Revista Forestal del Perú, 40 (1): 123 - 139, (2025)
ISSN 0556-6592 (Versión impresa) / ISSN 2523-1855 (Versión electrónica)
© Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú
Este es un artículo de acceso abierto bajo CC BY
DOI: https://doi.org/10.21704/rfp.v40i1.2243

Desarrollo de modelos no lineales de altura-diámetro para cuatro especies de la Amazonia peruana

Development of non-linear height-diameter models for four species of the Peruvian Amazon

Ymber Flores Bendezú[1, *]

Recibido: 03 abril 2025 | **Aceptado:** 23 junio 2025 | **Publicado en línea:** 18 julio 2025
Citación: Flores Bendezú, Y. (2025). Desarrollo de modelos no lineales de altura-diámetro para cuatro especies de la Amazonia peruana. *Revista Forestal del Perú, 40*(1): 123-139. https://doi.org/10.21704/rfp.v40i1.2243

Resumen

La relación entre la altura total y el diámetro de un árbol es fundamental en los modelos de crecimiento y productividad forestal, así como en la comprensión de la dinámica de los rodales. En este estudio, se evaluaron veinte modelos para predecir la altura total de cuatro especies forestales utilizando el diámetro a la altura del pecho: *Dipteryx ferrea*, *Amburana acreana*, *Handroanthus serratifolius* y *Parkia nitida*. Para *D. ferrea*, los modelos más adecuados fueron Rational, Exponential Association 2, Weibull, Hossfeld IV y Loetsch, destacando el modelo Rational por su alto desempeño en criterios como el coeficiente de correlación (r) y el error estándar (SE). En el caso de *A. acreana*, el modelo Hossfeld fue el más eficiente, seguido por Logistic Power y Hoerl, destacándose en r, R^2 y el error cuadrático medio (RMSE), aunque el modelo Hoerl presentó diferencias significativas con los otros modelos. Para *H. serratifolius*, los modelos más apropiados fueron Gompertz, Rational y MMF, siendo MMF el que mostró mejor desempeño en R^2 y RMSE. Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre los modelos en la predicción de la altura. Finalmente, para *P. nitida*, los modelos Hoerl y Exponential Association 2 fueron los más efectivos, destacando este último por su menor error estándar y RMSE. En general, no se encontraron diferencias significativas entre los modelos de mejor rendimiento en cuanto a la altura total observada ($p \geq 0.05$).

Palabras clave: modelos alométricos, altura total, *Dipteryx ferrea*, *Handroanthus serratifolius*, plantación forestal

[1] Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA, Estación Experimental Agraria Pucallpa, Perú.
* Autor de Correspondencia: yflores@inia.gob.pe

Abstract

The relationship between tree height and diameter is fundamental in growth and forest productivity models, as well as in understanding stand dynamics. In this study, twenty models were evaluated to predict the total height of four forest species using diameter at breast height: *Dipteryx ferrea*, *Amburana acreana*, *Handroanthus serratifolius*, and *Parkia nitida*. For *D. ferrea*, the most suitable models were Rational, Exponential Association 2, Weibull, Hossfeld IV, and Loetsch, with the Rational model standing out for its high performance in criteria such as the correlation coefficient (r) and standard error (SE). For *A. acreana*, the Hossfeld model was the most efficient, followed by Logistic Power and Hoerl, excelling in r, R^2, and root mean square error (RMSE), although the Hoerl model showed significant differences compared to the other models. For *H. serratifolius*, the most appropriate models were Gompertz, Rational, and MMF, with MMF showing the best performance in R^2 and RMSE, though no significant differences were found between the models in height prediction. Finally, for *P. nitida*, the Hoerl and Exponential Association 2 models were the most effective, with the latter standing out for its lower standard error and RMSE. In general, no significant differences were found between the best-performing models regarding the observed total height ($p \geq 0.05$).

Key words: allometric models, total height, *Dipteryx ferrea*, *Handroanthus serratifolius*, forest plantation

Introducción

La flora peruana alberga unas 4,439 especies de árboles, lo que representa el 7,4 % de la diversidad mundial (Beech et al., 2017). Sin embargo, solo unas pocas decenas son valoradas por la calidad de su madera (Guariguata et al., 2017; Vásquez y Rojas, 2022). Por ejemplo, *Guazuma crinita* y *Calycophyllum spruceanum*, se utilizan y producen en plantaciones industriales de pequeña escala. El país tiene casi medio millón de hectáreas plantadas para madera, principalmente con especies exóticas como *Eucalyptus y Pinus* (SERFOR, 2025; Guariguata et al., 2017). A nivel global, se proyecta que el consumo de productos de madera procesada primaria aumente un 37 % para 2050 (FAO, 2022), renovando el interés en la silvicultura como alternativa para la producción de productos forestales (Pirard et al., 2016).

En este contexto, el interés en los modelos de relación altura total-diámetro a la altura del pecho (dap, a 1.30 m del suelo) de especies forestales nativas ha aumentado significativamente, por su utilidad para la gestión y planificación forestal, así como para estimar atributos forestales en diferentes prácticas de manejo. Estos modelos optimizan la precisión en la estimación de parámetros como volumen, biomasa, crecimiento y productividad (Ng'andwe et al., 2019; Sharma et al., 2019; Ciceu et al., 2023). Permiten predecir la altura de los árboles no medidos, reduciendo así el tiempo y el dinero necesarios para los inventarios. Aunque la medición del dap es rápida y económica, la altura total es más complicada, ya que factores como la topografía, condiciones climatológicas y la densidad del bosque dificultan su obtención. Por ello, es fundamental desarrollar modelos precisos y eficientes de relación altura-diámetro para mejorar la toma de decisiones y reducir costos.

Los investigadores forestales miden con precisión el dap de los árboles y lo utilizan para predecir su altura, que es la principal variable de entrada en los modelos (Feldpausch et al., 2011). Las funciones altura-dap, que correlacionan estas dos variables mediante modelos matemáticos lineales o no lineales son esenciales en silvicultura. Los modelos no lineales, basados en regresión, son más realistas, más flexibles y precisos y ampliamente utilizados. Durante las últimas cinco décadas, han sido un área de interés y se han estudiado ampliamente en bosques tropicales (Baia et al., 2025; Lima et al., 2021).

No se ha encontrado ningún estudio sobre los modelos de alometría altura total-diámetro de las especies arbóreas nativas en la zona

de Von Humboldt, Ucayali. Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo desarrollar y validar los modelos alométricos de una función no lineal más precisa y confiable para cuatro especies arbóreas importantes de la Amazonia peruana.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en el Centro Alexander von Humboldt, ubicado en la Estación Experimental Agraria Pucallpa (INIA) (ver Figura 1), a 86 km al suroeste de Pucallpa, Ucayali, Perú (08°49'37"S, 75°03'17"O), a 225 m s.n.m. El clima presenta una estación lluviosa (noviembre a abril) y otra seca (mayo a octubre), con 3600 mm de precipitación anual y humedad relativa entre 80 % y 90 %. Según Holdridge, el área corresponde a Bosque Húmedo Tropical y Bosque Húmedo Premontano Tropical. El terreno es suavemente ondulado, con suelos sedimentarios de textura variable, buen drenaje, fertilidad moderada y pH entre 4.5 y 6.7 (Flores, 2025).

Descripción de la metodología

Las especies bajo estudio son *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke, *Amburana acreana* (Ducke) A. C. Smith, *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S. O. Grose y *Parkia nitida* Miquel, las cuales son conocidas en la Amazonía peruana por los nombres vernaculares de "shihuahuaco", "ishpingo", "tahuarí amarillo" y "goma huayo pashaco", respectivamente. Estas especies, de gran importancia y potencial para su uso en plantaciones forestales, han sido incorporadas en diversas plantaciones experimentales debido a su valor maderero. Además, muchas de ellas se destacan por su utilidad en la medicina y la alimentación (Flores, 2019; Saleh et al., 2021; Bezerra et al., 2022; Carvalho et al., 2024).

Para este estudio, se eligieron individuos procedentes de plantaciones experimentales con especies forestales nativas en el Centro Experimental Alexander von Humboldt, en la provincia de Padre Abad, Ucayali. El estudio incluyó un total de 67 sitios experimentales, distribuidos de la siguiente manera: 17 sitios para *D. ferrea*, 20 para *A. acreana*, 13 para *H. serratifolius* y 17 para *P. nítida*. La edad de los árboles fluctuaba entre 1 y 25 años para las especies bajo estudio. A partir de mediciones anuales, se extrajeron pares altura total-dap, eliminando aquellas observaciones con alta probabilidad de error o con valores extremos (outliers) en esta relación. Se obtuvieron finalmente 2469 observaciones, que fueron di-

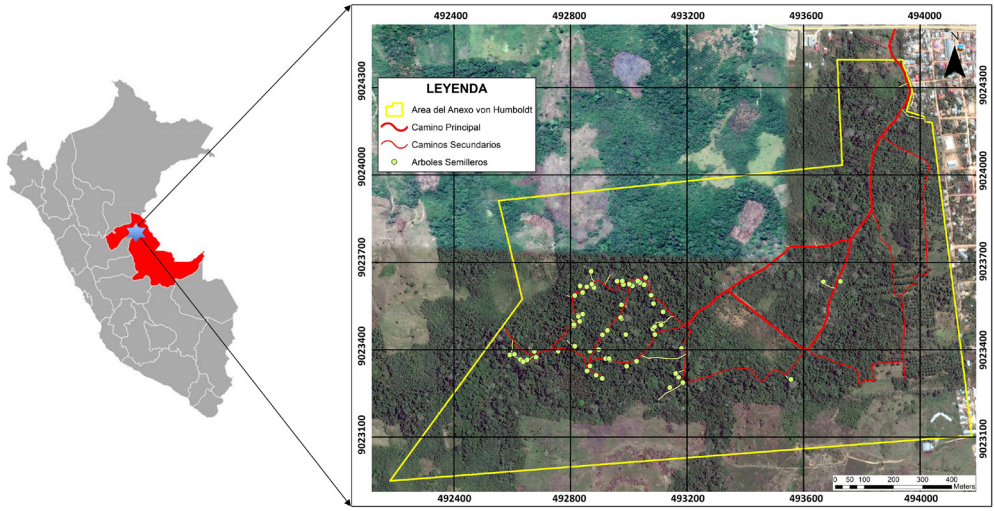

Figura 1. Ubicación del área de estudio en el Centro Experimental Von Humboldt, Ucayali.

vididas aleatoriamente: el 75 % se destinó a la construcción del modelo y el 25 % restante a su validación. *D. ferrea* presentó un dap promedio de 12.07 ± 7.00 cm y altura de 11.02 ± 4.91 m en el conjunto de entrenamiento (n = 420), valores similares al conjunto de validación (n = 140). *A. acreana* mostró menores promedios de dap y altura (8.21 ± 5.56 cm y 8.02 ± 4.32 m; n=519), mientras que *H. serratifolius* y *P. nitida* tuvieron promedios mayores, especialmente esta última, con 13.06 ± 5.75 cm de dap y 11.59 ± 4.18 m de altura en el grupo mayoritario. Los rangos indican una alta variabilidad intraespecífica.

Se evaluaron 20 modelos de regresión no lineal para describir la relación altura-dap (Cuadro 1), seleccionados por su uso frecuente en la literatura (Burkhart y Tomé, 2012; Jorge, 2023). El ajuste se realizó con el software CurveExpert Professional v2.7.3 (Hyams, 2021), y los modelos fueron clasificados según su desempeño estadístico. Los criterios empleados incluyeron el error estándar (SE), el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de correlación (r), el error cuadrático medio (RMSE), el sesgo y el criterio de información de Akaike (AIC). Estos indicadores permiten evaluar tanto el ajuste como la precisión y complejidad de los modelos. Para identificar los cinco modelos con mejor ajuste (Qiu et al., 2021), se utilizó la ecuación de clasificación relativa (Poudel y Cao, 2013), que asigna rangos del mejor al peor modelo según cada criterio, superando las limitaciones de los métodos ordinales simples (Doyog et al., 2017). Esta técnica permite comparar modelos con mayor detalle y agrupar aquellos con comportamientos similares (Anacioco et al., 2018; Ng'andwe et al., 2019). Además, se aplicó la prueba t para muestras pareadas con el fin de evaluar si existían diferencias significativas entre los valores observados y los estimados por los modelos seleccionados, valorando así su capacidad predictiva. Para la validación visual, se elaboraron gráficos de dispersión comparando la altura observada frente a la estimada para cada modelo. Las curvas de predicción se generaron usando los parámetros ajustados aplicados sobre un rango continuo de valores de dap, lo que permitió observar el comportamiento del modelo en todo el espectro de datos. Las expresiones matemáticas utilizadas se presentan en el Cuadro 2.

Resultados

Cinco modelos se ajustaron adecuadamente para *D. ferrea*: Rational, Exponential Association 2, Weibull, Hossfeld IV y Loetsch (Cuadro 3). La evaluación mostró que el modelo Rational presentó el coeficiente de correlación (r) más alto (0.902). El coeficiente de determinación (R^2) varió entre 0.811 y 0.813, destacando Rational. En cuanto al error estándar (SE), Rational también fue el mejor. Los valores de AIC y RMSE fueron más bajos para Rational, mientras que Loetsch mostró los peores resultados en varias métricas. La prueba t (Cuadro 4) no reveló diferencias significativas entre los modelos ($p \geq 0.05$), lo que sugiere que todos fueron efectivos en la predicción de la altura total de *D. ferrea*. La Figura 2 compara valores observados y estimados, mostrando una tendencia creciente entre altura y dap, aunque la precisión varía según el modelo y el rango. Hossfeld IV muestra un ajuste más consistente, especialmente en dap intermedios y altos (Figura 2d). El modelo Rational tiende a subestimar en dap altos (Figura 2a), y Weibull presenta mayor dispersión en valores bajos (Figura 2c). Estas gráficas complementan los análisis estadísticos y permiten una evaluación más integral del ajuste.

Los cinco modelos más adecuados para *A. acreana* fueron: Hossfeld, Rational, Hoerl, Logistic Power y Weibull, en ese orden (Cuadro 3). El valor de r varió entre 0.8722 y 0.8724, siendo el modelo de Weibull el de mayor valor. En cuanto a R^2, osciló entre 0.7607 para el modelo Rational y 0.7611 para Weibull. El error estándar fue de 0.1651 a 0.1661, con Hossfeld como el más bajo y Weibull el más alto. El AIC fluctuó entre 779.186 y 781.734, con el modelo Hossfeld en la mejor posición. El RMSE varió entre 2.1102 y 2.1095, destacando a Weibull con el valor más bajo. Además, el sesgo osciló entre -0.000151 y 0.01446, siendo el modelo Rational el de menor valor (Cuadro 3). El análisis t mostró diferencias significati-

N°	Nombre del modelo	Ecuación	Fuente
1	Burkhart	$h = 1.30 + ae^{(b/dap)}$	Burkhart y Strub (1974), Burk y Burkhart (1984), Buford (1986)
2	Curtis	$h = 1.30 + a\left(\frac{dap}{1+dap}\right)^b$	Curtis (1967)
3	Exponential Association 2	$h = a(1 - e^{-b.dap})$	Hyams (2021)
4	Gompertz	$h = a.e^{-b.e^{-c.dap}}$	Gompertz (1825)
5	Hoerl	$h = a.b^{dap}.dap^c$	Hoerl y Kennard (1970)
6	Hossfeld IV	$h = \frac{c.dap^b}{(a + dap^b)}$	Cieszewski (2003)
7	Korf/Lundqvist	$h = 1.30 + a.e^{(-b.dap^{-c})}$	Stage (1963), Zeide (1989)
8	Larson	$h = 1.30 + 10^a + dap^b$	Larson (1986)
9	Loetsch	$h = 1.30 + dap^2/(a + b.dap)^2$	Loetsch et al. (1973)
10	Logistic Power	$h = \frac{a}{(1 + (\frac{dap}{b})^c)}$	Hyams (2021)
11	Logistic	$h = \frac{a}{1 + b.e^{-c.dap}}$	Winsor (1932)
12	Meyer	$h = 1.30 + a(1 - e^{(-b.dap)})$	Meyer (1940), Farr et al. (1989)
13	MMF (Morgan–Mercer–Flodin)	$h = \frac{ab + c.dap^d}{b + dap^d}$	Morgan et al. (1975)
14	Natural logaritm	$h = a + b.\ln(dap)$	Hyams (2021)
15	Prodan	$h = 1.30 + dap^2/(a.dap^2 + b.dap + c)$	Curtis (1967), Prodan et al. (1968)
16	Rational Model	$h = \frac{a + b.dap}{1 + c.dap + d.dap^2}$	Hyams (2021)
17	Ratkowsky	$h = 1.30 + a.e^{(\frac{-b}{c+dap})}$	Ratkowsky (1990)
18	Schumacher	$h = a.e^{(-b.dap^{(-1)})}$	Schumacher (1939)
19	Weibull	$h = 1.30 + a(1 - e^{-b.dap^c})$	Huang et al. (1992), Yang et al. (1978)
20	Wykoff	$h = 1.30 + e^{(a + \frac{b}{1+dap})}$	Winsor (1932), Schreuder et al. (1979), Wykoff et al. (1982)

Cuadro 1. Lista de modelos de regresión no lineal para la relación altura total-dap empleados en el presente estudio.

Nombre de estadístico	Ecuación
Coeficiente de Determinación	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(hi - \hat{h}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(hi - \bar{h}_i)^2}$
Error Cuadrático Medio	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(hi - \widehat{h_i})^2}$
Sesgo Medio	$Sesgo = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(hi - \widehat{h_i})$
Criterio de Información de Akaike	$AIC = 2k - 2\ln(L)$
Ecuación de clasificación relativa	$R_i = 1 + \frac{(m - 1)(Si - Smin)}{(Smax - Smin)}$

Cuadro 2. Criterios de rendimiento utilizados para evaluar el desempeño de los diferentes modelos candidatos de altura-dap (Anacioco et al., 2018; Ige et al., 2013). Nota: h_i es el valor observado de la altura, $\hat{h}_i$ es el valor predicho de la altura, *n* es el número de datos. *RSS* es la suma residual de cuadrados y *k* es el número de parámetros estimados. R_i es el rango relativo del método *i* (*i* = 1, 2…m), S_i es la estadística de bondad de ajuste producida por el método *i*, S_{min} es el valor mínimo de S_i, S_{max} es el valor máximo de S_i.

vas en la altura predicha por el modelo Hoerl ($p \geq 0.05$), lo que indicó que este modelo no fue adecuado para predecir la altura total de *A. acreana* (Cuadro 4). La Figura 3 compara cinco modelos alométricos aplicados a la estimación de altura total en función del dap, así como las tres mejores curvas superpuestas. Todos los modelos capturan la tendencia creciente de la altura, pero presentan variaciones en precisión. Hoerl, Hossfeld y Rational (Figura 3c, 3a y 3b respectivamente) destacan por su buen ajuste visual, especialmente en rangos intermedios y altos del dap. Por otro lado, cinco modelos se ajustaron adecuadamente para *H. serratifolius*: Gompertz, Rational, Weibull, MMF y Prodan, en ese orden (Cuadro 3). El coeficiente de correlación (r) varió entre 0.9001 y 0.8993, destacando MMF; el coeficiente de determinación (R^2) estuvo entre 0.8088 y 0.8103, con MMF como el mejor; el error estándar (SE) osciló entre 0.1492 y 0.1495, siendo Gompertz el menor; el AIC estuvo entre 523.693 y 527.064, con Prodan como el más alto; el RMSE varió entre 1.6471 y 1.6535, con MMF como el mejor; y el sesgo fluctuó entre -0.000017 y -0.001409, siendo Prodan el menor. El análisis de clasificación relativa mostró que los mejores modelos fueron Gompertz y Rational (Cuadro 3). La prueba t (Cuadro 4) no mostró diferencias significativas en la altura observada entre los modelos ($p \geq 0.05$).

Para *P. nitida*, los cinco modelos más destacados fueron Hoerl, Weibull, Hossfeld IV, Prodan y Exponential Association 2 (Cuadro 3). La evaluación reveló que los valores de r y R^2 fueron muy altos, con r entre 0.8442 y 0.8448 (Weibull el más alto) y R^2 entre 0.7112 (Exponential Association 2) y 0.7137 (Weibull). El error estándar varió entre 0.1818 y 0.1849, con Weibull el más bajo. El AIC osciló entre 611.441 y 614.091, con Exponential Association 2 como el más bajo. El RMSE fue de 2.2350 a 2.2392, y el sesgo entre -0.000144 y 0.01977, siendo Weibull el más bajo. Los modelos Exponential Association 2 y Hoerl ocuparon los primeros lugares, seguidos por Hossfeld IV, Weibull y Prodan (Cuadro 3, Figura 5). La prueba t (Cuadro 4) no mostró diferencias significativas en la altura total observada entre los modelos ($p \geq 0.05$).

Especie	Clasificación de modelo	Nombre del modelo	Parámetros del modelo				r	R2	Error Standard	AIC	RMSE	Bias	Ranking general
			a	b	c	d							
D. ferrea	M1	Rational model	0.234853	1.291403	0.024124	0.000291	0.901622	0.812923	0.215276	637.959774	2.121757	0.014469	1.0000
	M2	Exponen-tial Associ-ation 2	24.044685	0.056483			0.901526	0.812749	0.216669	634.302544	2.122607	0.005011	1.0000
	M3	Weibull	25.087638	25.382385	0.061569	0.947976	0.901563	0.812816	0.216068	638.200882	2.122230	-0.000148	2.8887
	M4	Hossfeld IV	27.54885745	0.025868561	-1.277481842		0.901003	0.811806	0.214631	638.430560	2.127939	-0.012257	3.0000
	M5	Loesch	1.433402	0.187097			0.900724	0.811303	0.217712	637.533152	2.130792	0.017159	2.5652
A. acreana	M1	Hossfeld	60.187395	0.798159	102.764861		0.872364	0.761018	0.165176	779.186366	2.110205	-0.002962	1.0000
	M2	Rational model	0.539991	1.267217	0.038451	-0.000303	0.872224	0.760775	0.165435	781.734553	2.111163	-0.000151	2.4506
	M3	Hoerl	1.720132	0.995331	0.771707		0.872331	0.760961	0.166084	779.308138	2.110345	-0.003564	1.1386
	M4	Logistic Power	102.721254	169.517363	-0.798190		0.872349	0.760993	0.166084	779.239698	2.110205	-0.002875	1.0911
	M5	Weibull	297.500587	298.562201	0.008181	0.653048278	0.872433	0.761140	0.166084	780.943013	2.109553	0.014469	5.0000
H. serratifolius	M1	Gompertz	17.632355	0.737170	0.103029		0.900039	0.810070	0.149291	523.693309	1.648206	-0.001409	1.0000
	M2	Rational model	1.772945	0.643604	-0.007663	0.000595	0.900075	0.810134	0.149459	525.541032	1.647927	-0.000717	1.5480
	M3	Weibull	18.336672	16.068394	0.022953	1.319100199	0.900150	0.810270	0.149432	525.169550	1.647339	-0.000034	1.8757
	M4	MMF	2.492847	79.032963	22.696266	1.514418161	0.900174	0.810313	0.149438	525.051804	1.647153	-0.000115	2.2088
	M5	Prodan	0.025010	1.161694	0.008188		0.899353	0.808835	0.149307	527.064914	1.653555	-0.000017	5.0000
P. nitida	M1	Hoerl	1.515722	0.987100	0.871649		0.844784	0.713660	0.182107	612.180604	2.235426	0.002136	1.0000
	M2	Weibull	25.464373	23.807404	0.031858	1.122185	0.844838	0.713751	0.181771	614.091827	2.235069	-0.000114	2.0000
	M3	Hossfeld IV	34.875826	0.023606	-1.141417		0.844699	0.713515	0.181937	612.370974	2.235989	0.001327	1.7013
	M4	Prodan	0.024836	0.836214	0.762318		0.844614	0.713372	0.181816	612.560716	2.236551	0.000623	2.0519
	M5	Exponen-tial Associ-ation 2	25.522732	0.049057			0.844208	0.711268	0.184958	611.441788	2.239222	0.019775	1.0000

Cuadro 3. Clasificaciones, parámetros del modelo y estadísticas de evaluación según criterios de rendimiento de los cinco mejores modelos para *D. ferrea*, *A. acreana*, *H. serratifolius* y P *nitida*.

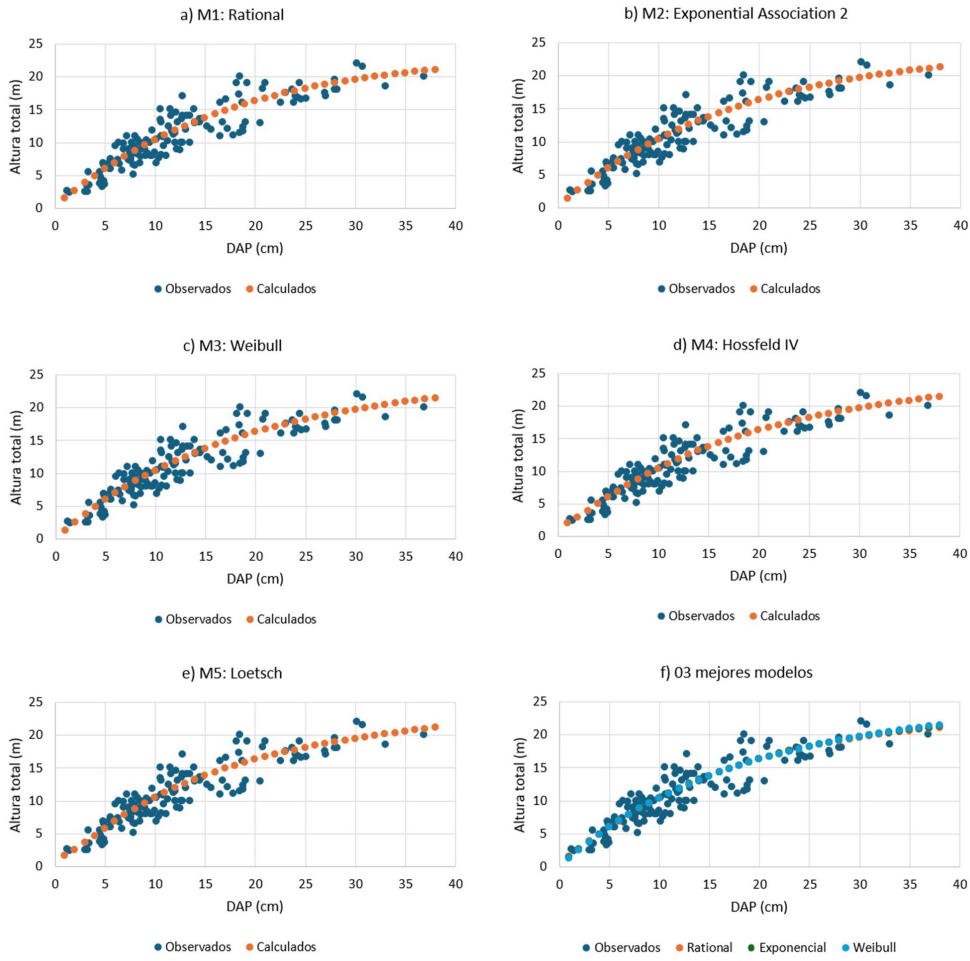

Figura 2. Gráfico de dispersión (a-e) de los valores observados reales frente a los valores estimados de altura para *D. ferrea* basado en cinco modelos diferentes y gráfico de la altura predicha (f) frente al diámetro de los tres mejores modelos de altura-diámetro de *D. ferrea*.

Discusión

Un valor elevado de r y R^2 (cercano a 1) indica un buen ajuste del modelo a los datos (Lumbres et al., 2013). Los altos valores obtenidos muestran que los modelos seleccionados estiman con precisión la altura de las especies analizadas, favorecido por el alto número de observaciones empleadas en este estudio. Investigaciones previas han señalado que la variación en las predicciones de la altura residual puede estar relacionada tanto con la escasez de datos como con su heterogeneidad (Anacioco et al., 2018). Los modelos de altura-diámetro son sensibles a factores como la tipología de los rodales, la fertilidad del suelo, las condiciones climáticas y las intervenciones humanas, lo que sugiere que su precisión podría mejorar con modelos adaptados a condiciones regionales y específicas (Kearsley et al., 2017).

Un menor valor de RMSE y sesgo indica un modelo de mayor calidad en comparación con aquellos que presentan valores más altos (Lumbres et al., 2013). Clasificar los árboles según

Especie	N°	Nombre de modelo	Comparación (Obs - Mod)	Valor de t	Significancia
D. ferrea	1	Rational model	Observado - Modelo 1	0.13959	0.88904 ns
	2	Exponential Association 2	Observado - Modelo 2	0.04833	0.96147 ns
	3	Weibull	Observado - Modelo 3	-0.00143	0.99886 ns
	4	Hossfeld IV	Observado - Modelo 4	-0.11791	0.90619 ns
	5	Loesch	Observado - Modelo 5	0.16484	0.86914 ns
A. acreana	1	Hossfeld IV	Observado - Modelo 1	-0.03195	0.97452 ns
	2	Rational model	Observado - Modelo 2	-0.00163	0.99869 ns
	3	Hoerl	Observado - Modelo 3	-3.06647	0.00227 *
	4	Logistic Power	Observado - Modelo 4	-0.03101	0.97527 ns
	5	Weibull	Observado - Modelo 5	0.00940	0.99250 ns
H. serratifolius	1	Gompertz	Observado - Modelo 1	-0.01948	0.88905 ns
	2	Rational model	Observado - Modelo 2	-0.00992	0.99209 ns
	3	Weibull	Observado - Modelo 3	-0.00047	0.99962 ns
	4	MMF	Observado - Modelo 4	-0.00159	0.99873 ns
	5	Prodan	Observado - Modelo 5	-0.00024	0.99981 ns
P. nitida	1	Hoerl	Observado - Modelo 1	0.11668	0.90712 ns
	2	Weibull	Observado - Modelo 2	0.09701	0.92277 ns
	3	Hossfeld IV	Observado - Modelo 3	0.10964	0.91275 ns
	4	Prodan	Observado - Modelo 4	0.10327	0.91780 ns
	5	Exponential Association 2	Observado - Modelo 5	0.27193	0.78583 ns

Cuadro 4. Prueba t de muestras pareadas entre la altura observada y la altura modelada para el *D. ferrea*, *A. acreana*, *H. serratifolius* y *P. nitida*.

su dap podría mejorar la precisión del modelo (Mugasha et al., 2019). El dap, aunque es una medida común, no refleja por sí solo la variabilidad influida por factores biológicos y ambientales. Incluir variables como la edad de los árboles, la fertilidad del suelo y la superficie de la copa mejora la precisión en estimaciones de altura total y la gestión forestal sostenible (Ige et al., 2013).

Los valores de sesgo en los modelos indican la precisión de las predicciones: un sesgo negativo sugiere una sobrepredicción, mientras que un valor positivo implica una subpredicción. Los modelos de Hossfeld IV para *D. ferrea* (-0.0122 m), Hoerl para *A. acreana* (-0.0035 m) y Gompertz para *H. serratifolius* (-0.0014 m) presentaron los mayores sesgos negativos, mientras que el modelo de Prodan para *H. serratifolius* (-0.000017 m) fue el más preciso.

El modelo de Weibull fue el más utilizado, estuvo entre los cinco mejores para las cuatro especies analizadas. Su flexibilidad lo hace muy eficaz, siendo la distribución de Weibull de tres parámetros (Weibull, 1951) la más común para describir variables como altura del tronco o diámetro en diversas edades (Duursma, 2011). En Brasil, Baia et al. (2025) encontraron que modelos asintóticos como Weibull se ajustan mejor a la relación altura-diámetro en bosques de tierra firme y várzea, lo que resalta la importancia de emplear modelos locales para mejorar la precisión alométrica en varios tipos de bosques.

En el caso de *D. ferrea*, el modelo Rational fue el más eficaz (Cuadro 3), destacándose por sus excelentes resultados en parámetros clave como el coeficiente de correlación (r), el coeficiente de determinación (R^2) y el error están-

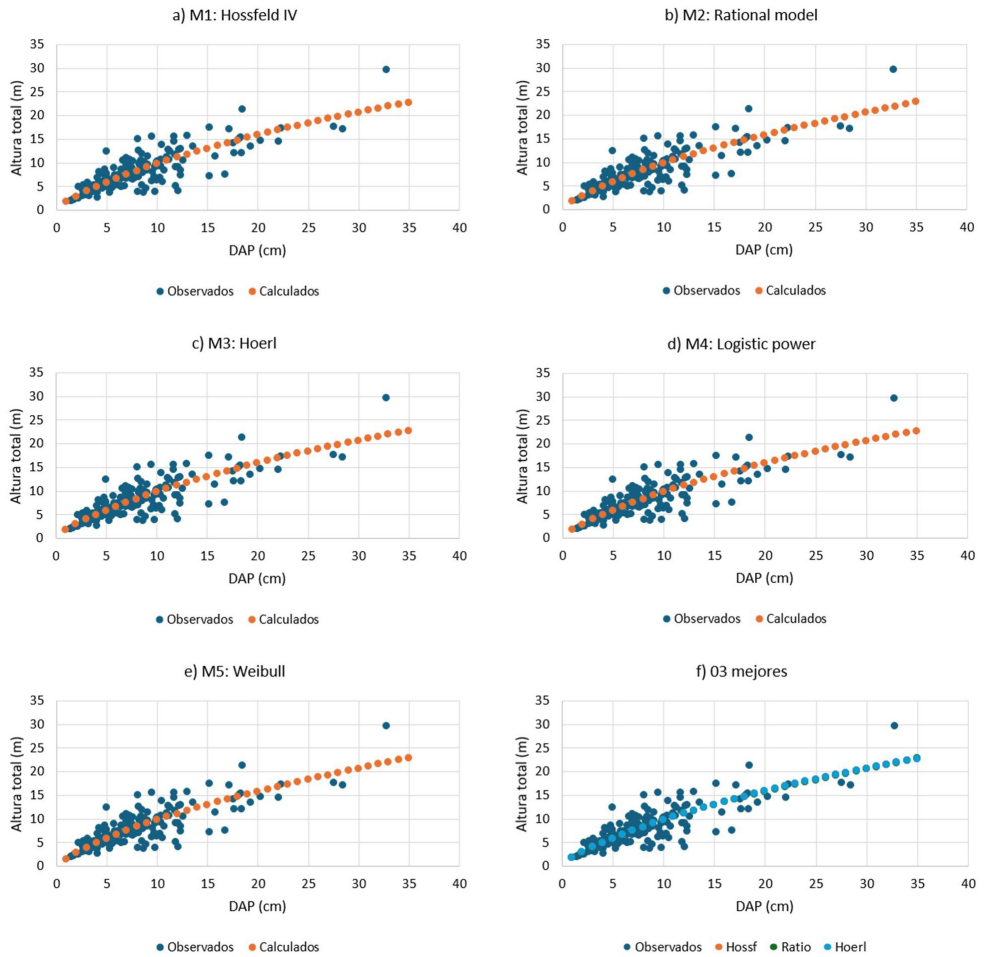

Figura 3. Gráfico de dispersión (a-e) de los valores observados reales frente a los valores estimados de altura para *A. acreana* basado en cinco modelos diferentes y gráfico de la altura predicha (f) frente al diámetro de los tres mejores modelos de altura-diámetro de *A. acreana*.

dar (SE), lo que lo convierte en el más preciso y consistente para predecir la altura total de esta especie. Exponential Association 2 también mostró un buen rendimiento, ocupando el segundo lugar. Por otro lado, el modelo Loetsch fue el que obtuvo el peor desempeño en términos de error estándar, RMSE y sesgo. Esta fuerte correlación entre altura total y dap también ha sido observada en otras especies de *Dipteryx* spp. en plantaciones mixtas en Pará, Brasil (Lopes et al., 2023).

En el caso de *A. acreana*, el modelo Weibull presentó el valor más alto de r, lo que indica una mejor relación entre las predicciones y los datos observados. El modelo Rational, por otro lado, mostró el valor más bajo de r. Los valores de R^2 fueron muy similares entre ambos modelos, con Weibull ligeramente mejor. El modelo Hossfeld IV tuvo el error estándar más bajo, lo que refleja una mayor consistencia en sus predicciones. En comparación, Weibull presentó el error estándar más alto.

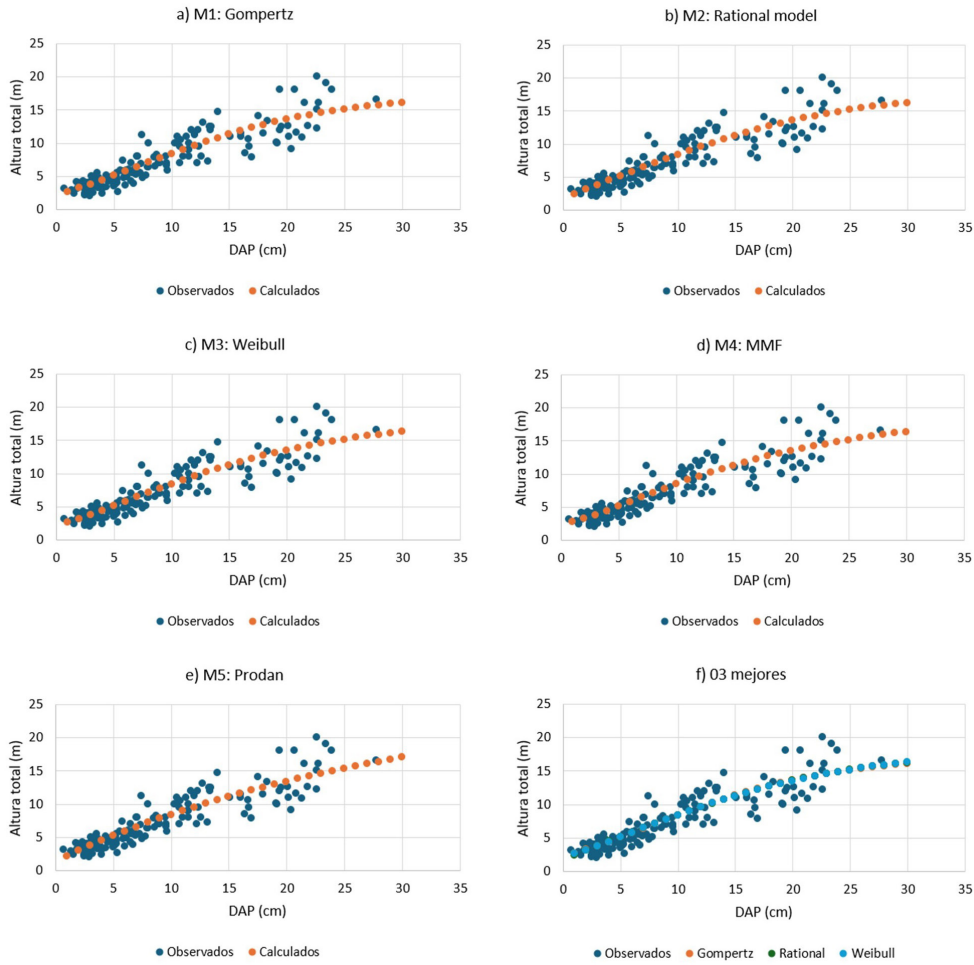

Figura 4. Gráfico de dispersión (a-e) de los valores observados reales frente a los valores estimados de altura para *H. serratifolius* basado en cinco modelos diferentes y gráfico de la altura predicha (f) frente al diámetro de los tres mejores modelos de altura-diámetro de *H. serratifolius*.

Hossfeld IV fue el modelo que mejor se ajustó y presentó el rendimiento más destacado, seguido por Logistic Power y Hoerl. En cambio, Rational mostró el peor desempeño en aspectos como AIC, RMSE y sesgo, lo que lo hace menos eficiente. Finalmente, el modelo Hoerl mostró diferencias significativas en la predicción, indicando que no es adecuado para este tipo de ajuste.

Para *H. serratifolius*, todos los modelos presentaron valores de r cercanos a 1, lo que sugiere un buen ajuste de los modelos (Cuadro 3). El modelo MMF obtuvo el valor más alto en r, demostrando la mejor relación entre las predicciones y los datos observados, mientras que Gompertz y Prodan tuvieron los valores más bajos. MMF también destacó en el coeficiente de determinación (R^2) y presentó el RMSE más bajo, indicando mayor precisión. La Figura 3 compara cinco modelos no lineales para estimar la altura en *H. serratifolius*. Gompertz, Rational y Weibull (Figura 4a, 4b y 4c) ofre-

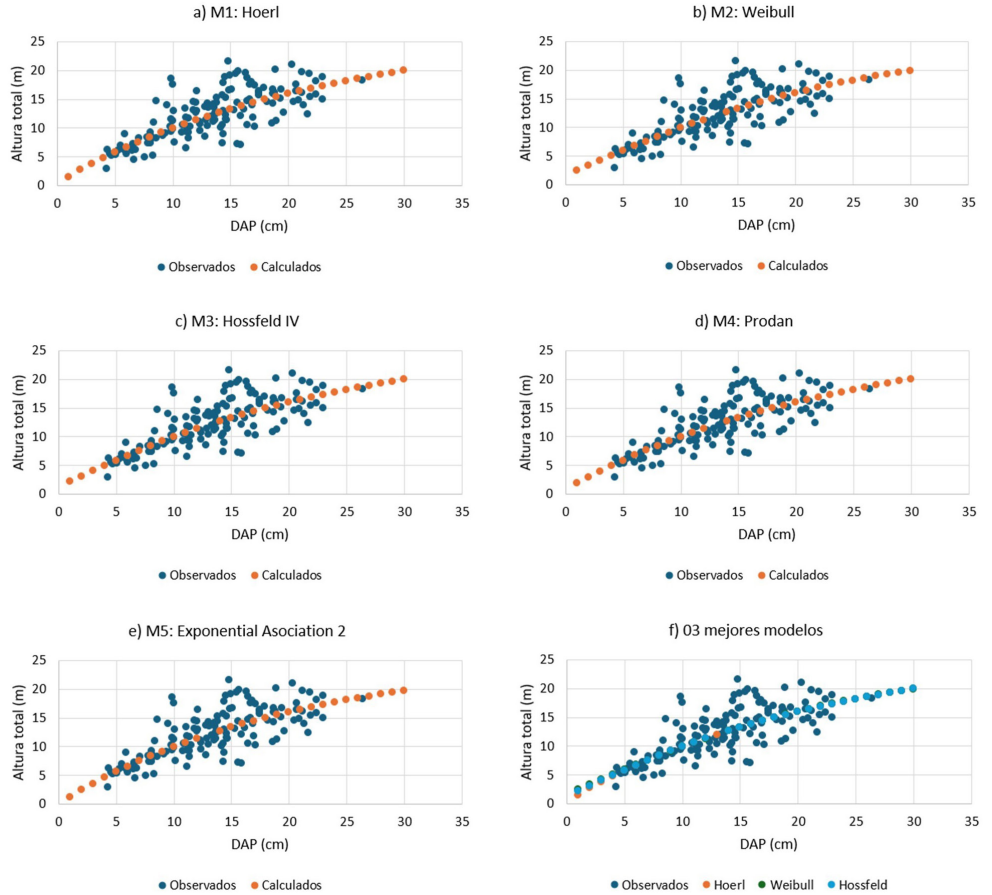

Figura 5. Gráfico de dispersión (a-e) de los valores observados reales frente a los valores estimados de altura para *P. nitida* basado en cinco modelos diferentes y gráfico de la altura predicha (f) frente al diámetro de los tres mejores modelos de altura-diámetro de *P. nitida*.

cieron los mejores ajustes, siendo Weibull el más equilibrado en todo el rango de dap. MMF y Prodan mostraron mayor dispersión y menor precisión (Figura 4e y 4d). La literatura sobre *Handroanthus heptaphyllus* en Brasil (Schröder, 2017) sugiere que los Modelos Mixtos Aditivos Generalizados produjeron un menor AIC que los obtenidos en este estudio para *H. serratifolius*.

En *P. nitida*, los modelos Hoerl y Exponential Association 2 fueron los más destacados en el análisis de clasificación (Cuadro 3). Aunque ambos mostraron un buen rendimiento, Exponential Association 2 presentó mayor sesgo y menor precisión que Hoerl. El modelo Weibull destacó en r, R^2, SE, RMSE y sesgo, pero su AIC más alto sugiere menor eficiencia. Prodan presentó el peor desempeño. La Figura 5 muestra los ajustes de cinco modelos alométricos para estimar la altura en *P. nitida*. Hoerl, Weibull y Hossfeld IV (Figura 5a, 5b y 5c) presentaron los mejores desempeños, con ajustes consistentes y baja dispersión. Prodan y Exponential Association 2 (Figura 5d y 5e) mostraron menor precisión, especialmente en diámetros mayores. En comparación, para *Parkia biglobosa* en Wasangare, Nigeria, los modelos de Meyer y Logístico Modificado

fueron los mejores predictores de la relación altura-dap (Onilude et al., 2023).

El modelo Weibull mostró un desempeño consistente al representar relaciones altura-diámetro en varias especies, confirmando su versatilidad como modelo base confiable sin calibraciones locales específicas. Las diferencias en el desempeño de los modelos podrían estar asociadas con la arquitectura específica de cada especie, como la tendencia a presentar fustes rectos y dominantes (como en *D. ferrea*) o copas más extendidas y variables (como en *P. nitida*), lo que sugiere una relación funcional entre la morfología y la capacidad predictiva.

Si bien los modelos evaluados mostraron buen ajuste general, el presente estudio se limitó a relaciones bivariadas sin incorporar variables edáficas, estructurales o climáticas, lo cual podría mejorar la precisión en contextos más heterogéneos. A diferencia de estudios previos centrados en especies individuales o en bosques específicos, este análisis comparativo de varias especies bajo condiciones de la Amazonia peruana proporciona una base empírica robusta para orientar futuras calibraciones locales.

Conclusiones

Se seleccionaron los modelos alométricos no lineales con mayor capacidad predictiva y versatilidad para estimar la altura total a partir del dap en cuatro especies amazónicas de interés comercial, los cuales mostraron un ajuste adecuado, con coeficientes de correlación y determinación elevados, así como errores estándar, RMSE y sesgos bajos. Para *D. ferrea*, el modelo más adecuado es Rational, destacando por su consistencia y precisión. Exponential Association 2 también es viable, mientras que Loetsch debe evitarse debido a su bajo rendimiento. En *A. acreana*, Weibull es el modelo más eficiente, seguido de Hossfeld IV. Rational presenta un rendimiento bajo y Hoerl muestra diferencias significativas, por lo que se desaconseja. En *H. serratifolius*, MMF sobresale por su precisión, seguido de Gompertz, mientras que Prodan debe evitarse. En *P. nítida*, Hoerl y Exponential Association 2 son los más adecuados, con Weibull mostrando buen rendimiento, pero menor eficiencia. El modelo Weibull se posicionó consistentemente entre los cinco mejores para todas las especies, confirmando su versatilidad y aplicabilidad en diferentes contextos morfológicos. Aunque se utilizaron solo relaciones bivariadas, los modelos demostraron ser herramientas útiles para la estimación de altura en bosques tropicales. Este estudio comparativo, desarrollado en condiciones de la Amazonía peruana, aporta una base empírica sólida para futuras calibraciones locales y mejora del ajuste alométrico en la región.

Agradecimientos

El autor agradece al siguiente personal técnico del Programa Nacional Forestal de INIA: Ramón Pacaya, Tulio Amasifuén, Eliseo Ruiz, Ramón Lozano y Venancio Palomino.

Contribución de los autores

YFB: participó en la recopilación de información, su análisis y la redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflictos de intereses.

Fuentes de financiamiento

El autor agradece al Programa Nacional Forestal del INIA, por el apoyo financiero y logístico a través del Programa presupuestal 0121 “Mejora de la Articulación de los Pequeños Productores Agropecuarios a los Mercados”.

Aspectos éticos/legales

Este estudio se realizó en cumplimiento con las normas éticas y legales vigentes.

ID ORCID

Ymber Flores Bendezú

https://orcid.org/0000-0002-4822-2089

Referencias

Anacioco, K. P., Gorio, J. A. L., Padsico, M. R. S., Lumbres, R. I. C., Doyog, N. D. y Lee, Y. J. (2018). Fitting and evaluation of height-diameter models for *Alnus japonica* in La Trinidad, Benguet, Philippines. *Journal of Mountain Science, 15*, 2422–2432. https://doi.org/10.1007/s11629-018-4866-9

Baia, A. L. P., Nascimento, H. E. M., Guedes, M., Hilário, R. y Toledo, J. J. (2025). Tree height-diameter allometry and implications for biomass estimates in Northeastern Amazonian forests. *PeerJ, 13*, e18974. https://doi.org/10.7717/peerj.18974

Beech, E., Rivers, M., Oldfield, S. y Smith, P. P. (2017). GlobalTreeSearch: The first complete global database of tree species and country distributions. *Journal of Sustainable Forestry*, 36(5), 454–489. https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1310049

Bezerra, J. J. L., Johanes, I. y Pinheiro, A. A. V. (2022). Anticancer potential and toxicity of the genus *Handroanthus* Mattos (Bignoniaceae): A systematic review. *Toxicon, 219*, 131-142. https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2022.08.007

Buford, M. A. (1986). Height–diameter relationship at age 15 in loblolly pine seed sources. *Forest Science*, 32(3), 812–818. https://doi.org/10.1093/forestscience/32.3.812

Burk, E. T. y Burkhart, E. H. (1984). *Diameter distributions and yields of natural stands of loblolly pine* (Publication No. FWS-1-84, 20 pp.). Virginia Polytechnic Institute and State University, School of Forestry and Wildlife Resources. https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/85561ae9-4286-4aef-a8f1-b1fe4fb4a78c/content

Burkhart, H. E. y Strub, M. R. (1974). A model for simulation of planted loblolly pine stands. In J. Fries (Ed.), *Growth models for tree and stand simulation* (Research Note No. 30, pp. 128–135). Royal College of Forestry.

Burkhart, H. y Tomé, M. (2012). *Modeling forest trees and stands*. Springer.

Carvalho, C. S., Cardoso, D. B. O. S. y Lima, H. C. (2024). A taxonomic revision of *Dipteryx*, a Neotropical papilionoid legume genus of tonka beans and cumaru giant trees. *Systematic Botany Monographs, 115*, 1-69.

Ciceu, A., Chakraborty, D. y Ledermann, T. (2023). Examining the transferability of height–diameter model calibration strategies across studies. *Forestry, 63*, 1–14. https://doi.org/10.1093/forestry/cpad063

Cieszewski, C. J. (2003). Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function $Y^3 = (ax^m)/(c + x^{m-1})$, a simplified mixed-model, and scant subalpine fir data. *Forest Science, 49*(4), 539–554.

https://doi.org/10.1093/forestscience/49.4.539

Curtis, R. O. (1967). Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *Forest Science, 13*(4), 365–375.

Doyog, N. D., Lee, Y. J. y Lee, S. (2017). Stem taper equation analysis for Larix kaempferi species in the central region of South Korea. *Journal of Sustainable Forestry, 36*(8), 747–763. https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1356737

Duursma, R. A. (2011). Physiological ecology of forest production: Principles, processes, and models [Review of the book Physiological ecology of forest production: Principles, processes, and models by J. Landsberg & P. Sands]. *Tree Physiology, 31*(6), 680–681. https://doi.org/10.1093/treephys/tpr062

Farr, W. A., DeMars, D. J. y Dealy, J. E. (1989). Height and crown width related to diameter for open-grown western hemlock and Sitka spruce. *Canadian Journal of Forest Research, 19*(9), 1103–1107. https://doi.org/10.1139/x89-181

Feldpausch, T. R., Banin, L., Phillips, O. L., Baker, T. R., Lewis, S. L., Quesada, C. A., Affum-Baffoe, K., Arets, E. J. M. M., Berry, N. J., Bird, M., Brondizio, E. S., de Camargo, P., Chave, J., Djagbletey, G., Domingues, T. F., Drescher, M., Fearnside, P. M., França, M. B., Fyllas, N. M., Lopez-Gonzalez, G., Hladik, A.,

Higuchi, N., Hunter, M. O., Iida, Y., Salim, K. A., Kassim, A. R., Keller, M., Kemp, J., King, D. A. y Lovett, J. C. (2011). Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences, 8*(5), 1081–1106. https://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011

Flores, Y. (2019). Fichas técnicas para plantaciones con especies nativas en zona de selva baja. *Instituto Nacional de Innovación Agraria*.

Flores, Y. (2025). Crecimiento del "shihuahuaco" *Dipteryx ferrea* (Ducke) Ducke en plantaciones bajo diferentes espaciamientos y tipos de suelo en Ucayali, Amazonía peruana. *Revista Forestal Del Perú, 39*(2), 238-255. https://doi.org/10.21704/rfp.v39i2.1829

Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2022). *Technical paper (FAO Forestry Paper No. 188). FAO*. https://www.fao.org/3/cc2265en/cc2265en.pdf

Gompertz, B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 115*, 513–583. https://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026

Guariguata, M. R., Ace, J., Ammour, T. y Capella, J. L. (2017). Las plantaciones forestales en Perú: Reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro. *Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR) (Vol. 169)*.

Hoerl, A. E. y Kennard, R. W. (1970). Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics, 12*(1), 55–67. https://doi.org/10.1080/00401706.1970.10488634

Hyams D. G. (2021). CurveExpert Professional (Versión 2.7.3) [Software]. https://www.curveexpert.net

Ige, P. O., Akinyemi, G. O. y Smith, A. S. (2013). Non-linear growth functions for modeling tree height–diameter relationships for *Gmelina arborea* (Roxb.) in south-west Nigeria. *Forest Science and Technology, 9*(1), 20–24. http://dx.doi.org/10.1080/21580103.2013.773662

Jorge, L. A. B. y Eufrade Junior, H. de J. (2023). Dendrometria e inventário florestal com aplicações em R. Botucatu, SP: Os Autores. http://dx.doi.org/10.4322/978-65-00-61090-1

Kearsley, E., Moonen, P. C. J., Hufkens, K., Doetterl, S., Lisingo, J., Boyemba Bosela, F., Boeckx, P., Beeckman, H. y Verbeeck, H. (2017). Model performance of tree height-diameter relationships in the central Congo Basin. *Annals of Forest Science, 74*(1), Article 7. https://doi.org/10.1007/s13595-016-0611-0

Larson, B. C. (1986). Development and growth of even-aged stands of Douglas-fir and grand fir. *Canadian Journal of Forest Research*, *16*(2), 367–372. https://doi.org/10.1139/x86-063

Lima, R. B., Görgens, E. B., Elias, F., Abreu, J. C., Baia, A. L., Oliveira, C. P., Silva, D. A. S., Batista, A. P. B., Lima, R. C., Sotta, E. D. y Ferreira, R. L. C. (2021). Height-diameter allometry for tropical forest in northern Amazonia. *PLOS ONE, 16*(12), e0255197. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255197

Loetsch, F., Zöhrer, F. y Haller, K. E. (1973). *Forest inventory*. BLV Verlagsgesellschaft.

Lopes, L. S. de S., Pauletto, D., Gomes, E. S. C., Silva, Á. F. da, Oliveira, T. G. de S., Silva, J. A. G. da, Baloneque, D. D. y Martorano, L. G. (2023). Dendrometric relationships and biomass in commercial plantations of *Dipteryx* spp. in the Eastern Amazon. *Forests, 14*(11), 2167. https://doi.org/10.3390/f14112167

Lumbres, R. I. C., Lee, Y. J., Seo, Y. O., Calora Jr, F. G. y Parao, M. R. (2013). Model fitting and validation of six height–DBH equations for *Pinus kesiya* Royle ex Gordon in Benguet Province, Philippines. *Forest Science and Technology, 9*(1), 45-50. https://doi.org/1 0.1 080/21 5801 03.201 3.772542

Meyer, H. A. (1940). A mathematical expression for height curves. *Journal of Forestry, 38*(6), 415–420. https://doi.org/10.1093/jof/38.6.415

Morgan, P. H., Mercer, L. P. y Flodin, N. W. (1975). General model for nutritional responses of higher organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 72*(11), 4327–4331. https://doi.org/10.1073/pnas.72.11.4327

Mugasha, W. A., Mauya, E. W., Njana, A. M., Karlsson, K., Malimbwi, R. R. y Ernest, S. (2019). Height-diameter allometry for tree species in Tanzania Mainland. *International Journal of Forestry Research*, *2019*, 1–17. https://doi.org/10.1155/2019/4832849

Ng'andwe, P., Chungu, D., Yambayamba, A. M. y Chilambwe, A. (2019). Modeling the height-diameter relationship of planted Pinus kesiya in Zambia. *Forest Ecology and Management, 447*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.038

Onilude, Q. A., Ige, P. O. y Alo, A. A. (2023). Evaluation of height-diameter models for community *Parkia biglobosa* Jacq plantation in Wasangare, Oyo State. *Journal of Forestry Research and Management, 20*(1), 31-39. https://jfrm.org.ng/evaluation-of-height-diameter-models-for-community-parkia-biglobosajacq-b-plantation-in-wasangare-oyo-state/

Pirard, R., Secco, L. y Warman, R. (2016). Do timber plantations contribute to forest conservation? *Environmental Science & Policy, 57*, 122–130. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.12.010

Poudel, K. P. y Cao, Q. V. (2013). Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. *Forest Science, 59*(2), 243–252. https://doi.org/10.5849/forsci.12-001

Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. (1968). *Forest Biometrics*. Pergamon Press.

Qiu, H., Liu, S., Zhang, Y. y Li, J. (2021). Variation in height-diameter allometry of ponderosa pine along competition, climate, and species diversity gradients in the western United States. *Forest Ecology and Management, 497*, 119477. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119477

Ratkowsky, D. A. (1990). *Handbook of Nonlinear Regression Models*. Marcel Dekker.

Saleh, M. S. M., Jalil, J., Zainalabidin, S., Asmadi, A. Y., Mustafa, N. H. y Kamisah, Y. (2021). Genus Parkia: Phytochemical, medicinal uses, and pharmacological properties. *International Journal of Molecular Sciences, 22*(2), 618. https://doi.org/10.3390/ijms22020618

Schreuder, H. T., Hafley, W. L., y Bannett, F. A. (1979). Yield prediction for unthinned natural slash pine stands. *Forest Science, 25*(1), 25–30. https://doi.org/10.1093/forestscience/25.1.25

Schröder, T. (2017). *Análise dos fatores influentes sobre o crescimento de ipê-roxo (Handroanthus heptaphyllus Vell. (Mattos)) – um estudo de caso* [Tesis de doctorado, Universidade Federal de Santa Maria]. Repositório Institucional da UFSM. https://repositorio.ufsm.br/handle/1/13305

Schumacher, F. X. (1939). A new growth curve and its application to timber-yield studies. *Journal of Forestry, 37*(10), 819–820.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR]. (2025). Registro nacional de plantaciones forestales por especies. *Datos Abiertos del Perú*. https://datosabiertos.gob.pe/dataset/registro-nacional-de-plantaciones-forestales-por-especies

Sharma, R. P., Vacek, Z., Vacek, S. y Kučera, M. (2019). Modelling individual tree height–diameter relationships for multi-layered and multi-species forests in Central Europe. *Trees, 33*(1), 103–119. https://doi.org/10.1007/s00468-018-1762-4

Stage, A. R. (1963). A mathematical approach to polymorphic site index curves for grand fir. *Forest Science, 9*(2), 167–180. https://doi.org/10.1093/forestscience/9.2.167

Vásquez Martínez, R. y Rojas Gonzáles, R. D. P. (2022). Catálogo de las especies forestales maderables de la Amazonía y la Yunga Peruana. *Revista Forestal del Perú,* 37(3), 5-138. https://doi.org/10.21704/rfp.v37i3.1956

Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics, 18*(3), 293–297. https://doi.org/10.1115/1.4010337

Winsor, C. P. (1932). The Gompertz curve as a growth curve. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 18*(1), 1–8. https://doi.org/10.1073/pnas.18.1.1

Wykoff, W. R., Crookston, N. L. y Stage, A. R. (1982). *User's guide to the Stand Prognosis Model*. USDA Forest Service General Technical Report INT-133. https://doi.org/10.2737/INT-GTR-133

Yang, R. C., Kozak, A. y Smith, J. H. G. (1978). The potential of Weibull type functions as flexible growth curves. *Canadian Journal of Forest Research, 8*(4), 424–431. https://doi.org/10.1139/x78-062

Zeide, B. (1989). Accuracy of equations describing diameter growth. *Canadian Journal of Forest Research, 19*(10), 1283–1286. https://doi.org/10.1139/x89-195