

RESEARCH ARTICLE

Modelación de la relación altura—diámetro en el bosque montano de Leonan, Chimborazo, Ecuador

David Vitelio Ayala Cardenas ¹  Norma Ximena Lara Vásconez. ²  Jonny Israel Guaiña Yungan ²  David Francisco Lara Vásconez ²  Amalia Isabel Escudero Villa ² 

¹ Investigador Externo Independiente

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Orellana, Ecuador



Correspondencia: francisco.lara@espoch.edu.ec



+ 593 98734528

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj93351>

Resumen: La modelación de la relación altura—diámetro (H—DAP) constituye una herramienta fundamental para la caracterización estructural y la gestión de los ecosistemas forestales. Sin embargo, en el bosque montano de Leonan, Ecuador, existe información limitada sobre el efecto de la posición competitiva de los árboles en esta relación. El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar modelos altura—diámetro y determinar la influencia de la clase de dominancia sobre su capacidad predictiva. Se analizaron inicialmente 99 árboles distribuidos en tres subparcelas, considerando como variables predictoras el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la clase de dominancia —dominante, codominante y suprimido—. Se evaluaron cuatro modelos: regresión lineal simple (M1), potencial log-log (M2), potencial log-log con clase de dominancia (M3) y un modelo mixto con subparcela como efecto aleatorio (M4). Tras excluir una observación con un error evidente de medición, el modelo final se ajustó con 98 individuos. El modelo M3 presentó el mejor desempeño, con $R^2 = 0,408$, RMSE = 1,835 m y MAPE = 18,70 %. La validación cruzada de 10 pliegues produjo un RMSE de $1,879 \pm 0,288$ m y un MAPE de $19,42 \pm 4,65$ %, evidenciando un comportamiento predictivo estable. Para un mismo DAP, los árboles dominantes presentaron alturas aproximadamente 13,6 % mayores que los codominantes, mientras que los suprimidos mostraron alturas 25,3 % menores. Se concluye que la incorporación de la clase de dominancia mejora la representación de la relación H—DAP en el bosque montano estudiado y constituye una variable relevante para estimar la altura total cuando no se dispone de identificación taxonómica a nivel de especie.

Palabras claves: modelos altura—diámetro; dominancia arbórea; modelación alométrica; validación cruzada; bosque montano

Abstract: Modeling the height—diameter (H—DBH) relationship is a fundamental tool for the structural characterization and management of forest ecosystems. However, in the Leonan montane forest, Ecuador, information on the effect of tree competitive status on this relationship remains limited.

The objective of this study was to evaluate and compare height—diameter models and determine the influence of dominance class on their predictive performance. A total of 99 trees distributed across three subplots were initially analyzed, considering



Check for updates

Cita: Ayala Cardenas, D. V., Lara Vásconez, N. X., Guaiña Yungan, J. I., Lara Vásconez, D. F., & Escudero Villa, A. I. (2026). Modelación de la relación altura—diámetro en el bosque montano de Leonan, Chimborazo, Ecuador. Green World Journal, 09(03), 351. <https://doi.org/10.53313/gwj93351>

Received: 30/septiembre /2026

Accepted: 12/octubre /2026

Published: 17/ octubre/ 2026

Prof. Carlos Mestanza—Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2026 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

diameter at breast height (DBH) and dominance class—dominant, codominant, and suppressed—as predictor variables. Four models were evaluated: simple linear regression (M1), a log–log power model (M2), a log–log power model including dominance class (M3), and a mixed-effects model with subplot as a random effect (M4). After excluding one observation with an evident measurement error, the final model was fitted using 98 individuals. Model M3 showed the best performance, with $R^2 = 0.408$, $RMSE = 1.835$ m, and $MAPE = 18.70\%$. Ten-fold cross-validation yielded an $RMSE$ of 1.879 ± 0.288 m and a $MAPE$ of $19.42 \pm 4.65\%$, indicating stable predictive performance. At the same DBH, dominant trees were approximately 13.6% taller than codominant trees, whereas suppressed trees were 25.3% shorter. It is concluded that incorporating dominance class improves the representation of the H–DBH relationship in the studied montane forest and constitutes a relevant predictor for estimating total tree height when species-level taxonomic identification is unavailable.

Keywords: height–diameter models; tree dominance; allometric modeling; cross-validation; montane forest

1. Introducción

Los ecosistemas forestales de montaña se desarrollan a lo largo de gradientes altitudinales relativamente restringidos, principalmente entre los 800 y 3500 m s. n. m. [1], y poseen una elevada importancia ecológica a escala global [2]. A pesar de representar una fracción limitada de la superficie terrestre, intervienen de manera decisiva en procesos como la regulación del agua y los ciclos biogeoquímicos, contribuyendo además al bienestar y sustento de las poblaciones humanas [3]. Su distribución comprende sistemas montañosos de América, África, Asia y Oceanía [4], donde las condiciones topográficas complejas favorecen una notable riqueza biológica y altos niveles de endemismo, aunque también los hacen particularmente susceptibles a procesos de deforestación y transformación del paisaje [5]. Su relevancia se extiende a la provisión de múltiples servicios ecosistémicos de carácter regulador, de aprovisionamiento y cultural [6]. Entre estos se incluyen la regulación hídrica [7], la captura y almacenamiento de carbono [8], las oportunidades de recreación y ecoturismo [8,9], así como procesos ecológicos asociados con la polinización, el control natural de plagas y otros beneficios relacionados con el bienestar humano [11].

La evaluación y el manejo sostenible de los ecosistemas forestales requieren información confiable sobre su estructura. Entre las variables dendrométricas fundamentales se encuentran el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total de los árboles, debido a su importancia para caracterizar las masas forestales y estimar parámetros como el volumen, la biomasa y el carbono almacenado [10]. Mientras que el DAP puede medirse de manera relativamente rápida, sencilla y precisa en campo, la determinación de la altura total suele demandar mayor tiempo y está sujeta a mayores dificultades y errores de medición [11,12]. Estas limitaciones pueden acentuarse en formaciones forestales complejas, donde la identificación de la parte superior de la copa y las condiciones propias del terreno dificultan las mediciones convencionales. En este contexto, la modelación de la relación altura–diámetro (H–DAP) constituye una alternativa ampliamente utilizada para estimar la altura total de los árboles a partir del DAP y, cuando corresponde, de otras variables del árbol o del rodal [13,14].

La relación altura–diámetro (H–DAP) no es constante entre bosques ni entre individuos de una misma masa forestal, ya que puede estar condicionada por factores ambientales y estructurales, entre ellos la competencia, la posición sociológica de los árboles, la densidad y estructura del rodal, la calidad del sitio y las condiciones asociadas con los gradientes altitudinales y topográficos [15–17]. En ecosistemas montañosos, caracterizados por una elevada heterogeneidad ambiental y estructural, estas variaciones pueden limitar la capacidad predictiva de los modelos que utilizan

únicamente el DAP como variable explicativa. En este contexto, la incorporación de variables relacionadas con la posición competitiva de los individuos puede mejorar la representación de la relación H–DAP, debido a que árboles sometidos a diferentes niveles de competencia presentan patrones diferenciados de crecimiento en altura para un mismo intervalo diamétrico [18]. Asimismo, la comparación de diferentes formulaciones matemáticas mediante estadísticos de ajuste, conjuntamente con procedimientos de validación o validación cruzada, constituye un paso fundamental para evaluar la capacidad predictiva de los modelos y seleccionar aquellos que presentan mayor precisión y posibilidades de generalización [18,19].

En el bosque montano Leonan, ubicado en el cantón Chambo, provincia de Chimborazo, Ecuador, las investigaciones desarrolladas previamente se han orientado principalmente al análisis de la composición y estructura florística, la evaluación de servicios ecosistémicos, biomasa y carbono, así como al monitoreo de la cobertura forestal mediante técnicas de teledetección [20–23]. Sin embargo, dentro de la literatura local revisada, aún es limitada la información relacionada específicamente con la modelación de la relación altura–diámetro (H–DAP) y con el efecto de la posición competitiva o clase de dominancia de los árboles sobre dicha relación. El desarrollo de modelos ajustados a las características estructurales de ecosistemas forestales específicos puede mejorar la estimación de la altura y contribuir a una caracterización dendrométrica más precisa de rodales heterogéneos [10,13]. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar y comparar modelos de relación altura–diámetro para árboles de un bosque montano, determinar el efecto de la clase de dominancia sobre la capacidad predictiva de los modelos y evaluar su desempeño mediante criterios de bondad de ajuste y validación cruzada.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en el bosque montano de Leonan, localizado en la región andina de Ecuador, en el cantón Chambo, provincia de Chimborazo, Sudamérica (Figura 1), a una altitud aproximada de 3200 m s. n. m. El área forma parte de un paisaje montano caracterizado por la presencia de remanentes de bosque andino, áreas agropecuarias y un relieve irregular propio de los ecosistemas de montaña. El bosque presenta una estructura heterogénea asociada a las condiciones topográficas y ambientales del sector. De acuerdo con el mapa interactivo [24], el área de estudio pertenece al ecosistema Bosque siempreverde montano alto del norte de la Cordillera Oriental de los Andes. El centroide del polígono se localiza en las coordenadas UTM X:

772 682 m; Y: 9 809 504 m, en el sistema de referencia WGS 84 / UTM zona 17S.

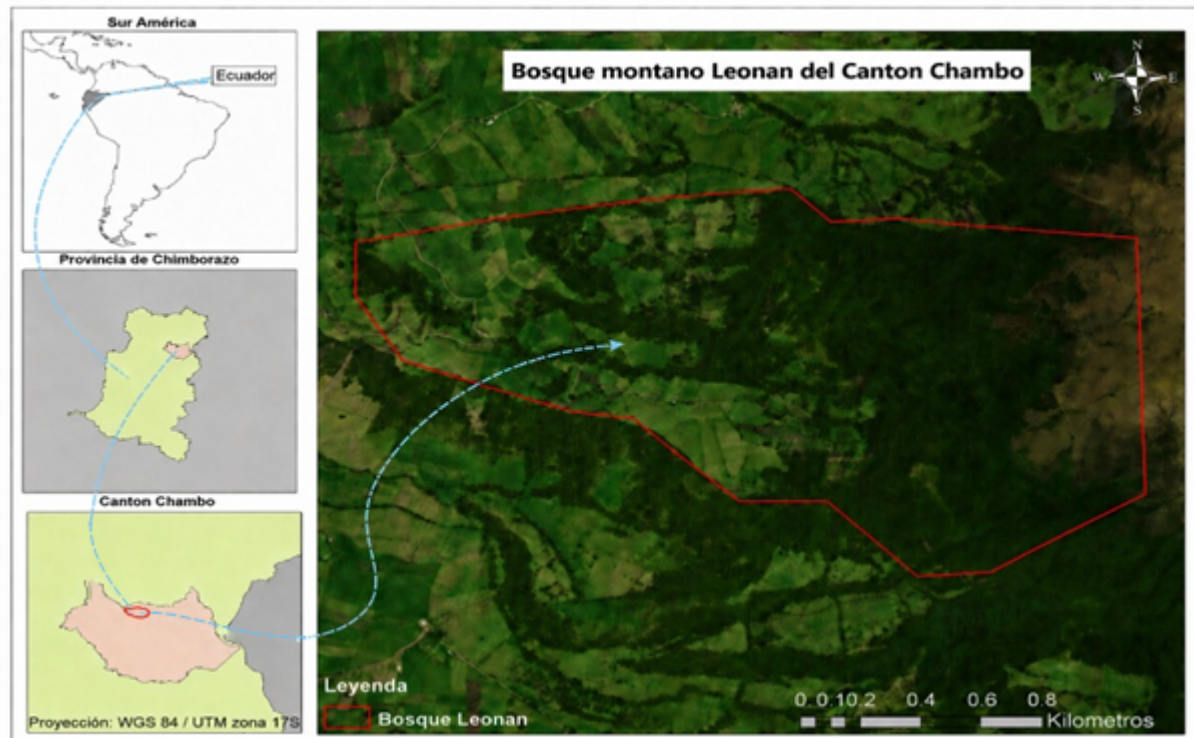


Figura 1. Localización del bosque montano Leonan a escala continental, provincial y cantonal.

2.2 Métodos

2.2.1 Diseño de muestreo

Se establecieron tres parcelas rectangulares de 60 × 20 m (0.12 ha cada una), en las que se registraron 99 árboles con DAP $\geq$ 5 cm. No se aplicaron tratamientos, por lo que el estudio es no experimental y de tipo correlacional.

Tabla 1: Distribución de árboles por subparcela y clase de dominancia

Subparcela	Dominante (D)	Codominante (CD)	Suprimido (S)	Total
SP1	15	13	12	40
SP2	23	14	10	47
SP3	9	2	1	12
Total	47	29	23	99

2.2.2 Variables analizadas

DAP (cm): medido a 1.30 m sobre el suelo, Altura total y altura comercial (m): obtenidas con hipsómetro, Dominancia: clasificada en tres categorías: dominantes (D), codominantes (CD) y suprimidos (S).

2.2.3 Análisis estadístico

Se aplicaron modelos de **regresión lineal y no lineal** (cuadrático, cúbico, logarítmico, exponencial y potencial) para explorar la relación DAP–altura. Se evaluaron los modelos mediante R_a^2 , error

estándar, AIC, RMSE, MAPE y distancia de Cook verificando los supuestos de normalidad (Shapiro–Wilk) y homocedasticidad (Breusch–Pagan).

El análisis se complementó con coeficientes de correlación de Pearson y comparaciones entre categorías de dominancia. Los gráficos y tablas se elaboraron en RStudio y Excel.

2.2.4 Estadísticas descriptivas

Tabla 2: Estadística descriptiva del DAP y altura total por clase de dominancia.

Dominancia	n	DAP med.	DAP DE	DAP mín–máx	H med. (m)	H DE	H mín–máx
Dominante (D)	47	15.8	5.82	5–37	9.75	1.96	6–15
Codominante (CD)	29	12.8	3.49	6–21	8.40	2.02	5–12
Suprimido (S)	23	11.9	3.76	5–18.8	6.22	1.59	4–9

2.2.5 Modelos ajustados y criterios de selección

M1 lineal simple: $H = a + b \cdot DAP + \varepsilon$

M2 potencial log-log: $\log(H) = a + b \cdot \log(DAP) + \varepsilon \Rightarrow H = a \cdot DAP^b$

M3 potencial + dominancia: $\log(H) = a + b \cdot \log(DAP) + c_D \cdot D + c_S \cdot S + \varepsilon$

M4 Modelo mixto: $\log(H) = a + b \cdot \log(DAP) + c_D \cdot D + c_S \cdot S + u_k + \varepsilon$ donde $u_k \sim N(0, \sigma_u^2)$ es el efecto aleatorio de subparcela.

La selección se basó en AIC, R^2 , $RMSE = \sqrt{\frac{\sum (H_{obs} - H_{pred})^2}{n}}$, sesgo medio y MAPE. Los supuestos del modelo seleccionado se verificaron mediante gráficos diagnóstico y distancia de Cook (umbral $4/n$) y finalmente la capacidad predictiva se evalúa mediante validación cruzada con 10 pliegues.

3. Resultados

Esta sección puede dividirse por subtítulos. Debe proporcionar una descripción concisa y precisa de los resultados experimentales, por lo general responderá a su hipótesis, objetivo o problema.

3.1. Estructura del bosque

Se registraron 99 árboles en total, con un DAP promedio de 14.1 cm (rango: 5–37 cm) y una altura total media de 8.53 m. El coeficiente de variación (36.6%) refleja una marcada heterogeneidad estructural, con predominancia de árboles jóvenes (62% con DAP < 15 cm), típica de bosques en regeneración natural.

3.2. Exploración visual de la relación Altura – DAP

La Figura 1 muestra la relación existente DAP vs. Altura total en una escala natural y logarítmica, la cual se encuentra coloreada por clase de dominancia. En ambas presentaciones se lo apreciar una separación vertical consistente entre las tres clases: los árboles dominantes (verde) tienden a alturas superiores y los suprimidos (azul) a alturas menores para igual DAP. Usando escala log-log las rectas de regresión son paralelas entre clases, lo que justifica el uso de un modelo potencial con dominancia como covariante de modelo de desplazamiento vertical. La Figura 2 muestra la relación por subparcela: SP1 y SP2 presentan estructuras similares mientras que SP3 tiene menor densidad muestral.

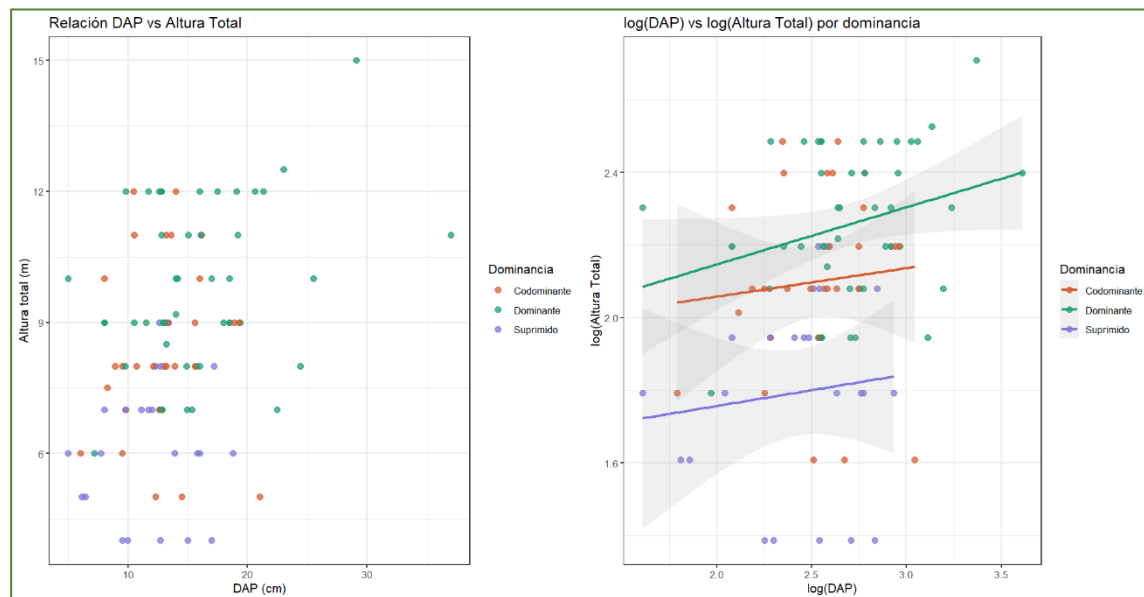


Figura 1: Relación DAP vs. altura total coloreada por clase de dominancia y relación en escala log-log con rectas de regresión por clase e intervalo de confianza al 95%.

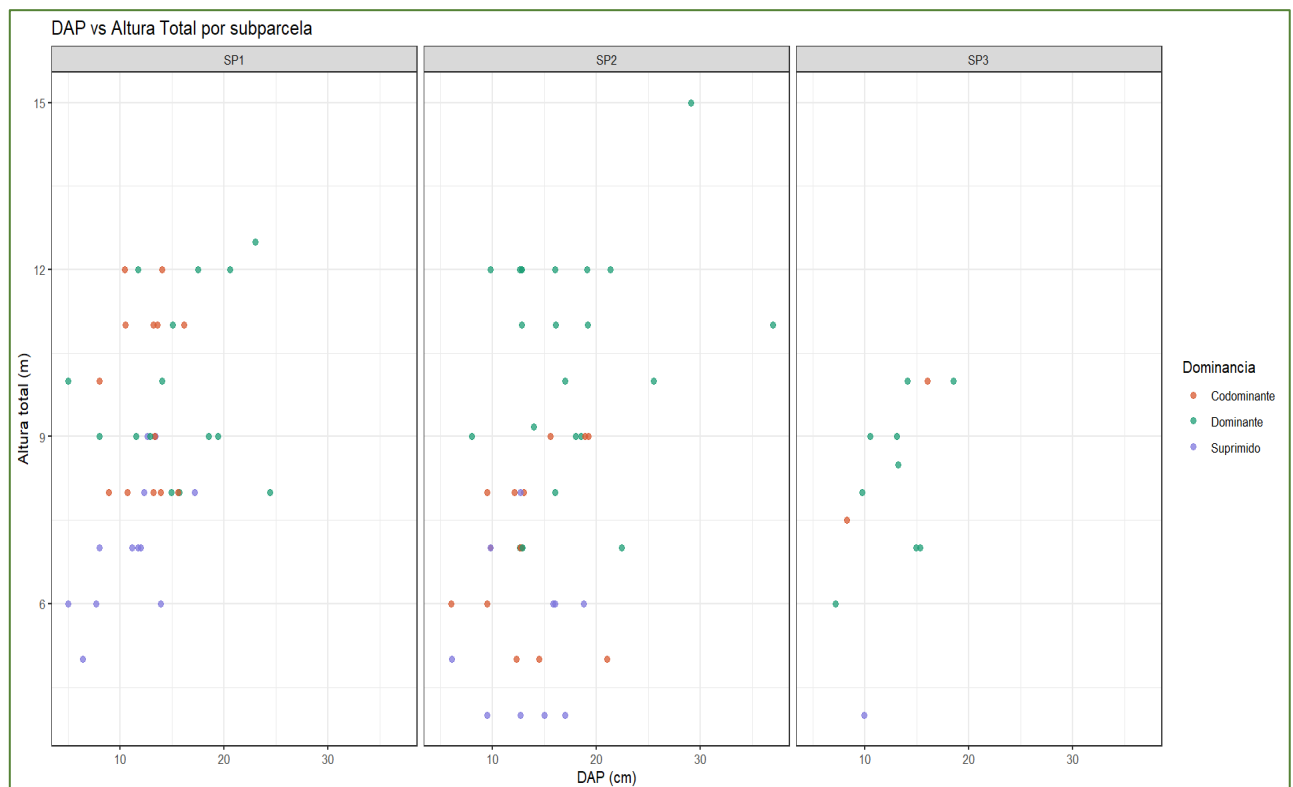


Figura 2: DAP vs. altura total por subparcela

3.3. Correlaciones DAP-altura por clase de dominancia

Las correlaciones de Pearson entre DAP y altura total fueron bajas en las tres clases: $r = 0.317$ (D), $r = 0.059$ (CD) y $r = 0.110$ (S). Los modelos log-log por otra parte ajustados de forma independiente por clase presentaron $R^2 \leq 0.080$ con p -valores no significativos ($p \geq 0.054$) así confirmando que la variabilidad residual persiste dentro de cada clase y esto justificando la inclusión de la dominancia como covariable en el modelo integrado.

Tabla 3: Correlación de Pearson entre DAP y altura por clase de dominancia y R^2 del modelo log-log ajustado de forma independiente por clase.

Dominancia	n	r (H total)	r (H comercial)	R^2 ind.	p-valor
Dominante (D)	47	0.317	0.243	0.080	0.054
Codominante (CD)	29	0.059	0.245	0.008	0.649
Suprimido (S)	23	0.110	0.035	0.013	0.603

3.4. Comparación de modelos

La Tabla 4 muestra los AIC de los cuatro modelos. El modelo lineal simple (M1) presento el peor ajuste ($AIC = 441.44$, $R^2 = 0.126$) por otro lado la transformación logarítmica usada en mi M2 redujo considerablemente el AIC (M2: $AIC = 33.73$, $R^2 = 0.105$). La inclusión de dominancia alcanzo el AIC mínimo entre los modelos de efectos fijos (M3: $AIC = -2.87$; $\Delta AIC = 36.60$ vs. M2; $R^2 = 0.406$), con un incremento absoluto de r cuadrado de 30.1 puntos porcentuales. Finalmente, el modelo mixto M4 ($AIC = 3.51$) fue superado por M3, indicando que la variación entre subparcelas ($\sigma_u = 0.122$) no justifica la complejidad adicional del modelo.

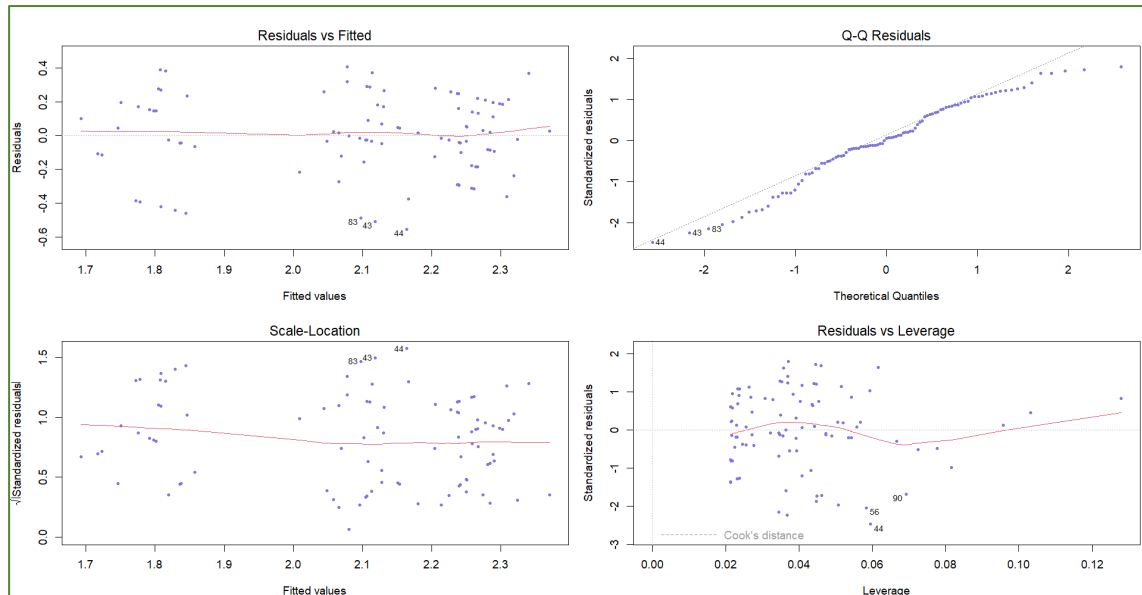
Tabla 4: Comparación de modelos y el modelo M3 presenta el menor AIC.

Modelo	Parámetros	AIC	ΔAIC	R^2	RMSE (m)	MAPE (%)
M1 – Lineal simple	3	441.44	444.31	0.126	—	—
M2 – Log-log	3	33.73	36.60	0.105	—	—
M3 – Log-log + dominancia	5	-2.87	0.00	0.406	1.835	18.72
M4 – Mixto (SP aleatorio)	6	3.51	6.38	—	—	—

3.5. Diagnósticos del modelo M3 (N=99)

Los gráficos diagnósticos del modelo M3 sobre los 99 árboles (Figura 3) mostraron residuos aproximadamente centrados en cero sin un patrón sistemático, dispone de una normalidad razonable de los residuos como se puede observar en al Q-Q plot y homocedasticidad aceptable. Sin embargo, el grafico de Residual vs. Leverage revelo que las observaciones 44, 56 y 90 presentan residuos estandarizados extremos ($|z| > 2.4$) lo cual incentiva a realizar un análisis de influencia.

Figura 3: Gráficos diagnóstico del modelo M3 aplicado a toda la base de datos.



3.6. Análisis de observaciones influyentes

El análisis de la distancia de Cook (umbral = $4/n = 0.040$) identificó ocho observaciones superiores al umbral (Figura 4). Revisando datos sin procesar permitió hacer una clasificación en dos grupos:

- 3.6.1. Error de medición evidente (dato excluido):** observación 6 (DAP = 5cm, H = 10 m, clase D, SP1). El cociente $H/DAP = 2$ es biológicamente inviable en un bosque montano para un árbol de DAP = 5 cm, el modelo predice H = 8 m para esta observación, con un residuo +1.65 m. Por lo cual este dato fue excluido del modelo final.
- 3.6.2. Árboles atípicos con sustento biológico:** observaciones 43, 44 (codominantes SP2, H = 5 m con DAP = 14.5 – 21 cm), obs. 45 (dominante SP2, H = 15 m con DAP = 29.1 cm), obs. 54, 56, 62 (suprimido SP2, H = 4 m) y obs. 90 (dominantes SP3, H = 6 m). Estos datos presentan variabilidad estructural real del bosque y fueron retenidos con justificación en la discusión.

3.7. Diagnóstico del modelo final (n=98)

Tras excluir la observación 6, el modelo M3 ajustado sobre $n = 98$ presento los siguientes coeficientes detallados en la Tabla 5. El intercepto y el efecto de suprimido fueron altamente significativos ($p < 0.001$), el efecto dominante fue significativo ($p = 0.028$) y el efecto $\log(DAP)$ fue marginalmente significativo ($p = 0.053$). El modelo en conjunto fue altamente significativo ($F = 21.59; p < 0.001$) con $R^2 = 0.408$ y $R_a^2 = 0.389$.

Tabla 5: Coeficientes del modelo final.

Parámetro	Estimado	Error estándar	t	p-valor	Sig.
Intercepto (a)	1.7350	0.1900	9.131	< 0,001	***
$\log(DAP)$ (b)	0.1445	0.0736	1.964	0.053	.
Dominante (cd)	0.1277	0.0570	2.238	0.028	*
Suprimido (cs)	-0,2913	0.0651	-4,476	< 0,001	***

Las ecuaciones obtenidas mediante la transformación exponencial de los coeficientes son:

Dominante (D): $H = 6.4408 \times DAP^{0.1445}$

Codominante (CD): $H = 5.6688 \times DAP^{0.144}$

Suprimido (S): $H = 4.2362 \times DAP^{0.144}$

Los árboles suprimidos tienen alturas un 25.3% menores que los codominantes [$\exp(-0.291) = 0.747$] y los dominantes un 13.6% mayores [$\exp(0.128) = 1.136$], para cualquier valor de DAP dentro del rango muestral.

Tabla 6: Comparación de métricas del modelo M3 antes y después de la depuración.

Métrica	M3 completo (n = 99)	M3 depurado (n = 98)
R ²	0.406	0.408
R ² ajustado	0.388	0.389
RMSE (m)	1.835	1.835
Sesgo (m)	0.203	0.204
MAPE (%)	18.72	18.70
F (p-valor)	21,67 (< 0,001)	21,59 (< 0,001)

3.8. Diagnóstico del modelo final (n=98)

Los gráficos diagnósticos del modelo final (Figura 5) confirman el cumplimiento de los supuestos de regresión. El gráfico de Residuos vs. Valores ajustados muestra una línea prácticamente horizontal con puntos dispersos aleatoriamente. El Q-Q plot presenta que los puntos siguen razonablemente la diagonal indicando normalidad también podemos observar que disponemos de homocedasticidad y finalmente concluir que ninguna observación supera la distancia de Cook de 0.5 así confirmando la robustez del modelo.

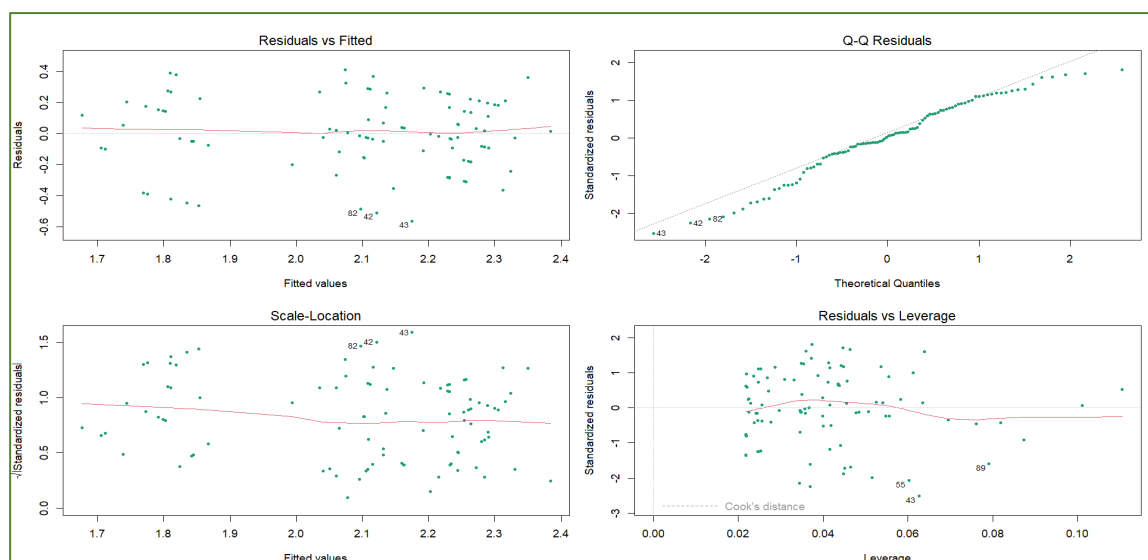


Figura 4: Gráficos diagnóstico del modelo. Los cuatro supuestos de regresión se cumplen satisfactoriamente.

3.9. Bondad de ajuste y validación cruzada

La Figura 6 muestra altura observada vs. Predicha del modelo final en la cual los puntos se distribuyen en torno a la diagonal con mayor dispersión en los dominantes (verde), siendo este

un indicativo de la heterogeneidad florística propia del ecosistema. La Figura 7 presenta las curvas del modelo con intervalos de confianza al 95% cuya separación consiste a la largo del rango completo de DAP (5–37 cm) confirmando así el efecto diferencial y estadísticamente robusto de la clase dominancia.

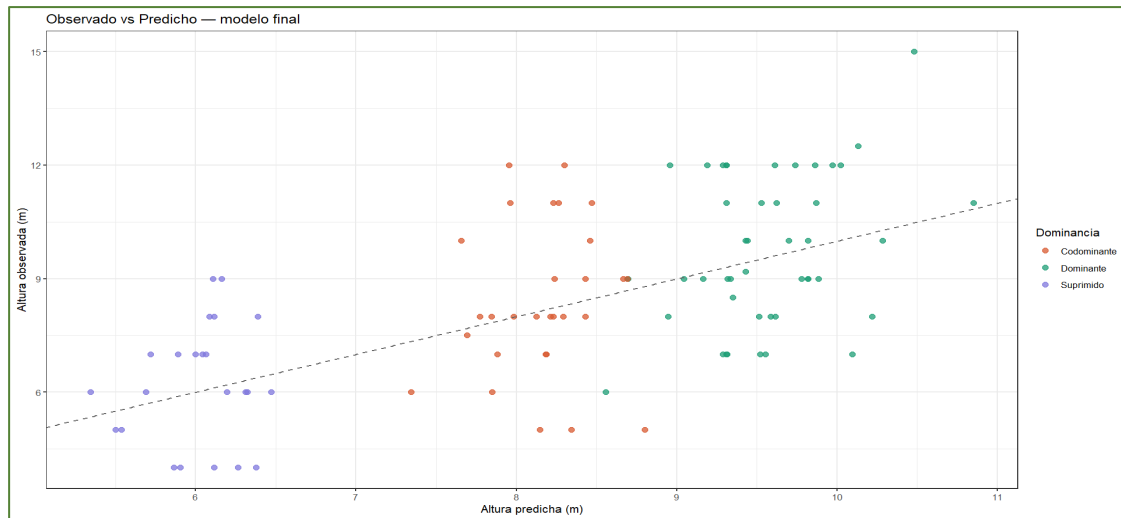


Figura 5: Altura observada vs. predicha – modelo final ($n = 98$).

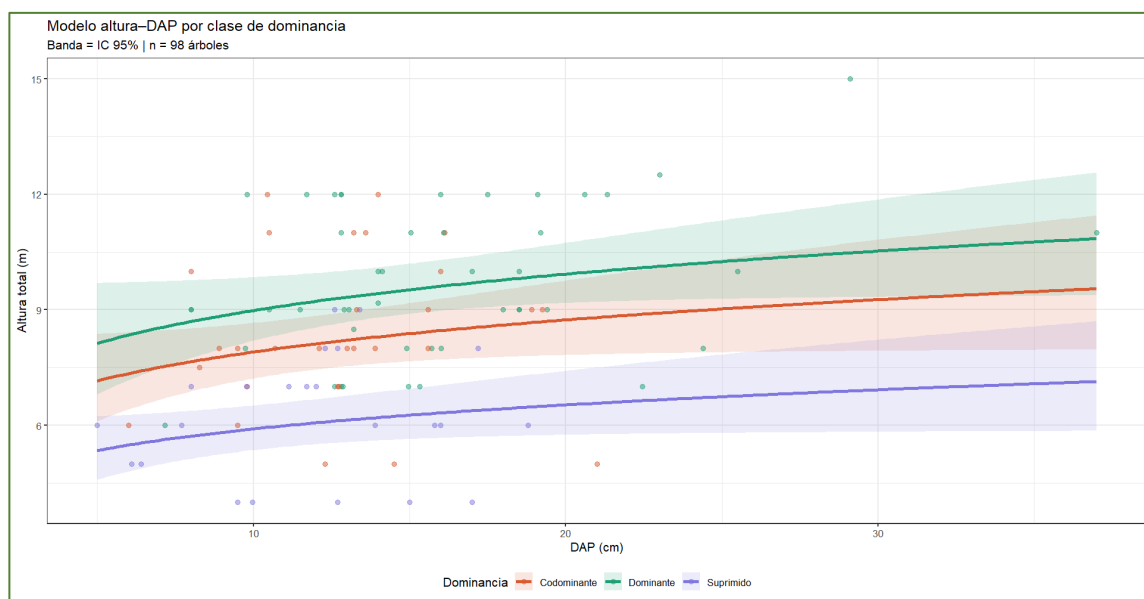


Figura 6: Curvas del modelo altura –DAP por clase de dominancia con intervalos de confianza del 95%.

La Tabla 7 resume las métricas finales incluyendo la validación cruzada en lo cual se concluye que el cociente $RMSE_{cv}/RMSE_{fit} = 1.024$ indica que el modelo apenas pierde un 2.4 % de precisión al predecir datos no observados lo que generaliza prácticamente con la misma precisión con la que fue ajustado esto descartando el sobreajuste.

Tabla 7: Métricas de bondad de ajuste del modelo final y resultados de la validación cruzada descartando sobreajuste.

Métrica	Modelo ajustado (n = 98)	Validación cruzada 10-fold
R^2	0.408	—
R^2 ajustado	0.389	—
RMSE (m)	1.835	1,879 $\pm$ 0,288
Sesgo (m)	0.204	0,202 $\pm$ 0,490
MAPE (%)	18.70	19,42 $\pm$ 4,65
F (p-valor)	21,59 (< 0,001)	—

4. Discusión

Los resultados muestran que el DAP por sí solo presentó una capacidad limitada para explicar la variación de la altura total de los árboles. Las correlaciones DAP–altura fueron bajas dentro de las clases de dominancia, mientras que el modelo lineal simple alcanzó un R^2 de 0,126. En contraste, la incorporación de la clase de dominancia en el modelo potencial log–log incrementó el R^2 hasta 0,406 y produjo el menor AIC (–2,87), evidenciando que la posición competitiva de los individuos aporta información relevante para representar la relación altura–diámetro en este bosque montano. Este resultado coincide con lo reportado por Zhang et al. (2020) [18], quienes señalan que la relación H–DAP no depende únicamente del diámetro, sino que también puede estar influida por la competencia entre individuos y su posición sociológica dentro del rodal.

Los resultados muestran que el DAP por sí solo presentó una capacidad limitada para explicar la variación de la altura total de los árboles. Las correlaciones DAP–altura fueron bajas dentro de las clases de dominancia, mientras que el modelo lineal simple alcanzó un R^2 de 0,126. En contraste, la incorporación de la clase de dominancia en el modelo potencial log–log incrementó el R^2 hasta 0,406 y produjo el menor AIC (–2,87), evidenciando que la posición competitiva de los individuos aporta información relevante para representar la relación altura–diámetro en este bosque montano. Este comportamiento es coherente con Zhang et al. (2020) [18], quienes señalan que la relación H–DAP puede estar condicionada por la competencia y la posición sociológica de los árboles.

Las diferencias encontradas entre clases de dominancia respaldan esta interpretación. Para un mismo DAP, los árboles dominantes presentaron alturas aproximadamente 13,6 % mayores que los codominantes, mientras que los suprimidos fueron 25,3 % menores. Estas diferencias reflejan la estratificación vertical del bosque y sugieren que individuos con diámetros similares pueden presentar patrones distintos de crecimiento en altura debido a su posición dentro del dosel y a las condiciones de competencia por luz. En este sentido, los resultados obtenidos son consistentes con [18] Zhang et al. (2020), al evidenciar que la posición competitiva de los árboles constituye un factor importante para explicar las variaciones de altura entre individuos de diámetro semejante.

El modelo final presentó un $R^2=0,408$, RMSE de 1,835 m y MAPE de 18,70 %. La validación cruzada de 10 pliegues produjo valores similares, con RMSE de 1,879 $\pm$ 0,288 m y MAPE de 19,42 $\pm$ 4,65 %, lo que indica una estabilidad predictiva interna aceptable y ausencia de una

pérdida importante de precisión durante la validación. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Yang & Huang (2014) [19] y (Zhang et al. (2020) [18], quienes destacan que la validación cruzada constituye un procedimiento útil para evaluar la capacidad predictiva y la generalización de los modelos, al contrastar su desempeño con subconjuntos de datos distintos de aquellos empleados directamente en su calibración.

Finalmente, aunque la incorporación de la dominancia mejoró considerablemente la capacidad explicativa del modelo, una proporción importante de la variabilidad de la altura permanece sin explicar. Esto sugiere que la relación H–DAP en el bosque montano de Leonan podría estar influenciada por otros factores no considerados en el presente estudio, como la identidad de las especies, la competencia individual, la estructura del rodal, las condiciones topográficas y las características ambientales del sitio. Esta interpretación es consistente con Feldpausch et al. (2011) [25] Kessler et al. (2014) [16] y y Ogana et al. (2023) [17] cuyos estudios evidencian que la relación entre la altura y el diámetro de los árboles puede variar en respuesta a factores biológicos, estructurales y ambientales, por lo que el DAP no necesariamente explica por sí solo toda la variación observada en la altura. En este contexto, la variabilidad no explicada por el modelo podría reflejar precisamente la influencia de estos factores. Por ello, futuras investigaciones deberían incrementar el número de parcelas e incorporar variables biológicas y ambientales que permitan mejorar la capacidad explicativa, precisión y aplicabilidad de los modelos H–DAP en el bosque montano de Leonan.

5. Conclusión

El modelo potencial log–log que incorporó la clase de dominancia presentó el mejor desempeño entre los modelos evaluados para representar la relación altura–DAP en el bosque montano estudiado, alcanzando un R^2 de 0,408 y mostrando un comportamiento estable durante la validación cruzada.

La clase de dominancia constituyó un predictor significativo de la altura total. Para un mismo DAP, los árboles suprimidos presentaron alturas aproximadamente 25,3 % menores, mientras que los dominantes alcanzaron alturas 13,6 % mayores que los codominantes, evidenciando la influencia de la posición sociológica y de la competencia por luz sobre la relación altura–diámetro.

Los supuestos estadísticos evaluados para el modelo final, correspondientes a normalidad de los residuos, homocedasticidad y ausencia de observaciones con influencia desproporcionada, se cumplieron satisfactoriamente para los 98 individuos incluidos en el análisis, respaldando la validez estadística del modelo ajustado.

De los 99 registros originales, se identificó y excluyó una única observación debido a un error evidente de medición y a su inconsistencia biológica. En consecuencia, 98 registros, equivalentes aproximadamente al 99 % de los datos originales, fueron considerados válidos para el análisis final.

Contribución de autores: Conceptualización, D.V.A.C., J.I.G.Y., N.X.L.V. y D.F.L.V.; metodología, D.V.A.C., N.X.L.V. y D.F.L.V.; software, D.F.L.V.; validación, D.F.L.V. y N.X.L.V.; análisis formal, D.F.L.V.; investigación, D.V.A.C., J.I.G.Y., N.X.L.V. y A.I.E.V.; recursos, J.I.G.Y. y N.X.L.V.; curaduría de datos,

D.V.A.C., D.F.L.V. y A.I.E.V.; redacción—borrador original, D.V.A.C. y D.F.L.V.; redacción—revisión y edición, J.I.G.Y., N.X.L.V., D.F.L.V. y A.I.E.V.; visualización, D.F.L.V.; supervisión, J.I.G.Y. y N.X.L.V.; administración del proyecto, J.I.G.Y.

Financiamiento: Decanto de Investigaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Tobón, C. Ecohydrology of Tropical Andean Cloud Forests. In *The Andean Cloud Forest*; Myster, R.W., Ed.; Springer International Publishing: Cham, 2021; pp. 61–87 ISBN 978–3–030–57344–7.
2. Velázquez-Rosas, N.; Fuentes Romero, E.; Ruiz-Guerra, B.; HomeThe College of VeracruzHugo López Rosas; López Rosas, H. (PDF) Plant Functional Traits Related to Aboveground Tree Biomass in Cloud Forests of Southeastern Mexico. *ResearchGate* **2025**, doi:10.1016/j.tfp.2024.100767.
3. Gay, J.D.; Currey, B.; Brookshire, E.N.J. Global Distribution and Climate Sensitivity of the Tropical Montane Forest Nitrogen Cycle. *Nature Communications* **2022**, *13*, 7364, doi:10.1038/s41467-022-35170-z.
4. Salinas, N.; Cosio, E.G.; Silman, M.; Meir, P.; Nottingham, A.T.; Roman-Cuesta, R.M.; Malhi, Y. Editorial: Tropical Montane Forests in a Changing Environment. *Frontiers in Plant Science* **2021**, *12*, 712748, doi:10.3389/fpls.2021.712748.
5. Wilson, S.J.; Rhemtulla, J.M. Small Montane Cloud Forest Fragments Are Important for Conserving Tree Diversity in the Ecuadorian Andes. *Biotropica* **2018**, *50*, 586–597, doi:10.1111/btp.12542.
6. Ciesielski, M.; Gołos, P.; Wysocka-Fijorek, E.; Kaliszewski, A. Relationships between Forest Ecosystem Services – Current State of Knowledge. *Folia Forestalia Polonica* **2024**, *66*, 228–248, doi:10.2478/ffp-2024-0017.
7. Mameno, K.; Tsuge, T.; Kubo, T.; Kuriyama, K.; Shoji, Y. High Monetary Valuation of Regulating Forest Ecosystem Services in Japan: Integrating the Best–Worst Scaling and Contingent Valuation Methods. *Ecosystems and People* **2024**, *20*, 2400544, doi:10.1080/26395916.2024.2400544.
8. Pandey, G.; Cudlínová, E.; Khadka, C.; Poudel, A.; Sharma, S. Interconexión Entre La Economía Verde, El Ecoturismo, La Protección Del Paisaje y El Desarrollo Económico Local: Un Estudio de Caso Del Parque de La Paz de Rapti, Nepal. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal* **2024**, *28*, 1–14, doi:10.19080/ARTOAJ.2024.28.556404.
9. Quevedo, O.W.P. Aprovechamiento Sostenible de Los Servicios Ecosistémicos Recreativos: Ecoturismo. *Revista Comunicaciones Científicas y Tecnológicas* **2019**, 48–53.
10. Sharma, R.P.; Vacek, Z.; Vacek, S. Nonlinear Mixed Effect Height–Diameter Model for Mixed Species Forests in the Central Part of the Czech Republic. *Journal of Forest Science* **2016**, *62*, 470–484, doi:10.17221/41/2016-JFS.
11. MacPhee, C.; Kershaw, J.A.; Weiskittel, A.R.; Golding, J.; Lavigne, M.B. Comparison of Approaches for Estimating Individual Tree Height–Diameter Relationships in the Acadian Forest Region. *Forestry (Lond)* **2018**, *91*, 132–146, doi:10.1093/forestry/cpx039.
12. Wang, Y.; Lehtomäki, M.; Liang, X.; Pyörälä, J.; Kukko, A.; Jaakkola, A.; Liu, J.; Feng, Z.; Chen, R.; Hyyppä, J. Is Field-Measured Tree Height as Reliable as Believed – A Comparison Study of Tree Height Estimates from Field Measurement, Airborne Laser Scanning and Terrestrial

- Laser Scanning in a Boreal Forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2019**, *147*, 132–145, doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.11.008.
13. Lam, T.Y.; Kershaw, J.A., Jr.; Hajar, Z.S.N.; Rahman, K.A.; Weiskittel, A.R.; Potts, M.D. Evaluating and Modelling Genus and Species Variation in Height-to-Diameter Relationships for Tropical Hill Forests in Peninsular Malaysia. *Forestry (Lond)* **2017**, *90*, 268–278, doi:10.1093/forestry/cpw051.
 14. Vargas-Larreta, B.; Castedo-Dorado, F.; Álvarez-González, J.G.; Barrio-Anta, M.; Cruz-Cobos, F. A Generalized Height-Diameter Model with Random Coefficients for Uneven-Aged Stands in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry (Lond)* **2009**, *82*, 445–462, doi:10.1093/forestry/cpp016.
 15. 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.; et al. Height-Diameter Allometry of Tropical Forest Trees. *Biogeosciences* **2011**, *8*, 1081–1106, doi:10.5194/bg-8-1081-2011.
 16. Kessler, M.; Toivonen, J.M.; Sylvester, S.P.; Kluge, J.; Hertel, D. Elevational Patterns of Polylepsis Tree Height (Rosaceae) in the High Andes of Peru: Role of Human Impact and Climatic Conditions. *Front. Plant Sci.* **2014**, *5*, doi:10.3389/fpls.2014.00194.
 17. Ogana, F.N.; Holmström, E.; Sharma, R.P.; Langvall, O.; Nilsson, U. Optimizing Height Measurement for the Long-Term Forest Experiments in Sweden. *Forest Ecology and Management* **2023**, *532*, 120843, doi:10.1016/j.foreco.2023.120843.
 18. Zhang, B.; Sajjad, S.; Chen, K.; Zhou, L.; Zhang, Y.; Yong, K.K.; Sun, Y. Predicting Tree Height-Diameter Relationship from Relative Competition Levels Using Quantile Regression Models for Chinese Fir (*Cunninghamia Lanceolata*) in Fujian Province, China. *Forests* **2020**, *11*, 183, doi:10.3390/f11020183.
 19. Yang, Y.; Huang, S. Suitability of Five Cross Validation Methods for Performance Evaluation of Nonlinear Mixed-Effects Forest Models – a Case Study. *Forestry (Lond)* **2014**, *87*, 654–662, doi:10.1093/forestry/cpu025.
 20. Caranqui, J. Composición y Estructura de Un Bosque Montano En Lluclud, Chimborazo. **2009**.
 21. Catagña, F.C.; Vega, C.B.; Dávalos, A.B.; Vascones, N.L.; D, D.C. Evaluación de Servicios Ambientales de un Bosque de ceja Andina para la Gestión del Recurso Forestal en Zonas alto Andinas. *Revista Amazónica. Ciencia y Tecnología* **2019**, *8*, 149–156, doi:10.59410/RACYT-v08n02ep06-0115.
 22. Chiluiza, D.M.V.; Vásconez, N.X.L.; Mejía, E.R.N.; Vásconez, D.F.L.; Sevilla, H.E.C. Monitoreo de la calidad del Bosque Leonan a través del uso de técnicas de teledetección/Monitoring the quality of the Leonan Forest using remote sensing techniques. *Márgenes* **2026**, *14*, e2348–e2348.
 23. Vásconez, D.F.L.; Mejía, E.R.N.; Román, J.F.C.; Sevilla, H.E.C.; Vásconez, N.X.L. Dinámica estacional interanual del socioecosistema del bosque montano Leonan de Lluclud, mediante índices espectrales/Dynamics of the socio-ecosystem of the Leonan de Lluclud montane forest using spectral indices. *Márgenes* **2025**, *13*, e2279–e2279.
 24. MAE Mapa Interactivo Ide.Ambiente.Gob.Ec/Mapainteractivo/ Available online: <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/> (accessed on 17 August 2026).
 25. 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.; et al. Height-Diameter Allometry of Tropical Forest Trees. *Biogeosciences* **2011**, *8*, 1081–1106, doi:10.5194/bg-8-1081-2011.



© 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>