

MODELOS PROXY PARA BIOMASA DE FUSTE DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco: MÉTODO DE PRESSLER

PROXY MODELS FOR *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco STEM BIOMASS: PRESSLER METHOD

Cristóbal de J. Flores-Hernández¹, Jorge Méndez-González^{2*}, Félix de J. Sánchez-Pérez³, Guadalupe Ponce-Martínez¹, Citlali Pérez-Díaz¹ y Fátima M. Méndez-Encina¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Postgrado en Ingeniería de Sistemas de Producción, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

²UAAAN, Departamento Forestal, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. ³Asesor independiente del área de estadística.

*Autor de correspondencia (jmendezg@hotmail.com)

RESUMEN

La evaluación precisa de la biomasa de árboles es necesaria para estimar los almacenes de carbono y entender la contribución de los ecosistemas de bosques en la regulación de las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo de este estudio fue desarrollar una ecuación alométrica para predecir la biomasa del fuste (B_f) para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la región de Arteaga Coahuila, en el noreste de México. El diámetro normal (D_n), la altura al punto directriz (H_p) y la altura total (H_t) fueron medidos con el Criterion RD1000[®]. El volumen del fuste (S_v) fue obtenido con la ecuación de Pressler y después fue transformado a biomasa mediante la densidad básica de la madera. Los datos se ajustaron con el modelo potencial $\hat{Y} = aX^b$ en su forma logarítmica, donde \hat{Y} es S_b y X el D_n evaluando los supuestos de normalidad, homocedasticidad y no autocorrelación. Un total de 110 árboles de esta especie fueron muestreados. La ecuación $\ln(\hat{B}_f) = -2.8732 (\pm 0.238) + 2.4237 (\pm 0.066) \times \ln(D_n)$ cumplió todos los supuestos de los modelos lineales (valor de $P > 0.05$), lo que asegura que la predicción de biomasa de fuste sea confiable. El diámetro normal explicó el 98 % de la biomasa del fuste de *P. menziesii*. El sesgo en la predicción de biomasa del fuste debido a la transformación logarítmica debe corregirse multiplicándola por un factor de corrección de 1.018. La estimación indirecta de volumen a través del método de Pressler es una forma eficiente, de bajo costo y no destructiva para generar un modelo alométrico de biomasa de fuste.

Palabras clave: *Pseudotsuga menziesii*, alometría, biomasa, carbono, cambio climático, método Pressler.

SUMMARY

Accurate assessment of tree biomass is necessary to estimate carbon stocks and understand the contribution of forest ecosystems in regulating greenhouse gas emissions. The objective of this study was to develop an allometric equation to predict stem biomass (B_f) for *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, in the Arteaga Coahuila region, in northeastern Mexico. The normal diameter (D_n), leader point height (H_p) and total height (H_t) were measured by using Criterion RD1000[®]. The stem volume (S_v) was obtained by applying the Pressler equation, and then it was transformed into biomass using the basic density of the wood. The data were adjusted through the potential model $\hat{Y} = aX^b$ in its logarithmic form, where \hat{Y} is S_b and X the D_n , assessing the assumptions of normality, homoscedasticity and no autocorrelation. A total of 110 sample trees of this species were sampled. The equation $\ln(\hat{B}_f) = -2.8732 (\pm 0.238) + 2.4237 (\pm 0.066) \times \ln(D_n)$ fulfilled all the assumptions of

lineal models (P - value > 0.05), ensuring that the stem biomass prediction is reliable. Normal diameter explained 98 % of the stem biomass of *P. menziesii*. The bias in the stem biomass prediction due to the logarithmic transformation must be corrected by multiplying it by a correction factor of 1.018. Indirect volume estimation by the Pressler method is an efficient, low-cost and non-destructive approach to generate an allometric model of stem biomass.

Index words: *Pseudotsuga menziesii*, allometry, biomass, carbon, climate change, Pressler method.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) siguen en aumento; el uso desmedido de combustible fósiles ha provocado que al año 2017 se estime un aumento de 1 °C en la temperatura global (Infante, 2019). Otros registros similares de temperatura sobre la superficie terrestre y oceánica demuestran un calentamiento de 0.87 °C (Allen *et al.*, 2019). Se estima que las emisiones antrópicas de CO₂ a la atmósfera fueron de 3.6 Gt de CO₂ en el periodo de 2008 a 2018 (BP PLC, 2019), estas emisiones en su mayoría son almacenadas en plantas, suelo y océanos (IPCC, 2015); por lo anterior, el aumento de superficies boscosas, la conservación, buenas prácticas silvícolas y reforestación son importantes para el almacenamiento del carbono en la superficie terrestre (De Jong *et al.*, 2004), de ahí la importancia de contar con ecuaciones alométricas para cuantificar el carbono almacenado en árboles individuales y por tipos de ecosistema (Graciano-Ávila *et al.*, 2019; Montoya *et al.*, 2018).

Para la estimación del carbono en la biomasa de árboles se han desarrollado métodos directos e indirectos, los primeros consisten en derribar los árboles, separar cada componente para obtener el peso total en verde y seco (Picard *et al.*, 2012) y los segundos estiman la biomasa por

medio de ecuaciones obtenidas con análisis de regresión sin derribar el árbol (Avendaño *et al.*, 2009; Návar, 2009; Picard *et al.*, 2012).

En algunas áreas es imposible derribar árboles para determinar de manera directa la biomasa; entonces, es conveniente utilizar el volumen del árbol, obtenido a través de métodos indirectos o por troceo simulado (Salas *et al.*, 2005); posteriormente, el volumen se transforma en biomasa con el uso de la densidad básica correspondiente a la especie (Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2010) para generar ecuaciones alométricas. En 1855 Maximilian Robert Pressler postuló un método, denominado como ecuación de Pressler, para obtener el volumen del fuste en el que sólo se necesita medir el diámetro normal (a 1.3 m) y la altura a la que se encuentra la mitad del diámetro normal; se aplica a cualquier forma geométrica que presente el fuste, siempre que sea no cilíndrico (Romahn, 1999). Los estudios de Curto *et al.* (2019), Lima *et al.* (2016) y Valencia-Manzo *et al.* (2017) constituyen ejemplo de estimaciones de volumen de fuste en especies arbóreas con la ecuación de Pressler.

Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco es ampliamente distribuida en el oeste de EE.UU. y Canadá (Hermann y Lavender, 1999); en cambio, las poblaciones en México han sido deterioradas y se encuentran bajo protección especial en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001 (SEMARNAT, 2002), y como consecuencia, su aprovechamiento no está permitido. Crece en forma natural en la porción norte de la Sierra Madre Occidental y en la parte norte de la Sierra Madre Oriental (Ventura *et al.*, 2010), llega a alcanzar hasta 90 m de altura y 309 cm de diámetro (Van Pelt y Nadkarni, 2004), lo que supone que puede almacenar grandes cantidades de carbono en su biomasa, pero también, esto dificulta cuantificar su biomasa de forma directa, además de ser costoso.

La escasez de ecuaciones de biomasa para *P. menziesii* es evidente, salvo las investigaciones hechas por St. Clair (1993) y Feller (1992) en EE.UU. y otras por Návar (2009) en el noroeste de México, aunque existen otras temáticas referentes a la caracterización y conservación (Ventura *et al.*, 2010), a su estructura silvícola (Guerra *et al.*, 2012) y sobre aspectos ecológicos (Domínguez *et al.*, 2004).

El presente estudio tuvo como objetivo generar una ecuación para estimar biomasa de fuste en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en bosque sin manejo en la Sierra de Arteaga Coahuila, México, mediante el método de Pressler, que sirva de base para cuantificar los almacenes de carbono en este tipo de poblaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se realizó en un bosque de *P. menziesii* ubicado a 13 km al este del poblado San Antonio de las Alazanas en Arteaga, Coahuila, México, en las coordenadas 25° 13' 59.25" N y 100° 26' 55.97" O (Datum WGS84), con altitud de 2684 m; presenta clima de tipo Cw₁ (templado subhúmedo) y Cb'(w₁)x' (templado semifrío subhúmedo), con temperatura media que oscila entre los 5 y 18 °C y precipitación anual de 400 a 600 mm (García, 1998).

Muestreo de arbolado

Para la generación de la ecuación de biomasa de fuste (*Bf*) se usó el método indirecto; se aplicó un muestreo selectivo de árboles de *P. menziesii*, se consideraron todas las categorías diamétricas existentes, se seleccionaron árboles con fuste recto, sin daños, libres de plagas y enfermedades (Avendaño *et al.*, 2009). Para medir el diámetro normal a 1.30 m (*Dn*), la altura del punto directriz (*Hp*), donde se ubica la mitad del *Dn* y la altura total (*Ht*) se utilizó un dendrómetro electrónico (Criterion RD1000®, Laser Technology, Inc, Centennial, CO, EUA), con estos datos se calculó el llamado volumen de Pressler (*Vp*) o volumen de fuste, mediante la ecuación de Pressler (Romahn, 1999) [Ec. 1]; posteriormente, el volumen se transformó a biomasa a través de la densidad de la madera de la especie, equivalente a 490 kg m⁻³ (Ordóñez *et al.*, 2015).

$$Vp = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot g \cdot P \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde: *Vp* = volumen de Pressler (m³), *g* = área basal de la sección a 1.3 m de altura (m²), *P* = altura de Pressler = *Hp* + 1.95 (m), *Hp* = distancia entre la sección transversal a 1.3 m de altura y la sección con diámetro igual a la mitad del diámetro normal (m).

Ajuste del modelo

Con los datos de biomasa (variable dependiente) y el diámetro normal (variable independiente) se ajustó la ecuación alométrica potencial [Ec. 2] en su forma lineal [Ec. 3]. El modelo fue ajustado a través del método de mínimos cuadrados ordinarios (Montgomery *et al.*, 2006) con el paquete stats del software R (R Core Team, 2019); también se obtuvo el factor de corrección (FC) por el sesgo obtenido al realizar la transformación logarítmica y regresarla a las unidades originales (Sprugel, 1983). La ecuación basada sólo en diámetro como variable independiente ha demostrado tener buenas predicciones de biomasa en varias especies forestales (Altanzagas *et al.*,

2019; Avendaño *et al.*, 2009; Feller, 1992; Flores-Nieves *et al.*, 2011; Návar, 2009; Razo-Zárate *et al.*, 2013); de acuerdo con la revisión de Picard *et al.* (2012), ésta es la más frecuentemente utilizada para predecir biomasa, puede interpretarse biológicamente y en su forma logarítmica es posible reducir la heterocedasticidad (Sprugel, 1983); además, por la naturaleza de los datos, describe perfectamente la relación de variables dasométricas con la biomasa (Picard *et al.*, 2012).

$$Bf = \beta_0 Dn^{\beta_1} \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$\ln(Bf) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln(Dn) \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde: *Bf* = biomasa de fuste (kg), *Dn* = diámetro normal (cm), *ln* = logaritmo natural, β_0 y β_1 = coeficientes de regresión.

Validación del modelo

El análisis de los supuestos del modelo de regresión lineal (normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de los errores) es esencial para verificar si el modelo estimará correctamente la variable dependiente (Faraway, 2009; Fox, 2016; Montgomery *et al.*, 2006). Para evaluar la normalidad se utilizó el paquete *tseries* de R (Trapletti y Hornik, 2019) a través de la prueba de Jarque-Bera, y el paquete *lmtest* (Zeileis y Hothorn, 2002) para la homogeneidad de varianza (Test de Breusch-Pagan) e independencia de los errores (Test de Durbin-Watson). El diagnóstico de observaciones atípicas e influyentes (distancia de Cook y Leverage) se evaluó mediante el paquete *stats* (Fox y Weisberg, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el presente estudio se muestrearon 110 árboles, cuyos diámetros fluctuaron de 7.8 a 87.0 cm y las alturas de 4.7 a 36.0 m (Cuadro 1). Para este estudio se abarcaron categorías diamétricas desde 5 hasta 85 cm; el árbol más grande registró 3233.31 kg de biomasa (6.59 m³), mientras

que el más pequeño sólo 6.79 kg, esta variable presentó un coeficiente de variación de más de 102.6 %; en altura, este valor ascendió sólo a 31.2 %. En esta misma especie, Guerra *et al.* (2012) reportaron diámetros desde 85 cm en Emiliano Zapata, Villarreal Terrenate, La Rosa Terrenate en Tlaxcala y Cuatexmola, Ixtacamaxtitlán, Puebla, hasta 110 cm en La Caldera, Ixtacamaxtitlán, Puebla. En su estudio, Návar (2009) reportó diámetros de 8.4 a 49.8 cm en el noreste México. Domínguez *et al.* (2004) registraron alturas hasta de 45 m en Pinal de Amoles, Querétaro, mientras que Van Pelt y Nadkarni (2004) midieron árboles con diámetros de 300 cm y 90 m de altura en una porción del sureste de las cascadas de Washington.

Avendaño *et al.* (2009) encontraron que *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. puede almacenar en el fuste hasta 4218.4 kg de biomasa (al diámetro máximo de esta especie, 87 cm), el cual es muy superior a lo que almacena *P. menziesii*; éstos y otros autores, como Flores-Nieves *et al.* (2011), indicaron que la proporción de la biomasa de fuste representa entre 80 y 97 % de la biomasa aérea total.

Cumplimiento de los supuestos del modelo

En un análisis preliminar de los residuos estudentizados se detectaron dos observaciones con valores superiores a 3 (Figura 1A), y de acuerdo con Montgomery *et al.* (2006), éstos son considerados como observaciones atípicas potenciales, mismas que fueron eliminadas; en este sentido, se reajustó nuevamente el modelo con 108 observaciones, de las cuales se obtuvieron resultados sin datos atípicos (Figura 1B).

La prueba de Jarque-Bera ($X^2 = 1.724$, *gl* = 2, *P* = 0.422) y la de Breusch-Pagan (*BP* = 2.839, *gl* = 1, *P* = 0.092) fueron significativas; es decir, los residuos tienen distribución normal (Figura 2A) y son homocedásticos (Figura 2B). Con fines de comprobación estadística de los residuales, la prueba de Durbin-Watson (*DW* = 1.818, *P* = 0.147) demostró independencia de los errores; hasta 20 retardos (*lags*), la autocorrelación de los residuales es < 0.2 ($\alpha = 0.5$

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de variables de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en San Antonio de las Alazanas, Coahuila.

Variable	Media	Mín	Máx	IC-M	Q ₁₀	Mediana	Q ₉₀	Rango	DE	CV (%)	RI
<i>Dn</i> (cm)	40.80	7.80	87.00	±3.73	16.91	38.15	65.30	79.20	19.57	47.98	33.00
<i>Hp</i> (m)	9.80	3.70	16.50	±0.57	5.97	9.70	13.50	12.80	2.96	30.21	4.00
<i>Ht</i> (m)	19.24	4.70	36.00	±1.15	10.79	19.10	26.86	31.30	6.00	31.19	7.50
<i>Vol</i> (m ³)	1.31	0.02	6.59	±0.26	0.11	0.78	2.84	6.58	1.34	102.64	1.69
<i>Bf</i> (kg)	640.32	6.79	3233	±125.36	54.88	383.67	1390.65	3226.52	657.20	102.64	830.53

Dn: diámetro normal, *Hp*: altura del punto directriz, *Ht*: altura total, *Vol*: volumen del fuste, *Bf*: biomasa de fuste, IC-M: intervalo de confianza de la media, Q₁₀ y Q₉₀: cuantiles de la variable, DE: desviación estándar, CV: coeficiente de variación, RI: rango intercuartílico.

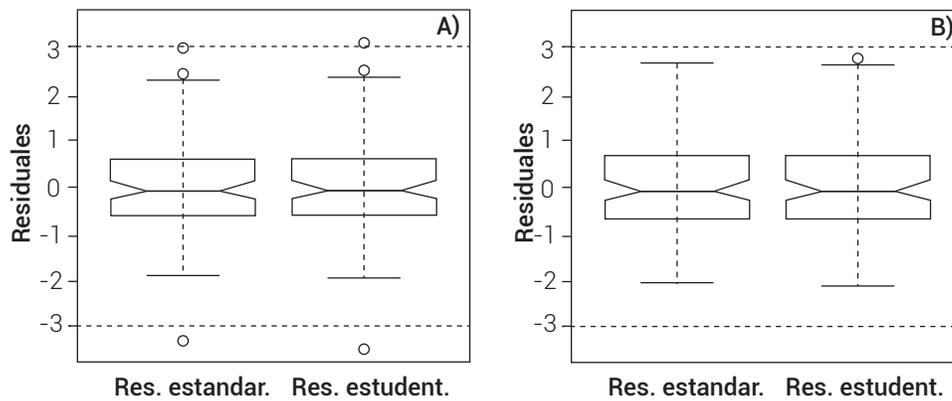


Figura 1. A) datos atípicos detectados a través del análisis preliminar de residuales estandarizados y estudentizados y B) ausentes en el modelo final de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

%) (Figura 2C), con lo que se cumplen los supuestos del modelo lineal, lo cual permite que las estimaciones sean confiables. Algunos autores sólo muestran parámetros de la regresión, R^2_{aj} , error estándar y el CV (Altanzagas *et al.*, 2019; Avendaño *et al.*, 2009; Feller, 1992; Montoya *et al.*, 2018); sin embargo, es recomendable que los modelos cumplan con los supuestos establecidos (Fox, 2016; Montgomery *et al.*, 2006).

El diagnóstico de observaciones atípicas e influyentes (distancia de Cook y Leverage) indicó que algunas observaciones presentaron influencia potencial (Figura 3), pero sin poner en riesgo las estimaciones. El estadístico de distancia de Cook demostró que tampoco existe influencia real en ninguna observación (Cuadro 2). No se presentó ninguna influencia significativa ($P \leq 0.05$) en los estimadores ($dfbetas$), ni sobre el ajuste del modelo ($dffit$).

Modelos de predicción de biomasa de fuste en *Pseudotsuga menziesii*

El modelo alométrico para *P. menziesii* en su forma lineal presentó resultados satisfactorios, el diámetro normal explicó el 98.0 % de la variabilidad de la biomasa de fuste, mientras que en su forma original explicó 96.0 % (Cuadro 3) con 108 árboles y diámetros de 7.8 a 87 cm. En esta misma especie, Espinosa y Perry (1987) mostraron que el diámetro normal explicó en 89 % la biomasa de fuste en árboles jóvenes (22 años), en tanto que el modelo generado por Gower *et al.* (1987) explicó el 98 %, similar a lo obtenido aquí con el modelo lineal. Návar (2009) y St. Clair (1993) reportaron una R^2 de 0.92 en biomasa de fuste, con muestras de 21 y 249 árboles, respectivamente, pero en diámetros de 9 a 26 cm; en cambio, Feller (1992), en Coastal British Columbia, Canadá, obtuvo una R^2 de 0.97 y 0.96.0 con el modelo lineal para sitios de buena ($n = 46$) y mala calidad ($n = 42$), respectivamente, en diámetros de 5 a 64 cm de *P. menziesii*. Las estimaciones en todos los casos

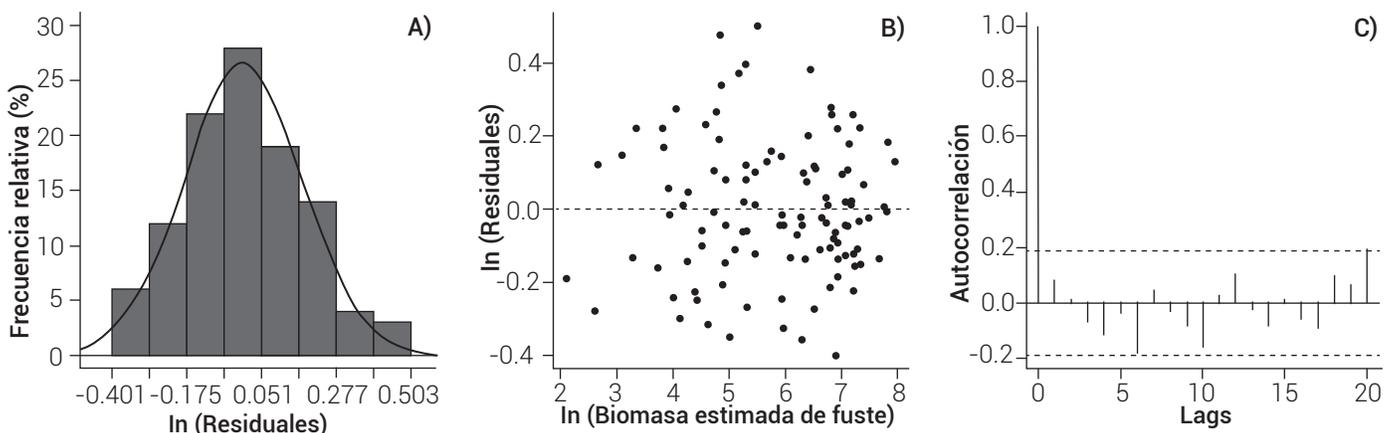


Figura 2. A) histograma de residuales, B) valores estimados contra residuales, C) correlograma de residuales del modelo de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en San Antonio de las Alazanas, Coahuila.

Cuadro 2. Detección de observaciones influyentes reales y potenciales del modelo para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en San Antonio de las Alazanas, Coahuila.

Observación	Influencia potencial de observaciones					
	<i>dfb.1</i>	<i>dfb.l(Dn)</i>	<i>dffit</i>	<i>cov.r</i>	<i>cook.d</i>	<i>Hat</i>
1	-0.30	0.29	-0.31	1.09*	0.05	0.08*
2	-0.38	0.36	-0.39	1.04	0.08	0.06*
3	0.16	-0.16	0.17	1.08*	0.01	0.06*

*: $P \leq 0.05$.

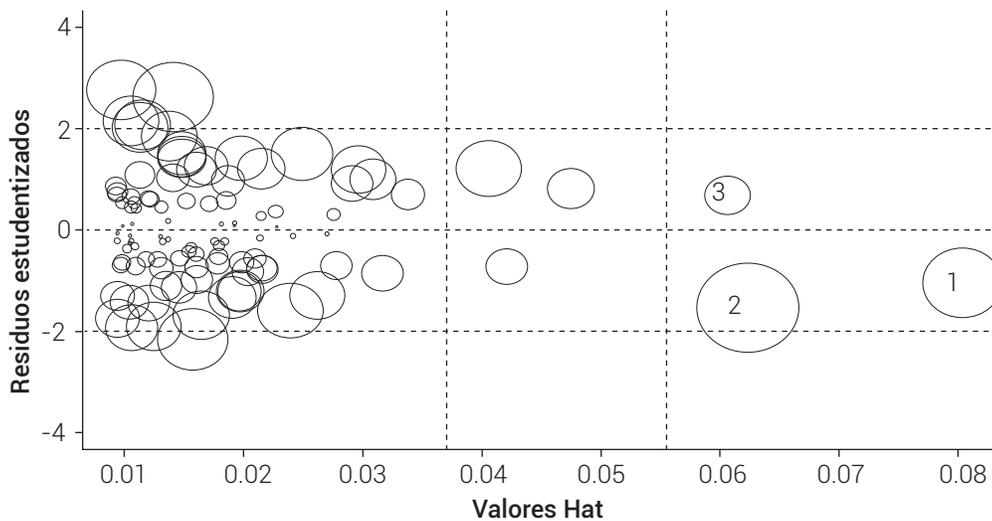


Figura 3. Observaciones influyentes potenciales del modelo de biomasa de fuste de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en San Antonio de las Alazanas, Coahuila.

son aceptables, pero existen diferencias de ajuste entre modelos, lo cual pudiera deberse al tamaño de muestra, al intervalo considerado en las variables dependientes e independientes y a las variaciones de crecimiento de la especie en cada lugar.

El factor de corrección estimado en este estudio para *P. menziesii* fue de 1.018 (1.8 %); éste debe calcularse para corregir el sesgo debido a la transformación logarítmica de las variables, y es multiplicativo a la biomasa estimada (Sprugel, 1983); en los estudios revisados para esta especie se omiten estos valores, o no son calculados, pero en *Picea obovata* (Altanzagas *et al.*, 2019) y en *Pinus halepensis* (Montoya *et al.*, 2018) este valor fue de hasta 1.03. Con esta ecuación alométrica es posible conocer el volumen (m^3) de fuste de la especie, basta con dividir la biomasa estimada (kg) por la densidad básica (490 kg m^{-3}).

Modelos para predicción de biomasa en otras especies

En otras especies, como *Picea obovata* Ldb., Altanzagas *et al.* (2019) reportaron una R^2 para biomasa de fuste de 0.971 % con el uso del mismo modelo, con 22 árboles

y diámetros de 5.6 a 43.7 cm. En *Pinus cembroides* Zuc. y *P. halepensis* Mill. se reportaron R^2 de 0.74 y 0.81, respectivamente, en 50 árboles para biomasa de fuste (Marroquín *et al.*, 2018). Otro ejemplo de ello, es en la especie *A. religiosa*, donde el modelo explicó 92.8 % de la biomasa de fuste en una muestra de 10 árboles con diámetros de 12 a 105 cm (Flores-Nieves *et al.*, 2011). En *A. religiosa*, Razo-Zárate *et al.* (2013) reportaron que el diámetro normal explicó 98 %, mientras que Avendaño *et al.* (2009) demostraron que éste explicó 99.3 % de la biomasa total. Es importante mencionar que el modelo no siempre arroja buenos ajuste; por ejemplo, en *P. halepensis* el diámetro basal sólo explica 77.0 % de la biomasa total (Montoya *et al.*, 2018).

Los errores y la pendiente (β .) del modelo en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Para este estudio se tuvo un coeficiente de variación de 32.7 % y error estándar de 209.37 kg, este último fue mayor a lo reportado por Návar (2009) el cual fue de 72.86 kg, lo cual resulta lógico por las diferencias en el tamaño de los árboles muestreados. Feller (1992) y Espinosa y

Perry (1987) reportaron un error estándar superior a 0.25 en escala logarítmica, en el presente estudio se obtuvo un valor de 0.19 en esa misma escala. Los coeficientes del modelo ($\beta_0 = -2.8732$ y $\beta_1 = 2.4237$) mostraron significancia estadística con $P < 0.0001$ (Cuadro 3). En los valores originales de las variables el valor estimado de β_0 es dependiente del valor mínimo de la variable y , por lo que difiere en cada estudio; β_1 define la razón de incremento de y por cada unidad de x , lo que los hace comparables. En modelos potenciales linealizados, St. Clair (1993) obtuvo para *P. menziesii* una $\beta_1 = 2.27$, levemente menor a lo obtenido en este estudio, Nívar (2009) reportó un valor de 2.59, pero en esta misma especie se han obtenido valores superiores a 2.8 (Espinosa y Perry, 1987; Feller, 1992; Gower et al., 1987), pero estos coeficientes ya no poseen la misma interpretación que tienen en un modelo lineal simple sin transformación.

La pendiente (β_1) del modelo en otras especies

En *P. cembroides* y *P. halepensis* se han reportado valores de β_1 para biomasa de fuste de 1.80 y 1.51 (Marroquín et al., 2018). Flores-Nieves et al. (2011) reportaron que este valor llega a ser de 2.75 en biomasa de fuste de *A. religiosa*, pero en *Picea obovata* el valor de β_1 fue de 2.59 (Altanzagas et al., 2019). El valor del parámetro β_1 de *P. menziesii* es similar al de *A. religiosa* en los estudios de Avendaño et al. (2009) y Razo-Zárate et al. (2013), quienes reportaron valores de 2.5 para biomasa total. En *P. halepensis* se reportó el valor más bajo ($\beta_1 = 0.80$), a pesar de ser árboles de grandes dimensiones.

Diferencias de estimación de biomasa entre modelos de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Las diferencias de biomasa entre modelos muestran que la categoría de 10 cm llega a subestimar otros modelos desde -32.4 % (St. Clair, 1993) hasta -46.3 % (Espinosa y Perry, 1987); sin embargo, en la categoría de 25 cm el modelo de Gower et al. (1987) sobreestimó hasta en 73.5 % más que el modelo presentado aquí. Las predicciones de biomasa que se asemejaron a las obtenidas de este modelo las presentó Feller (1992) y las distantes fueron

las de Gower et al. (1987) (Cuadro 4).

El modelo generado (Cuadro 3; Figura 4A) es válido y confiable para la predicción de la biomasa de fuste en *P. menziesii* al usar el diámetro normal en el intervalo indicado, y se debe aplicar en condiciones similares en las que se encuentra la especie (Flores-Nieves et al., 2011; Razo-Zárate et al., 2013). Puesto que se ha evidenciado la sub y sobreestimación de biomasa con los diferentes modelos en relación con modelo obtenido (Cuadro 4; Figura 4B), ésto da pauta para sugerir la inclusión de la altura en este mismo modelo a fin de mejorar las estimaciones, sin omitir el debido cumplimiento de los supuestos de un modelo de regresión.

A pesar de que se ha demostrado que la cubicación por el método de Pressler sobreestima ligeramente el volumen real, no es estadísticamente diferente, según se detalla a continuación: Lima et al. (2016) evaluaron nueve métodos de cubicación en 98 árboles de *P. taeda* L. de entre nueve y 20 años de edad e indicaron que todos los métodos de cubicación sobreestiman el volumen de árboles en relación con el volumen real, pero a los 20 años de edad, el método de Pressler es de los cuatro más precisos, incluso para las edades de nueve y 13 años, los volúmenes obtenidos por métodos de Huber, Pressler y Sectional Standard presentaron desviaciones menores en comparación con el volumen real; por su parte, Valencia-Manzo et al. (2017) compararon el volumen real de 134 árboles de *P. patula* Schl. et Cham. var. *longepedunculata* Look con el volumen estimado por el método de Pressler y declararon que las diferencias que visualmente presenta la ecuación de Pressler (sobrestimación), en relación con el volumen real, son tan pequeñas que la prueba t-Student determinó que estadísticamente no hay diferencia entre ambos tipos de volumen ($Pr > t < 0.05$). En un estudio similar, Curto et al. (2019) compararon el volumen de Pressler con el volumen real de *Eucalyptus grandis* y encontraron que no hay diferencia significativa entre los promedios de los volúmenes estimados por los diferentes métodos en relación al volumen real, según la prueba de Dunnett ($P \leq 0.05$).

Cuadro 3. Parámetros y estadísticos del modelo de biomasa de fuste de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en San Antonio de las Alazanas, Coahuila.

Ecuación	R^2_{aj}	S_{xy}	CV %	Valor P	FC
$Bf = 0.0565 \times Dn^{2.4237}$	0.96	209.38	32.70	2.20×10^{-16}	
$\ln(Bf) = -2.8732(\pm 0.238) + 2.4237(\pm 0.066) \times \ln(Dn)$	0.98	0.19	3.26	2.20×10^{-16}	1.018

Bf: biomasa de fuste (kg), Dn: diámetro normal (cm), R^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado, S_{xy} : error estándar (kg), CV: coeficiente de variación, ln: logaritmo natural, \pm : intervalo de confianza de 95 % del coeficiente de regresión, FC: factor de corrección.

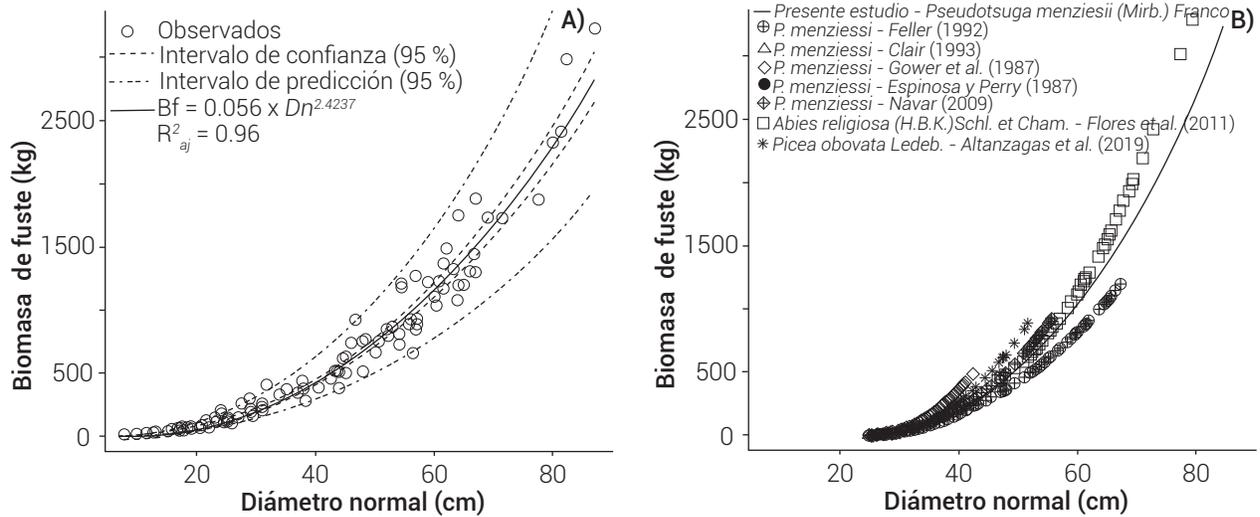


Figura 4. A) valores observados y ajustados del modelo para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, y B) comparado con otros estudios en biomasa de fuste.

Cuadro 4. Comparación de ecuaciones generadas para biomasa de fuste en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

CD	Estudios realizados										
	Presente estudio	Feller (1992)	Dif. (%)	St. Clair (1993)	Dif. (%)	Gower et al. (1987)	Dif. (%)	Espinosa y Perry (1987)	Dif. (%)	Nívar (2009)	Dif. (%)
10	14.99	15.64	4.3	10.13	-32.4	18.45	23.1	8.05	-46.3	13.52	-9.8
25	138.11	125.08	-9.4	135.07	-2.2	239.57	73.5	122.08	-11.6	144.97	5.0

CD: categoría diamétrica (cm), Dif.: diferencia con respecto al presente estudio (%).

CONCLUSIONES

El uso de métodos indirectos para la cuantificación de volumen en especies forestales es una forma práctica y de bajo costo que puede ser empleada de manera confiable. La ecuación de Pressler presume ser sencilla y rápida para la cubicación de fuste de árboles en pie de la especie *Pseudotsuga menziesii* Franco, ya que sólo se requiere medir el diámetro normal y la altura del punto directriz para obtener el volumen y convertir a biomasa, lo que da pauta para incrementar significativamente el tamaño de muestra para generar modelos robustos. El cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión: normalidad, homogeneidad de varianzas, independencia de los errores, significancia estadística de los estimadores, identificación y análisis de observaciones atípicas, potenciales e influyentes, aseguran que las predicciones de los modelos de alométricos sean confiables. El diámetro normal demostró ser un buen predictor, ya que explica hasta en 98 % la biomasa de fuste de *P. menziesii*.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de beca de posgrado para el primer autor.

BIBLIOGRAFÍA

Allen M. R., M. Babiker, Y. Chen, H. de Coninck, S. Connors, R. van Diemen, ... and K. Zickfeld (2019) Resumen para responsables de políticas. In: Calentamiento Global de 1,5 °C. Informe Especial del IPCC sobre los Impactos del Calentamiento Global de 1,5 °C con Respecto a los Niveles Preindustriales y las Trayectorias Correspondientes que Deberían Seguir las Emisiones Mundiales de Gases de Efecto Invernadero, en el Contexto del Reforzamiento de la Respuesta Mundial a la Amenaza del Cambio Climático, el Desarrollo Sostenible y los Esfuerzos por Erradicar la Pobreza. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, ... and T. Waterfield (eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. pp:3-24.

Altanzagas B., Y. Luo, B. Altansukh, C. Dorjsuren, J. Fang and H. Hu (2019) Allometric equations for estimating the above-ground biomass of five forest tree species in Khangai, Mongolia. *Forests* 10:661,

- <https://doi.org/10.3390/f10080661>
- Avendaño H. D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. D. Etchevers B. (2009)** Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:233-238, <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.3.233>
- BP PLC (2019)** BP Statistical Review of World Energy. 68th edition. BP PLC. London, UK. 64 p.
- Curto R. A., M. F. Pinto, E. J. G. de Araújo, C. Wink, H. Tonini e A. C. Lauro (2019)** Exatidão de métodos para estimativa do volume de árvores em pé em sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta. *Revista Brasileira de Biometria* 37:324-334, <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i3.399>
- De Jong H. B. J., O. Masera y T. Hernández-Tejeda (2004)** Opciones de captura de carbono en el sector forestal. In: Cambio Climático: una Visión desde México. J. Martínez y A. Fernández B. (eds.). Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. pp:369-380.
- Domínguez A. F. A., J. J. Vargas H., J. López U., P. Ramírez V. y E. Guízar N. (2004)** Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales del Instituto de Biología Serie Botánica* 75:191-203.
- Espinosa B. M. A. and D. A. Perry (1987)** Distribution and increment of biomass in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rates. *Canadian Journal of Forest Research* 17:722-730, <https://doi.org/10.1139/x87-115>
- Faraway J. J. (2009)** Linear Models with R. Chapman & Hall/CRC. New York, USA. 242 p.
- Feller M. C. (1992)** Generalized versus site-specific biomass regression equations for *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* and *Thuja plicata* in Coastal British Columbia. *Bioresource Technology* 39:9-16, [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90050-8](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90050-8)
- Flores-Nieves P., M. A. López-López, G. Ángeles-Pérez, M. L. de la Isla-Serrano y G. Calva-Vásquez (2011)** Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2:9-20, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i8.543>
- Fox J. (2016)** Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models. Third edition. SAGE Publications, Inc. Thousand Oaks, California, USA. 816 p.
- Fox J. and S. Weisberg (2019)** An R Companion to Applied Regression. Third edition. SAGE Publications, Inc. Thousand Oaks, California, USA. 608 p.
- García E. (1998)** Climas, clasificación de Köppen, modificado por García. Carta de climas, escala 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&indent=no (Enero 2021).
- Gower S. T., C. C. Grier, D. J. Vogt and K. A. Vogt (1987)** Allometric relations of deciduous (*Larix occidentalis*) and evergreen conifers (*Pinus contorta* and *Pseudotsuga menziesii*) of the Cascade Mountains in central Washington. *Canadian Journal of Forest Research* 17:630-634, <https://doi.org/10.1139/x87-103>
- Graciano-Ávila G., E. Alanís-Rodríguez, O. A. Aguirre-Calderón, M. A. González-Tagle, E. J. Treviño-Garza, A. Mora-Olivo y E. Buendía-Rodríguez (2019)** Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42:119-127, <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.119>
- Guerra D. C. V., J. C. López-Domínguez, J. López U., C. Bautista S. y L. Hernández G. (2012)** Estructura silvícola de poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Tlaxcala y Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3:73-88, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.490>
- Hermann R. K. and D. P. Lavender (1999)** Douglas-fir planted forests. *New Forests* 17:53-70, <https://doi.org/10.1023/A:1006581028080>
- Infante M. J. N. (2019)** El nuevo multilateralismo frente al cambio climático: el alcance global y nacional del acuerdo de París. El cambio climático, un problema de todos. Universidad Cooperativa de Colombia. Bucaramanga, Colombia. 11 p.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2015)** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. 151 p.
- Lima G. C. P., S. V. Kohler, R. Silvestre, M. C. Navroski, M. Bonazza, G. Allegretti e R. Scarioti (2016)** Acuracidade de métodos de cubagem para estimativa do volume de *Pinus taeda* L. *BIOFIX Scientific Journal* 1:74-82, <https://doi.org/10.5380/biofix.v1i1.49101>
- Marroquín M. P., J. Méndez G., J. Jiménez P., O. A. Aguirre C. y J. I. Yerena Y. (2018)** Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9:94-110, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.172>
- Montgomery D. C., E. A. Peck y G. G. Vining (2006)** Introducción al Análisis de Regresión Lineal. Tercera edición. Trad. V. González P. Compañía Editorial Continental. México, D. F. 588 p.
- Montoya J. J. C., J. Méndez G., L. Sosa D., C. Ruiz G., A. Zermeño G., J. A. Nájera L., M. G. Manzano C. y A. S. Velázquez R. (2018)** Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México. *Madera y Bosques* 24:e2401880, <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401880>
- Návar J. (2009)** Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257:427-434, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.028>
- Ordóñez D. J. A. B., A. Galicia N., N. J. Venegas M., T. Hernández T., M. J. Ordóñez D. y R. Dávalos-Sotelo (2015)** Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21:77-126, <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- Picard N., L. Saint-André y M. Henry (2012)** Manual de Construcción de Ecuaciones Alométricas para Estimar el Volumen y la Biomasa de los Árboles. Del Trabajo de Campo a la Predicción. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. Rome - Montpellier. 223 p.
- R Core Team (2019)** The R program for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> (January 2021).
- Razo-Zárate R., A. J. Gordillo-Martínez, R. Rodríguez-Laguna, C. C. Maycotte-Morales y O. A. Acevedo-Sandoval (2013)** Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 19:73-86, <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192341>
- Romahn de la V. C. F. (1999)** Relascopía. Una Técnica de Medición Forestal. 2ª edición. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 116 p.
- Salas E. C., M. Reyes S. y C. Bassaber E. (2005)** Medición de diámetros fustales con relascopio y forcípula finlandesa: efectos en la estimación de volumen. *Bosque* 26:81-90, <https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000200010>
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2002)** Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001. Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. 6 de marzo de 2002. México, D. F. 85 p.
- Silva-Arredondo F. M. y J. J. Návar-Cháidez (2010)** Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1:55-62, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.653>
- Sprugel D. G. (1983)** Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64:209-210, <https://doi.org/10.2307/1937343>
- St. Clair J. B. (1993)** Family differences in equations for predicting biomass and leaf area in Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*). *Forest Science* 39:743-755, <https://doi.org/10.1093/forestscience/39.4.743>
- Trapletti A. and K. Hornik (2019)** tseries: Time series analysis and computational finance. R package version 0.10-47. <https://>

- CRAN.R-project.org/package=tseries (January 2021).
- Valencia-Manzo S., S. A. Trujillo-Gómez, E. H. Cornejo-Oviedo, C. Flores-López, J. A. Díaz-Balderas y H. D. González-López (2017)** Ecuación de Pressler para estimar volumen de fuste en árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham. var. *longepedunculata* Look. *Foresta Veracruzana* 19:29-34.
- Van Pelt R. and N. M. Nadkarni (2004)** Development of canopy structure in *Pseudotsuga menziesii* forests in the Southern Washington cascades. *Forest Science* 50:326-341, <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.3.326>
- Ventura R. A., J. López U., J. J. Vargas H. y V. Guerra de la C. (2010)** Caracterización de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el centro de México. Implicaciones para su conservación. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:107-116, <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.2.107>
- Zeileis A. and T. Hothorn (2002)** Diagnostic checking in regression relationships. *R News* 2:7-10, The R Project. Vienna, Austria. 5 p. https://cran.r-project.org/doc/Rnews/Rnews_2002-3.pdf (January 2021).

