los coeficientes de determinación (R^2) ajustados a los datos de las líneas rectas $\ln(D) - \ln(H)$.

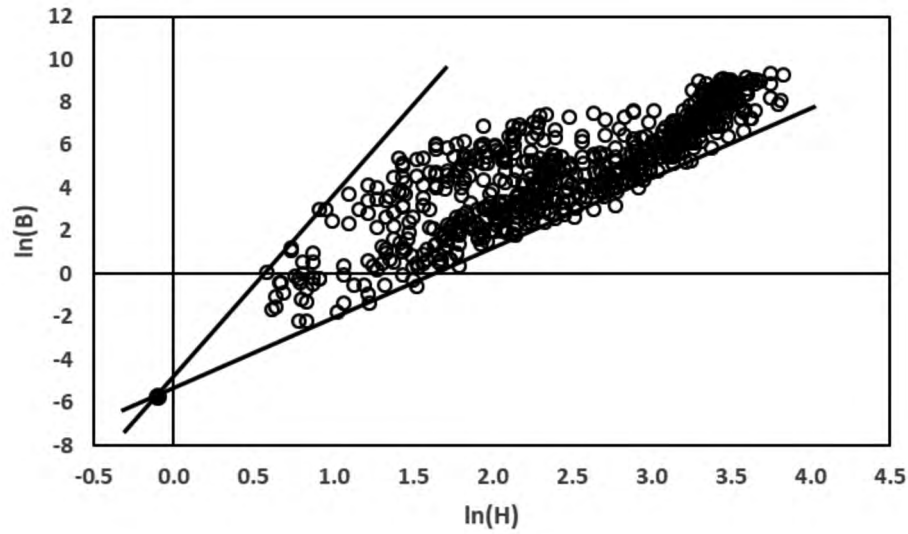


FIGURA 10. Relación $\ln(H) - \ln(B)$ para toda la base de datos con un punto “virtual” de intersección de líneas rectas.

TABLA 4. Parámetros de la relación $\ln(H) - \ln(B)$ de la figura 10.

No.	$\ln(a_h)$	b_h	R^2
1	-5.2416	3.1138	0.9974
2	-5.2853	3.3314	0.9936
3	-5.4226	-3.5267	0.9972
4	-5.3600	3.6450	0.9969
5	-5.3992	3.8109	0.9975
6	-5.2451	3.9096	0.9976
7	-5.2432	4.0539	0.9981
8	-5.1441	4.1616	0.9986
9	-5.1807	4.3577	0.9965
10	-5.1933	4.5428	0.9979
11	-5.1139	4.6436	0.9990
12	-5.0875	4.8021	0.9983
13	-5.1768	5.0193	0.9988
14	-5.1612	5.1602	0.9978
15	-5.1214	5.3039	0.9990
16	-5.0341	5.4199	0.9975
17	-5.1181	5.6134	0.9991
18	-5.1367	5.7809	0.9985
19	-5.2114	6.0145	0.9989
20	-5.1749	6.1769	0.9996
21	-5.1259	6.3103	0.9995
22	-4.9907	6.3088	0.9996
23	-5.3181	6.7818	0.9984
24	-5.1224	6.7715	0.9975
25	-5.0143	6.8791	0.9999
26	-5.1740	7.1756	0.9996
27	-4.5704	7.0984	0.9993
28	-4.2492	7.2721	0.9990
29	-4.8554	8.4007	0.9916

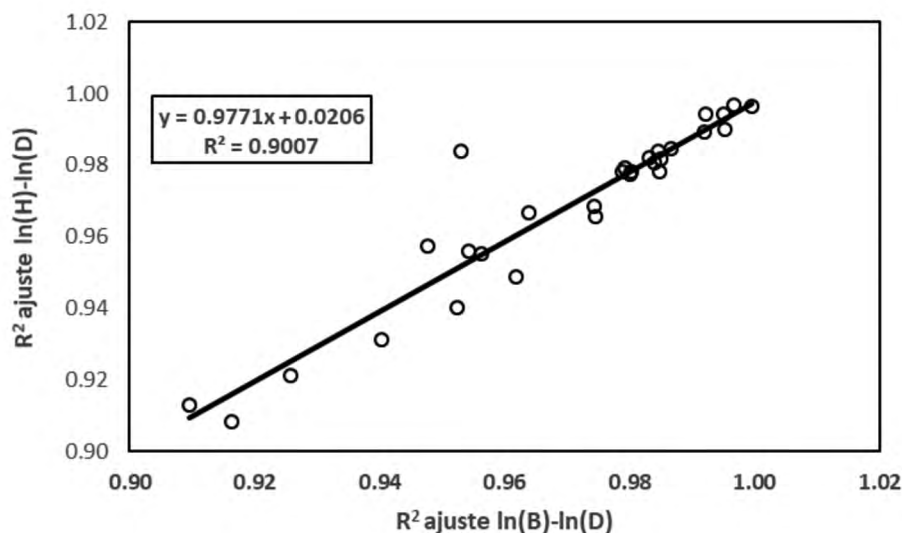


FIGURA 11. Relación entre los coeficientes de determinación (R^2) ajustados a los datos de las líneas rectas $\ln(B) - \ln(D)$ y $\ln(H) - \ln(D)$.

Ajustes generales

La situación de desarrollar una ecuación alométrica general para todas las bases de datos está mostrada en la figura 12 (espacio normal). El uso de la relación de la figura 12 para todos los datos genera estimaciones y errores asociados, tal como se muestra en la figura 12. Es claro que, a menos que la dispersión de datos en el espacio B-D o B-D²H sea pequeña, el uso de ecuaciones específicas o locales resulta en menores errores de estimación que el caso de usar una ecuación alométrica general para todas las especies.

A partir del punto de intersección (-0.511, -3.4) en el espacio $\ln(D)-\ln(B)$, es posible definir un valor constante para b_d y estimar la biomasa aérea total. El problema de esta aproximación es que los valores óptimos (minimización del error de estimación) tienen diferentes patrones que dependen del valor de b_d . Para valores de b_d mayores de 2 y hasta un valor aproximado de 3, la figura 13 muestra los resultados obtenidos con $b_v = 2.45$, así como las estimaciones usando una ecuación alométrica general caso de las 20 bases de datos que cumplen la restricción en b_d ; (Tabla 2). Se observa en la figura 13 que los errores de estimación del uso de b_d fija (optimizada) fueron similares al caso de uso de un modelo alométrico general.

La figura 14 muestra los resultados de la estimación para el caso de bases de datos con b_d menor que 2 y mayor

a 1.65. El valor de b_d estimado fue de 1.95 minimizando el error de estimación. En la misma figura se muestra el uso de una relación alométrica general donde los errores de estimación son comparables con el caso $b_d = 1.95$.

Ajustes generales con intersección común

Para generalizar el enfoque al considerar un exponente como fijo o variable es necesario replantear el problema de estimación para el uso de la relación entre la constante a_d y el exponente b_d definido por la ecuación (17).

La figura 15 muestra la relación entre $\ln(a_d)$ y b_d para todas las bases de datos de la tabla 2, donde se observa una relación lineal congruente con lo esperado, ecuación (17), usando un valor de $q_x = 1$ (D en cm) en la ecuación (23). En la misma figura 15 se observa el caso de usar $q_x = 10^4$, donde en la relación entre $\ln(a_d)$ y b_d se mejora en su correlación.

Usando la relación de la figura 15 para $q_x = 10^4$ (D en cm multiplicado por 10^4) para estimar $\ln(a_d)$ en función de b_d [$= (2 + b_{hd})b_v$] y con $b_v = 0.915$, valor óptimo de minimizar el error de estimación, la figura 16 muestra los resultados obtenidos, los cuales son mejores que los del uso de una ecuación alométrica generalizada (Fig. 12), esto es alentador, dado que solo se utilizó información de la relación H-D, b_{hd} que considera condiciones locales.

Ajustes generales con relaciones empíricas

Un método alternativo de estimación es la utilización directa de relaciones empíricas para estimar $\ln(a_d)$ y b_d ,

con los parámetros $\ln(a_h)$ y b_{hd} . Para esto, se pueden definir variables que contengan información sobre b_d , b_h y b_v , además de $\ln(a_d)$, $\ln(a_h)$ y $\ln(a_v)$:

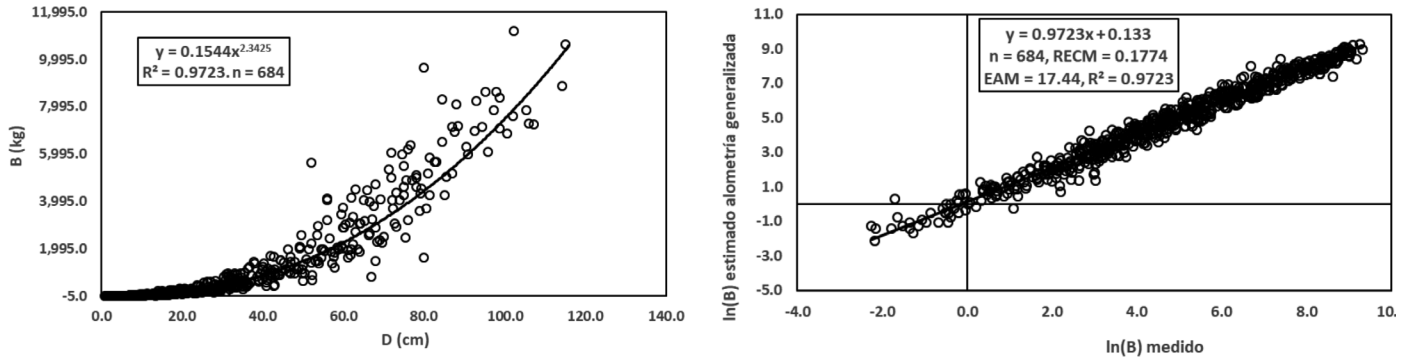


FIGURA 12. Modelo alométrico ajustado a todos los datos (izquierda) y transformación logarítmica con errores de estimación al usar el modelo alométrico generalizado (derecha).

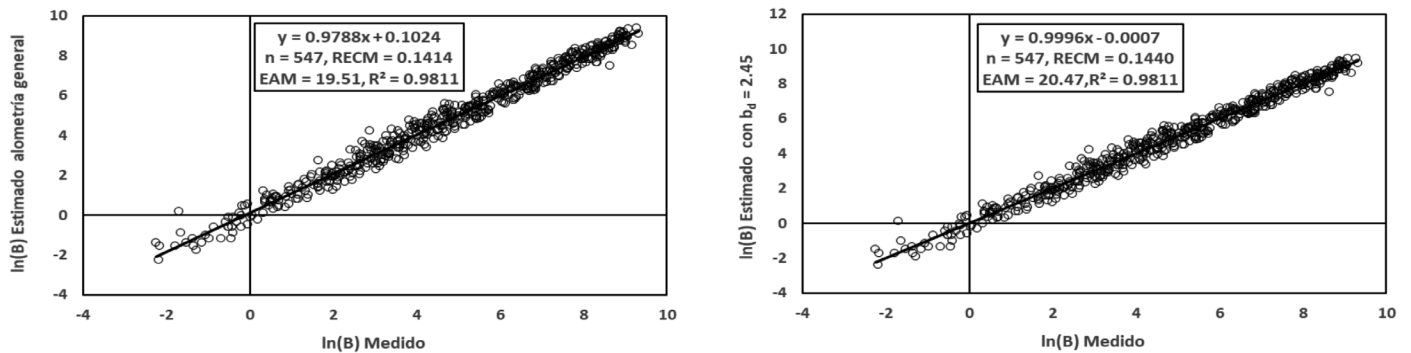


FIGURA 13. Errores de estimación para el caso b_d mayor de 2 y menor a 3.1 para un modelo alométrico general (izquierda) y el uso de $b_d = 2.45$.

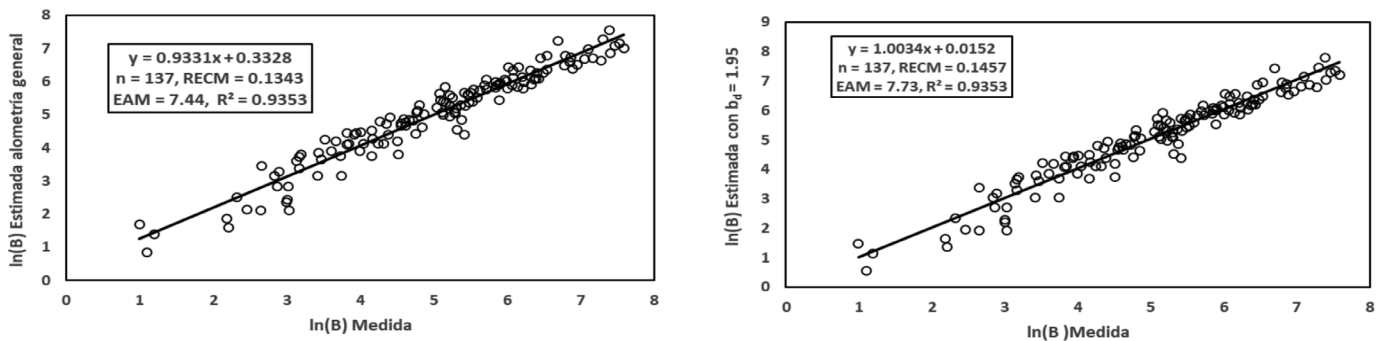


Figura 14. Errores de estimación para el caso b_d menor de 2 y mayor de 1.65 para un modelo alométrico general (izquierda) y el uso de $b_d = 1.95$ (derecha).

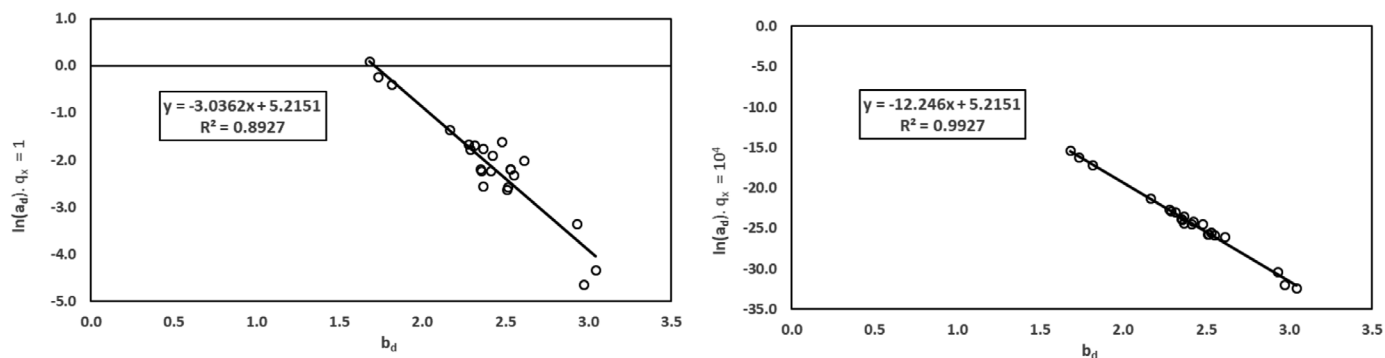


FIGURA 15. Relación entre $\ln(a_d)$ y b_d para $q_x = 1$ (izquierda) y $q_x = 10^4$ (derecha), de la relación (23).

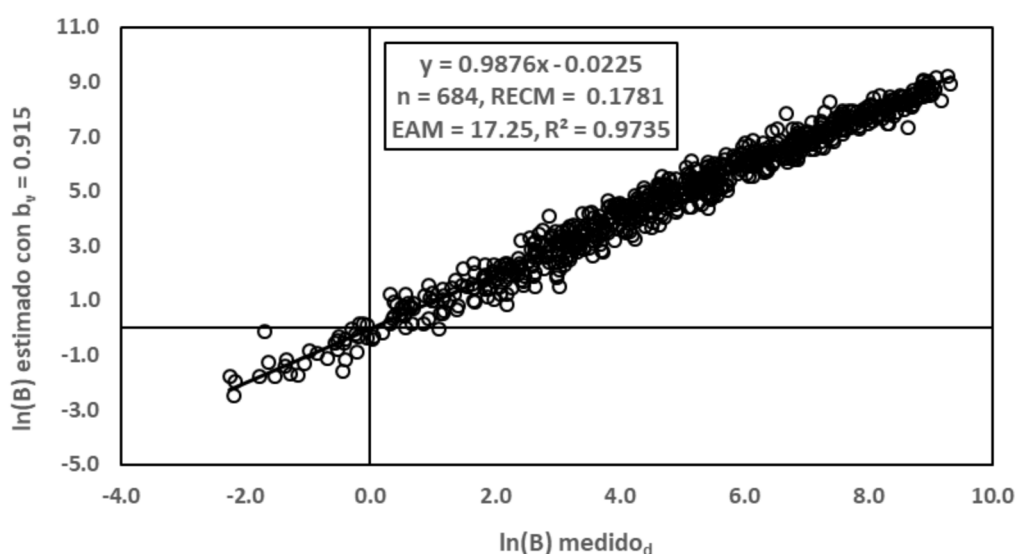


FIGURA 16. Resultado de las estimaciones usando la relación entre $\ln(a_d)$ - b_d para $q_x = 10^4$ y $b_v = 0.915$.

$$A = b_{vd} = \frac{b_d}{b_v} = 2 + b_{hd} \quad (30)$$

$$B = b_{vh} = \frac{b_h}{b_v} = 1 + \frac{2}{b_{hd}} \quad (31)$$

$$C = \frac{b_{vd}}{b_{vh}} = \frac{b_d}{b_h} = b_{hd} \quad (32)$$

$$D = \ln(a_{vd}) = \frac{1}{b_v} [\ln(a_d) - \ln(a_v)] \quad (33)$$

$$E = \ln(a_{vh}) = \frac{1}{b_v} [\ln(a_h) - \ln(a_v)] \quad (34)$$

$$F = \ln(a_{hd}) - \ln(a_{vh}) = \frac{1}{b_v} [\ln(a_d) - \ln(a_h)] \quad (35)$$

Con el uso de estas variables se utilizaron regresiones multivariadas lineales con interacción para estimar b_d y $\ln(a_d)$:

$$b_{dest} = 4.267 - 0.486B - 0.179F + 0.129B * D - 0.03365E * F \quad (36)$$

con $R^2 = 0.819$, error estándar = 0.16.

$$\ln(a_{dest}) = -7.304 + 1.388B - 0.847E - 0.329B * D + 0.146E * F \quad (37)$$

con $R^2 = 0.858$, error estándar = 0.448

La relación entre ambas variables está dada por $[b_d \text{ est}] = 1.77 - 0.3048[\ln(a_d) \text{ est}]$, $R^2 = 0.9653$, que implica una zona común de intersección.

La figura 17 muestra las estimaciones de $\ln(B)$ utilizando b_d de la ecuación (36) y la relación entre $\ln(a_d)-b_d$ para $q_x = 1$ (Fig. 15), donde se observan estimaciones con

error menor que en el caso de usar una regresión generalizada.

Finalmente, la figura 18 muestra las estimaciones de $\ln(B)$ usando las relaciones (36) y (37) para b_d y $\ln(a_d)$, donde el error de estimación es mejor que el caso anterior.

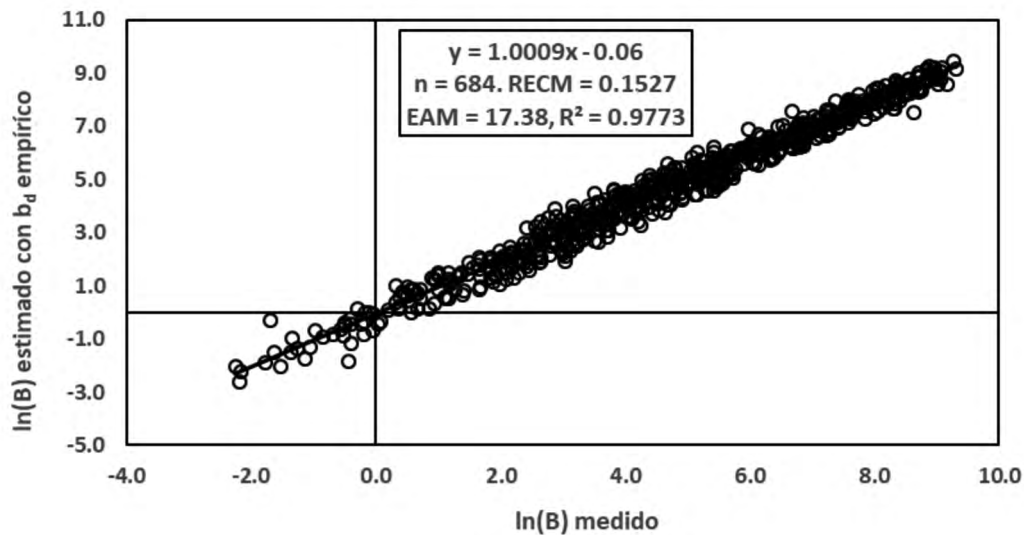


FIGURA 17. Resultado de las estimaciones usando la relación entre $\ln(a_d)-b_d$ para $q_x = 1$ y b_d estimado de la ecuación (36).

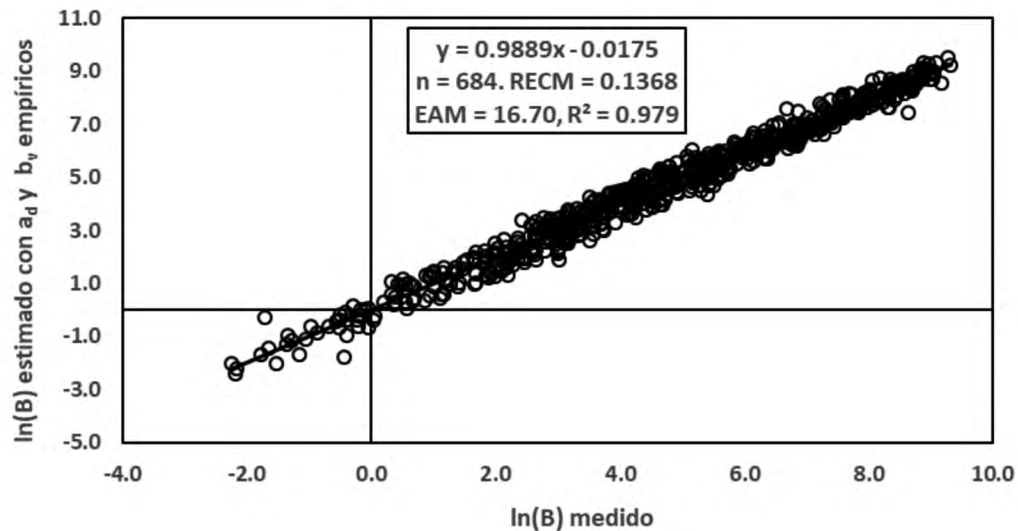


Figura 18. Resultado de las estimaciones usando b_d estimado de la ecuación (36) $\ln(a_d)$ de la ecuación (37).



DISCUSIÓN

El uso de ecuaciones alométricas generalizadas multiespecies o monoespecies con multisitios (Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2005 y 2014; Feldpausch *et al.*, 2012) ha sido criticado como no representativo de especies o sitios (zonas) locales (van Breugel, Ransijn, Craven, Bongers y Hall, 2011; Ngomanda *et al.*, 2013; Paul *et al.*, 2016). Del análisis de la figura 12 resulta claro que, si la dispersión del patrón asociado a las mediciones de B y D es alta, las ecuaciones específicas o locales son la mejor opción de estimación.

La variable altura total (H) de los árboles y su relación con el diámetro normal (D) utilizada en el proceso de estimación propuesto muestra alta variabilidad. La relación H-D ha sido discutida como altamente dependiente del medio ambiente (tipo de suelo, topografía, competencia, así como de otros factores del medio ambiente) (Pretzsch y Dieler, 2012; Antin, Péliissier, Vincent y Couteron, 2013; Fayolle *et al.*, 2016), por lo que es importante considerar otras variables que se pueden medir en el campo para establecer relaciones presentadas en este trabajo. En esta perspectiva, el uso de los atributos de la copa de los árboles en lugar de la altura total podría presentar mejores estimaciones de la biomasa aérea total (Goodman, Phillips y Baker, 2014; Ploton *et al.*, 2016). Al respecto, Pretzsch y Dieler (2012) y Antin *et al.* (2013) presentaron evidencia de que los atributos de la copa, principalmente su volumen, son más estables ante variaciones del medio ambiente.

El uso de modelos alométricos generales debe ser orientado a conjuntos de especies con parámetros a_d y b_d similares (Jenkins *et al.*, 2003; Muukkonen, 2007; Chojnacky *et al.*, 2014), lo que implica generar un sistema de clasificación de especies con patrones similares. No obstante este planteamiento, es común encontrar fuerte dispersión en los datos B y D en una misma especie medida en diferentes sitios (Méndez *et al.*, 2012).

La tendencia actual de solo seleccionar modelos alométricos con el menor error de estimación, dependiente de la métrica de error usada (Goodman *et al.*, 2014; Picard, Boyemba y Rossi, 2015a), plantea un escenario con sesgos

en la generalización del proceso de estimación, ya que solo considera un modelo de predicción (B-D o B-D²H). De acuerdo con los desarrollos presentados, es necesario que las compilaciones de ecuaciones alométricas considere modelos B-D, B-D²H y H-D, al menos para poder utilizar el marco teórico desarrollado y hacer estimaciones en función de las relaciones entre los exponentes de los modelos y las constantes y exponentes de un modelo.

CONCLUSIONES

Los métodos introducidos basados en la relación entre los exponentes de los modelos alométricos B-D²H, B-D y H-D, además de la relación entre las constantes y los exponentes de cada modelo, permite aproximar ecuaciones alométricas generalizadas, multiespecies y monoespecies en multisitios con errores de estimación comparables o mejores a los obtenidos con métodos estadísticos convencionales.

El desarrollo de ecuaciones generalizadas puede ser realizado con los métodos presentados basados solo en información de los datos D-H, medidos comúnmente en campo, sin la necesidad de contar con información de la biomasa aérea total (B). Este enfoque permite contar con un modelo aproximado generalmente con errores de estimación iguales o menores que el procedimiento clásico de generar ecuaciones usando ajustes estadísticos (Chave *et al.*, 2014; Feldpausch *et al.*, 2012).

Los resultados obtenidos a partir de las relaciones entre el diámetro normal y la altura total de los árboles plantean la necesidad de considerar variables más estables y con menor dependencia del medio ambiente, tales como los atributos de la corona de los árboles. Este enfoque será explorado en otras contribuciones de los autores.

REFERENCIAS

- Antin, C., Péliissier, R., Vincent, G., & Couteron, P. (2013). Crown allometries are less responsive than stem allometry to tree size and habitat variations in an Indian monsoon forest. *Trees*, 27, 1485-1495. doi: 10.1007/s00468-013-0896-7

- Avendaño Hernández, D. M., Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., & Etchevers Barra, J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 32(3), 233-238. doi: 10.35196/rfm.2009.3.233-238
- Baskerville, G. L. (1972). Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forestry*, 2(1), 49-53. doi: 10.1139/x72-009
- Brown, S., Gillespie, A. J. R., & Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35(4), 881-902. doi: 10.1093/forestscience/35.4.881
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass change of tropical forests, a primer*. Forest Resources Assessment Publication. Roma: Forestry Papers 134, FAO. 134 p.
- Carré, F., Hiederer, R., Blujdea, V., & Koeble, R. (2010). *Background guide for the calculation of land carbon stocks in the biofuel's sustainability scheme drawing on the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. EUR 24573 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 109 p.
- Carrillo Anzures, F., Acosta-Mireles, M., Flores-Ayala, E., Juárez-Bravo, J. E., & Bonilla, E. P. (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
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 359(1443), 409-420. doi: 10.1098/rstb.2003.1425
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. S., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C. M., Saldarriaga, J. G., & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. doi: 10.1111/gcb.12629
- Chojnacky, D. C., Heath, L.S. & Jenkins, J.C. (2014). Updated generalized biomass equations for North American tree species. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 87(1), 129-151. doi: 10.1093/forestry/cpt053
- Clark, D. B., Clark, D. A., & Read, J. M. (1998). Edaphic variation and the mesoscale distribution of tree species. *Forest Ecology and Management*, 86(1), 101-112. doi: 10.1046/j.1365-2745.1998.00238.x
- Crow, E. L., & K. Shimizu. (1988). *Lognormal distributions. Theory and applications*. New York: Dekker.
- De Castilho, C. V., Magnusson, W. E., Nazaré, R., Araújo, O., Luizão, R. C. C., Luizão, F., Lima, A. P., & Higuchi, N. (2006). Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian forest: effects of soils and topography. *Forest Ecology and Management*, 234(1), 85-96. doi: 10.1016/j.foreco.2006.06.024
- Djomo, A. N., Ibrahima, A., Saborowski, J., & Gravenhorst, G. (2010). Allometric equations for biomass estimation in Cameroon and pan moist tropical equation including biomass data from Africa. *Forrest Ecology and Management*, 260(10), 1873-1885. doi: 10.1016/j.foreco.2010.08.034
- Fayolle, A., Loubota Panzou, G. J., Drouet, T., Swaine, M. D., Bauwens, S., Vleminckx, J., Biwolé, A., Lejeune, P., & Doucet, J. L. (2016). Taller trees, denser stands and greater biomass in semi-deciduous than in evergreen lowland central African forests. *Forest Ecology and Management*, 374, 42-50. doi: 10.1016/j.foreco.2016.04.033
- Fehrmann, L., & Kleinn, C. (2006). General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 236, 4112-421. doi: 10.1016/j.foreco.2006.09.026



- Feldpausch, T. R., L. Banin, O. L. Phillips, T. R. Baker, S. L. Lewis, C. A. Quesada, K. Affum-Baffoe, E. J. M. M. Arets, N. J. Berry, M. Bird, E. S. Brondizio, P. de Camargo, J. Chave, G. Djangbletey, T. F. Domingues, M. Drescher, P. M. Fearnside, M. B. França, N. M. Fyllas, G. Lopez G., A. Hladik, N. Higuchi, M. O. Hunter, Y. Iida, K. A. Salim, A. R. Kassim, M. Keller, J. Kemp, D. A. King, J. C. Lovett, B. S. Marimon, B. H. Marimon Jr., E. Lenza, A. R. Marshall, D. J. Metcalfe, E. T. A. Mitchard, E. F. Moran, B. W. Nelson, R. Nilus, E. M. Nogueira, M. Palace, S. Patiño, K. S. H. Peh, M. T. Raventos, J. M. Reitsma, G. Saiz, F. Schrodte, B. Sonké, H. E. Taedoumg, S. Tan, L. White, H. Wöll and J. Lloyd. (2011). Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences* 8: 1081-1106.
- Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Lewis, S. L., Brien, R. J. W., Gloor, M., Monteagudo, M., Lopez-Gonzalez, Banin, L., Abu, K. S., Affum-Baffoe, K. B., Alexiades, M., Almeida, S., Amaral, I., Andrade, A., Aragão, L., Araujo Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., Aymard, G. A., Baker, T. R., Bánki, O. S., Berry, N. J., Cardozo, N., Chave, J., Comiskey, J. A., Alvarez, E., de Oliveira, A., Di Fiore, A., Djangbletey, G., Domingues, T. E., Erwin, T. L., Fearnside, P. M., França, M. B., Freitas, M. A., Higuchi, N., Honorio, E., Iida, Y., Jiménez, E., Kassim, A. R., Killeen, T. J., Laurance, W. F., Lovett, J. C., Malhi, Y., Marimon, B. S., Marimon-Junior, B. H., Lenza, E., Marshall A. R., Mendoza, C., Metcalfe, D. J., Mitchard, E. T. A., Neill, D. A., Nelson, B. W., Nilus, R., Nogueira, E. M., Parada, A., Peh, K. S. H., Pena, A. C., Peñuela, M. C., Pitman, N. C. A., Prieto, A., Quesada, C. A., Ramírez, F., Ramírez-Angulo, H., Reitsma, J. M., Ridas, A., Saiz, G., Salomão, R. P., Schwarz, M., Silva, N., Silva-Espejo, J., Silveira, M., Sonké, B., Stropp, J., Taedoumg, H. E., Tan, S., Teer Steege, H., Terborgh, J., Torello-Raventos, M., van der Heijden, G. M. F., Vásquez, R., Vilanova, E., Vos, V. A., White, L., Willcock, S., Woell, H., & Phillips, O. L. (2012). Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9(8), 3381-3403. doi: 10.5194/bg-9-3381-2012
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, H. O. & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 1-13. doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045023
- Gómez-Díaz, J. D., Etchevers-Barra, J. D., Monterrosos-Rivas, A. L., Campo-Alvez, J., & Tinoco-Rueda, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 261-272. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.11.117
- Gomes-Soares, M. L., & Schaeffer-Novelli, Y. (2005). Above-ground biomass of mangrove species I. Analysis of models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65(1-2), 1-18. doi: 10.1016/j.ecss.2005.05.001
- Goodman, R. C., Phillips, O. L. & Baker, T. R. (2014). The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecological Applications*, 24(4), 680-698. doi: 10.1890/13-0070.1
- Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R. J., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint-André, L. (2011). Estimating tree biomass of Sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45(3B), 477-569. doi: 10.14214/sf.38
- Hersh, A. H. (1931). Facet number and genetic growth constants in bar-eyed stocks of *Drosophila*. *The Journal of Experimental Zoology*, 60(2), 213-248. doi: 10.1002/jez.1400600204
- Hulshof, C. M., Swenson, N. G., & Weiser, M. D. (2015). Tree height-diameter allometry across United States. *Ecology and Evolution*, 5(6), 1193-1204. doi: 10.1002/ece3.1328
- Jenkins, J. C., Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Birdsey, R. A. (2003). National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, 49(1), 12-35. doi: 10.1093/forestscience/49.1.12
- Johnston, R. S., & Bartos, D. L. (1977). *Summary of nutrient and biomass data from two Aspen sites in Western United States. Research Note INT-227*. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Utah, Ogden: USDA Forest Service. 15 p.

- Jokela, E. J., Shannon, C. A., & White, E. H. (1981). Biomass and nutrient equations for mature *Betula papyrifera* Marsh. *Can. J. For. Res.*, 11(2), 298-304. doi: 10.1139/x81-040
- Kebede, B., & Soromessa, T. (2018). Allometric equations for aboveground biomass estimation of *Olea europaea* L. subsp. *Cuspidata* in Mana Angetu Forest. *Ecosystem Health and Sustainability*, 4(1), 1-12. doi: 10.1080/20964129.2018.1433951
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1-3), 199-209. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00460-6
- Kindermann, G., Obersteiner, M., Sohngen, B., Sathaye, J., Andrasko, K., Rametsteiner, E., Schlamadinger, B., Wunder, S., & Beach, R. (2008). Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(30), 10302-10307. doi: 10302-10307
- Lines, E. R., Zavala, M. A., Purves, D. W., & Coomes, D. A. (2012). Predictable changes in aboveground allometry of trees along gradients of temperature, aridity and competition. *Global Ecology and Biogeography*, 21(10), 1017-1028. doi: 10.1111/j.1466-8238.2011.00746.x
- Lumer, H. (1936). The relation between b and k in systems of relative growth functions of the form $Y = bX^k$. *The American Naturalist*, 70, 188-191.
- Lumer, H. (1939). The dimensions and interrelationship of the relative growth constants. *American Naturalist*, 73, 339-345.
- Lumer, H., Anderson, B. G., & Hersh, A. H. (1942). On the significance of the constant b in the law of allometry $Y=bX^a$. *American Naturalist*, 76, 364-375.
- Manuri, S., Brack, C., Noor'an, F., Rusolono, T., Anggraini, S. M., Dotzauer, H., & Kumara, I. (2016). Improved allometric equations for tree aboveground biomass estimation in tropical dipterocarp forests of Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecosystems*, 3(28), 1-10. doi: 10.1186/s40663-016-0087-2
- Mascaro, J., & Schnitzer, S. A. (2011). Dominance by the introduced tree *Rhamnus cathartica* (common buckthorn) may limit aboveground carbon storage in Southern Wisconsin forests. *Forest Ecology and Management*, 261(3), 545-550. doi: 10.1016/j.foreco.2010.11.005
- Méndez, G., J., Turlan, O. A., Ríos, J. C. S., & Nájera, J. A. L. (2012). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Humb. and Bonpl. Ex Willd.) M. C. Johnst. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 57-72.
- Miller, E. L., Meeuwig, R. O & Budy, J. D. (1981). *Biomass of singleleaf Pinyon and Utah Juniper*. Research Paper INT-273. Intermountain Forest and Range Experimental Station. Utah, Ogden: USDA Forest Service. 19 p.
- Molto, Q., Rossi, V., & Blanc, L. (2013). Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 175-183. doi: 10.1111/j.2041-210x.2012.00266.x
- Muukkonen, P. (2007). Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 126(2), 157-166. doi: 10.1007/s10342-007-0168-4
- Návar, J. J. (2010a). Biomass allometry for tree species of Northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(3), 507-517.
- Návar, J. J. (2010b). Measurement and assessment methods of forest aboveground biomass: a literature review and challenges ahead. En: M. Momba & F. Bux. *Biomass. Intech*. Sciyo, Croatia.
- Návar, J., Ríos, J. S., Pérez, G. V., de J. Rodríguez, F., & Domínguez, P. A. (2013). Regional aboveground biomass equations for North American arid and semi-arid forests. *Journal of Arid Environments*, 97, 127-135. doi: 10.1016/j.jaridenv.2013.05.016
- Ngomanda, A., Engone, N. L., Lebamba, J., Moundounga, Q., Gomat, H., Sidoine Mankou, G., Loumeto, J., Midoko, D., Kossi, F., Zinga, R., Botsika, K. H., Mikala, C., Nyangadouma, R., Lépengué, N., Mbatchesi, B., & Picard, N. (2013). Site-specific versus pantropical allometric equations: which option to estimate the biomass of a



- moist central African forest? *Forest Ecology and Management*, 312, 1-9. doi: 10.1016/j.foreco.2013.10.029
- Nickless, A., Scholes, R. J., & Archibald, S. (2011). A method for calculating the variance and confidence intervals for tree biomass estimates obtained from allometric equations. *South African Journal of Sciences*, 107(5-6), 86-95. doi: 10.4102/sajs.v107i5/6.356
- Niklas, K. J. (1994). *Plant allometry, the scaling of form and process*. Chicago: University of Chicago Press. 365 p.
- O'Brien, S. T., Hubbell, S. P., Spiro, P., Condit, R., & Foster, R. B. (1995). Diameter, height, crown, and age relationships in eight neotropical tree species. *Ecology*, 76(6), 1926-1939. doi: 10.2307/1940724
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4), 573-593.
- Pastor, J., Aber, J. D., & Melillo, J. M. (1984). Biomass prediction using generalized allometric regressions for some north east tree species. *Forest Ecology and Management*, 7(4), 265-274. doi: 10.1016/0378-1127(84)90003-3
- Paul, K. I., Roxburgh, S. H., Chave, J., England, J. R., Zerihun, A., Specht, A., Lewis, T., Bennet, L. T., Baker, T. G., Adams, M. A., Huxtable, D., Montagu, K. D., Falster, D. S., Feller, M., Sochacki, S., Ritson, P., Bastin, G., Bartle, J., Wildy, D., Hobbs, T., Larmour, J., Waterworth, R., Stewart, H. T. L., Jonson, J., Forrester, D. I., Applegate, G., Mendham D., Bradford, M., O'Grady, D. A., Green, D., Sudmeyer, R., Rance, S. J., Turner, J., Barton, C., Wenk, E. H., Grove, T., Attiwill, P. M., Pinkard, E., Butler, D., Brooksbank, K., Spencer, B., Snowdon, P., O'Brien, N., Battaglia, M., Cameron, D. M., Hamilton, S., McAuthur, G., & Sinclair, J. (2016). Testing the generality of above-ground biomass allometry across plant functional types at the continental scale. *Global Change Biology*, 22(6), 2106-2124. doi: 10.1111/gcb.13201
- Paz, F., Odi, M., Cano, A., Bolaños, M. A., & Zarco, A. (2009). Equivalencia ambiental en la productividad de la vegetación. *Agrociencia*, 43(6), 635-648.
- Pelletier, J., Kirby, K. R. & Potvin, C. (2010). Significance of carbon stock uncertainties on emission reductions from deforestation and forest degradation in developing countries. *Forest Policy and Economics*, 24, 3-11. doi: 10.1016/j.forpol.2010.05.005
- Picard, N., Boyemba, F. B., & Rossi, V. (2015a). Reducing the error in biomass estimates strongly depends on model selection. *Annals of Forest Science*, 72(6), 811-823. doi: 10.1007/s13595-014-0434-9
- Picard, N., Rutishauser, E., Ploton, P., Ngomanda, A., & Henry, M. (2015b). Should tree biomass allometry be restricted to power models? *Forest Ecology and Management*, 356, 156-163. doi: 10.1016/j.foreco.2015.05.035
- Pilli, R., Anfodillo, T., & Carrer, M. (2006). Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 237(1), 583-593. doi: 10.1016/j.foreco.2006.10.004
- Ploton, P., Barbier, N., Takoudjou, S. M., Réjou, M., Boyemba, F. B., Chuyong, G., Dauby, G., Droissart, V., Fayolle, A., Goodman, R. C., Henry, M., Kamdem, N. G., Mukirania, J. K., Kenfack, D., Libalah, M., Ngomanda, A., Rossi, V., Sonké, B., Texier, N., Thomas, D., Zebaze, D., Couteron, P., Berger, U., & Péliissier, R. (2016). Closing a gap in tropical forest biomass estimation: taking crown mass variation into account in pantropical allometries. *Biogeosciences*, 13(5), 1571-1585. doi: 10.5194/bg-13-1571-2016
- Pretzsch, H., & Dieler, J. (2012). Evidence of variant intra- and interspecific scaling of tree crown structure for allometric theory. *Oecologia*, 169(3), 637-649. doi: 10.1007/s00442-011-2240-5
- Price, C. A., Enquist, B. J., & Savage, V. M. (2007). A general model for allometric covariation in botanical form and function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(32), 13204-13209. doi: 10.1073/pnas.0702242104
- Rojas-García, F., de Jong, B. H. J., Martínez, P. Z., & Paz, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835-864. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Ruesch, A., & Gibbs, H. (2008). *New global biomass carbon map for the year 2000 based on IPCC tier-1 methodology*. Carbon Dioxide Information Analysis Center. USA: Oak Ridge National Laboratory.

- Schlaegel, B. (1981). *Willow Oak volume and weight tables for the Mississippi delta. Research Paper so-1*. Southern Forest Experiment Station. New Orleans: USDA Forest Service. 15 p.
- Sileshi, G. W. (2014). A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes, and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329, 237-254. doi: 10.1016/j.foreco.2014.06.026
- Sprugel, D. G. (1983). Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, 64(1), 209-210. doi: 10.2307/1937343
- Ter-Mikaelian, M. T., & Korzukhin, M. (1997). Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 97(1), 1-24. doi: 10.1016/S0378-1127(97)00019-4
- Thomas, S. C. (1996). Asymptotic height as a predictor of growth and biometric characteristics in Malaysian rain forest trees. *American Journal of Botany*, 83(5), 556-566.
- van Breugel, M., Ransijn, J., Craven, D., Bongers, F., & Hall, J. S. (2011). Estimating carbon stock in secondary forests: decisions and uncertainty associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1648-1657. doi: 10.1016/j.foreco.2011.07.018
- Vargas, B., López, C. A., Corral, J. J., Lopez, J. O., Aguirre, C. G., & Álvarez, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(269). doi: 10.3390/f8080269.
- West, G. B., Brown, J. H. & Enquist, B. J. (1999). A general model for the structure and allometry of plant vascular system. *Nature*, 400, 664-667. doi: 10.1038/23251
- White, J. F., & Gould, S. J. (1965). Interpretation of the coefficient in the allometric equation. *American Naturalist*, 99(904), 5-18. doi: 10.1086/282344
- Woods, K. D., Feiveson, A. H., & Botkin, D. B. (1991). Statistical error analysis for biomass density and leaf area index estimation. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(7), 974-989. doi: 10.1139/x91-135
- Zapata-Cuartas, C., Sierra, A., & Alleman, L. (2012). Probability distribution of allometric coefficients and Bayesian estimation of aboveground tree biomass. *Forest Ecology and Management*, 277, 173-179. doi: 10.1016/j.foreco.2012.04.030
- Zhang, Z., Zhong, Q., Niklas, K. J., Cai, L., Yang, Y., & Cheng, D. (2016). A predictive nondestructive model for the covariation of tree height, diameter, and stem volume scaling relationships. *Scientific Reports*, 6(1). doi: 10.1038/srep31008
- Zianis, D., & Mencuccini, M. (2004). On simplifying analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187(2-3), 311-332. doi: 10.1016/j.foreco.2003.07.007

Manuscrito recibido el 07 de diciembre de 2018

Aceptado el 15 de enero de 2021

Publicado el 02 de diciembre de 2021

Este documento se debe citar como:

Paz Pellat, F., Salas Aguilar, V., Velázquez Rodríguez, A., & Sánchez Sánchez, C. (2021). Estimación alométrica de biomasa arbórea mediante un enfoque generalizado a nivel de especie y multiespecie. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742434. doi: 10.21829/myb.2021.2742434



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