

Tipificación de *Alnus acuminata* (Kunth) en un ecosistema de montaña de la región alto andina colombiana

Typing of *Alnus acuminata* (Kunth) in a mountain ecosystem in the high Andean region of Colombia

Bayron Giovanni Obando-Enriquez^{1*}, Pedro Pablo Bacca-Acosta², Jose Libardo Lerma-Lasso³, Sandra Liliana Castañeda-Garzón⁴, David Eduardo Álvarez-Sánchez⁵ y Jhon Jairo Zuluaga-Peláez⁶

Resumen

A nivel global, los ecosistemas de montaña enfrentan desafíos socioambientales debido a acciones humanas inadecuadas en la producción agropecuaria, que han generado impactos negativos en estos frágiles entornos. En los Andes colombianos, en el paisaje agropecuario está *Alnus acuminata* Kunth, especie nativa de alta importancia social y ecológica. Para tipificarla, en la colección forestal del Centro de Investigación Obonuco, se realizó la caracterización dasométrica, evaluando variables de: altura total (HT), diámetro a la altura del pecho (DAP), área basal (AB) y volumen (V). Caracterización morfológica, empleando 22 descriptores de planta. Evaluación de ocho modelos alométricos para estimar HT a partir del DAP. La plantación de *A. acuminata* de 98 meses presentó 76 % de sobrevivencia y valores promedio en HT de $9,06 \pm 1,4$ m, DAP de $11,47 \pm 2,84$ cm, AB media de $0,019 \pm 0,005$ m² y V de $0,06 \pm 0,03$ m³. A los 56 meses, los árboles presentaron forma predominantemente elipsoide, crecimiento y ramificación erecta, fuste cilíndrico y recto, copa piramidal y circular irregular en los perfiles vertical y horizontal. El modelo alométrico que cumplió los criterios de selección fue Canham-MM, $TH = (82,73 \times DBH) \div (106,27 + DBH)$ que tiene un R^2 Ajustado superior al 85 %. El modelamiento matemático basado en DAP es una herramienta esencial para estimar con precisión la HT en ecosistemas de montaña, especialmente en escenarios costosos o impracticables. Los descriptores morfológicos brindaron información sobre crecimiento y adaptación de árboles al entorno. Su estandarización es fundamental para la comparación global y el mejoramiento genético de la especie.

Palabras clave: alometría; modelos de crecimiento forestal; morfología vegetal; región Andina; silvicultura.

Abstract

At a global level, mountains ecosystems face socio-environmental challenges due to inadequate human actions in agricultural production, which have generated negative impacts on these fragile environments. In Colombian Andes, in the agricultural landscape is *Alnus acuminata* Kunth, a native species of high ecological and social importance. To classify it, in a forest collection of the Obonuco Research Center, a dasometric characterization of total height (TH), diameter at breast height (DBH) and volume (V), and a morphological characterization using 22 plant descriptors. Evaluation of eight allometric models to estimate HT from DBH. The 98-month-old *A. acuminata* plantation presented 76% of survival and averages values in TH of 9.06 ± 1.4 m, DAP of 11.47 ± 2.84 cm, AB media de 0.019 ± 0.005 m² and V de 0.06 ± 0.03 m³. At 56 months the trees presented a predominantly ellipsoid shape, growth habit and erect branching, cylindrical and straight trunk, pyramidal and irregular circular crown in the vertical and horizontal profiles. The allometric model that met the selection criteria was Canham-MM, $HT = (82.73 \times DAP) \div (106.27 + DAP)$ which has adjusted R^2 higher than 85%. Mathematical modeling based on DBH is an essential tool to accurately estimate HT in mountain ecosystems, especially in costly or impractical scenarios. Morphological descriptors provided information on tree growth and adaptation to the environment. Their standardization is fundamental for global comparison and genetic improvement of the species.

Palabras clave: alometría; modelos de crecimiento forestal; morfología vegetal; región Andina; silvicultura.

Recibido: 24/04/2024

Aceptado: 29/10/2024

Publicado: 30/11/2024

Sección: Artículo Original

*Autor correspondiente: bobando@agrosavia.co

Introducción

En el planeta la expansión de la frontera agrícola y ganadera, sumados al avance de actividades agropecuarias sobre áreas naturales o con baja intervención humana, han generado procesos degradativos y fragmentación de hábitats (Lopes et al., 2020; Navas Panadero et al., 2020). Esta mala praxis responde a la demanda creciente de alimentos, materias primas y tierras, impulsada por factores demográficos, económicos, y políticos (Méndez Polo, 2019; Penagos et al., 2022). A causa de esto, los efectos causados sobre los ecosistemas de montaña y páramos son múltiples y

¹ Ingeniero Agroforestal M.Sc. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación La Selva, sede Eje Cafetero; Manizales-Colombia. bobando@agrosavia.co. <https://orcid.org/0000-0002-7669-442X>.

² Ingeniero Agroforestal M.Sc. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación Obonuco; Pasto-Colombia. pbacca@agrosavia.co. <https://orcid.org/0000-0002-0590-0396>.

³ Ingeniero Agrícola. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación Obonuco; Pasto-Colombia. jlerma@agrosavia.co. <https://orcid.org/0000-0003-4920-9801>.

⁴ Ingeniera Forestal, M.Sc. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación La Libertad; Villavicencio-Colombia. slcastaneda@agrosavia.co. <https://orcid.org/0000-0003-1329-6317>.

⁵ Ingeniero Agrónomo M.Sc., Ph.D. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia, Centro de Investigación Obonuco; Pasto-Colombia.

negativos (García Bustamante & Leal Esper, 2019), entre los cuales se encuentran la pérdida de diversidad biológica, alteración de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, deforestación, erosión y desertificación de suelos, emisión de gases de efecto invernadero, aumento de la vulnerabilidad frente al cambio climático y reducción de la capacidad de adaptación y resiliencia de las poblaciones humanas y no humanas (Vargas Terranova et al., 2022).

En Suramérica los ecosistemas de montaña son zonas de alta importancia ecológica, donde se albergan una gran diversidad de flora y fauna, en algunos casos endémicas (R. D. Díaz et al., 2023); también se proveen servicios ambientales planetarios como ordenamiento del ciclo del agua, producción de oxígeno y regulación de ciclos biogeoquímicos como carbono, nitrógeno, fósforo y azufre (Leal Esper, 2022; Vargas Terranova et al., 2022). En el mundo y Latinoamérica, Colombia cuenta con la mayor área de ecosistemas de alta montaña, ubicados en la franja altoandina entre 3000 y 3600 msnm con una extensión aproximada de 1925410 ha. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). En el país son importantes para el medio ambiente y la sociedad por proveer servicios ecosistémicos y ser el sustento de las comunidades locales (Tarazona & Lugos, 2019), además son considerados fábricas de agua que proveen las cuencas hidrográficas, vitales para el abastecimiento de agua potable, la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica (Vergara-Buitrago, 2020).

Dentro de estos hábitats, las especies forestales nativas cumplen un rol fundamental para el mantenimiento de su sistema, estructura, función y provisión de servicios ecosistémicos (Pinos-Morocho et al., 2021). El estudio de estas especies es importante para promover el establecimiento de coberturas forestales y sistemas agroforestales que contribuyan a la conservación y restauración de paramos y montañas (Lerma-Lasso et al., 2023); por un lado, su investigación permite identificar los árboles y arbustos más adecuados para cada zona según sus características morfológicas, fisiológicas y genéticas así como sus requerimientos ambientales y sus interacciones con otras especies (Obando-Enriquez, Hernández-Oviedo, et al., 2023). Por otro, su estudio facilita el diseño de sistemas de manejo silvicultural y agroforestal que aprovechen el potencial productivo, ecológico y social de estas especies sin comprometer su conservación y su diversidad genética (Holguín et al., 2018).

En ese sentido en la región andina colombiana se encuentra *Alnus acuminata* Kunth, especie forestal nativa que forma parte de la cultura e identidad de las comunidades de montaña (Obando-Enriquez, Castro-Rincón, et al., 2023); los productores han desarrollado un conocimiento ancestral y una relación armoniosa con esta especie, que les provee madera suave y liviana utilizada para diversos fines (Erazo et al., 2022), también lo usan para leña, y sus hojas y corteza se emplean como forraje para el ganado y como medicina tradicional (Muñoz et al., 2018). Se encuentra establecida en fincas como cercas vivas, en arreglos silvopastoriles, en huertos o chagras (Obando-Enriquez, Bacca-Acosta, et al., 2023); en zonas de importancia ecológica para los asentamientos humanos, y en muchas ocasiones como parte de áreas en regeneración natural y coberturas forestales protectoras (Valle-Carrión et al., 2021)

Esta especie se adapta bien a las condiciones climáticas y edáficas de los ecosistemas de montaña y páramos (Lifeder, 2020). Gracias a su asociación tripartita con hongos y actinomicetos en sus raíces, fija nitrógeno atmosférico y fósforo al suelo, mejorando su fertilidad y favoreciendo el crecimiento de otras plantas (Bacca-Acosta et al., 2023). También enriquece la parte física y biológica del suelo con su biomasa aérea, regula el ciclo hidrológico al captar y almacenar agua en sus estructuras, y evita la erosión del suelo con sus raíces (Tafur Sanchez, 2020). Además, alberga una gran diversidad de fauna asociada, como aves, insectos y mamíferos, que se benefician de sus frutos, semillas, flores y refugio; también es considerada una especie pionera que se usa frecuentemente en la restauración de áreas degradadas (Sampson, 2022). Aulestia-Guerrero et al., (2018) determinaron la importancia de *Alnus acuminata* Kunth en la fijación de Dióxido de Carbono, encontrando que esta especie puede aportar significativamente en la disminución de Dióxido de Carbono presente en la atmósfera, por lo cual esta especie puede ser considerada como una alternativa para la reforestación de ecosistemas andinos.

En función de lo anterior, en el Centro de investigación (CI) Obonuco de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, desde el año 2014 se desarrolló el proyecto “Especies arbustivas y arbóreas para uso múltiple en diferentes agroecosistemas de Colombia”, en el cual entre otros estudios, se recopiló información relacionada con *A. acuminata* Kunth en cuanto a desarrollo dasométrico, descriptores morfológicos de la planta, y modelamientos matemáticos predictivos de crecimiento en función diámetro a la altura del pecho y altura total, y en consecuencia, contribuir a explorar campos de investigación que promuevan un manejo eficiente de sistemas de producción forestal y agroforestal, así como la conservación de la biodiversidad de ecosistemas alto andinos y la adaptación y mitigación de sistemas productivos sostenibles al cambio climático.

Materiales y métodos

Área de estudio

La evaluación tuvo lugar en la Colección Forestal del Centro de Investigación Obonuco de AGROSAVIA, ubicada en un ecosistema de montaña del Subpáramo del Santuario de Flora y Fauna del Volcán Galeras, en la franja altoandina del municipio de San Juan de Pasto, Nariño-Colombia. La investigación se realizó a 3230 metros sobre el nivel del mar, en las coordenadas N 01° 11' 4,13" y W 77° 19' 0.19". Según registros históricos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2024) la precipitación promedio anual de lluvia es 796 mm,

dalvarez@agrosavia.co. <https://orcid.org/0000-0003-3563-2529>.

⁶ Ingeniero Forestal M.Sc., Ph.D. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia, Centro de Investigación Nataima; Nataima-Colombia. jzuluaga@agrosavia.co. <https://orcid.org/0000-0001-8302-5227>.

Como citar: Obando-Enriquez, B. G., Bacca-Acosta, P. P., Lerma Lasso, J. L., Castañeda-Garzón, S. L., Álvarez-Sánchez, D. E., y Zuluaga-Peláez, J. J. (2024). Tipificación de *Alnus acuminata* (Kunth) en un ecosistema de montaña de la región alto andina colombiana. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 26(4), 165–174. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.629>



Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Share - Adapt

temperatura media de 12,8 °C, brillo solar entre 2,5 y 3 horas diarias y humedad relativa del aire 74 %.

Especie vegetal

Alnus acuminata Kunth, es uno de los materiales forestales nativos evaluados que hacen parte de las colecciones de trabajo pertenecientes a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA. En el estudio de su crecimiento, arquitectura y modelamiento alométrico, se evaluaron 200 individuos coetáneos muestreados durante nueve años, desde septiembre de 2014 hasta septiembre de 2022. Estos individuos se encuentran en las parcelas permanentes de monitoreo de la colección forestal de CI Obonuco, establecidos con una densidad de 111 individuos por ha⁻¹; y distancia de siembra de tres metros entre plantas y tres metros entre surcos.

VARIABLES EVALUADAS

Dasometría

En la especie forestal *Alnus acuminata* Kunth, durante 96 meses se evaluó altura total (HT), diámetro a la altura del pecho (DAP), área basal (AB) y volumen (V). Los datos de HT se registraron en metros y se tomaron con clinómetro de precisión Suunto Tándem 360PC/360R. El DAP se determinó en cm con forcípula a 1,30 m del suelo. El área basal se estimó en cm² mediante la ecuación

$$AB = \frac{\pi}{4} \times D^2 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

- AB: Área Basal.
- D: Diámetro en m².

Por último, el volumen con la ecuación de Huber:

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H \times F \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

- V: volumen.
- D: diámetro en m²
- H: altura total en m.
- F: factor forma constante 0,55.

En este caso el factor forma registrado para *A acuminata* en los andes nariñenses es del 0,55. En cada muestreo se registró la edad en meses de los individuos evaluados desde el establecimiento y el porcentaje de sobrevivencia (Pérez et al., 2017).

Incremento medio anual

Con respecto al incremento medio anual dasométrico (IMA), como indicador del crecimiento en términos de diámetro y altura de los árboles de *Alnus acuminata* Kunth, se calculó por medio de la relación del valor promedio de la última medición realizada en los individuos de las variables

diámetro a la altura del pecho y altura total en la parcela; cada uno estos valores se dividieron por la edad en años a partir del tiempo de establecimiento. El resultado expresó la media del crecimiento total a determinada edad, e indica la medida anual del crecimiento.

$$IMA = \frac{y_t}{t_0} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

IMA: incremento medio anual.

Yt: valor de la variable considerada (DAP, HT) a determinada edad en años.

t0: edad en años a partir del tiempo cero.

Descriptorios morfológicos de planta

A los 56 meses de establecimiento se evaluaron las características morfológicas de 170 árboles vivos de *A. acuminata* Kunth empleando siete descriptorios cuantitativos y 15 cualitativos, en cuanto a los cuantitativos de planta fueron: altura total (m) – HT, altura de copa (m) – HC, longitud de la copa en el sentido norte-sur (m) – LCNS, longitud de la copa sentido este-oeste (m) – LCEW, diámetro a la altura del pecho (cm) – DAP, volumen de tronco (m³) -VOL_TRONCO, diámetro de copa (m) – D_COPA.

Los descriptorios morfológicos cualitativos se evaluaron mediante los descriptorios: forma del árbol – FARB, hábito de crecimiento del árbol – HABARB, forma del fuste – FFU, rectitud del fuste – RFU, ramificación del árbol – RAM, altura de ramificación – HRAM, altura de bifurcación – HB, dominancia en el eje principal – DEP, ángulo de inserción de las ramas – AIR, forma de la copa (perfil vertical) – FCV, forma de la copa (perfil horizontal) – FCH, densidad de la copa – DNC, tipo de corteza – CORT, color del tronco – CT, hábito de fructificación -HABF (Castañeda-Garzón et al., 2021; Obando-Enriquez, Castro-Rincón, et al., 2023).

Modelos alométricos

Con el propósito de establecer la relación entre la HT y el DAP, se evaluaron ocho modelos alométricos para especies forestales propuestos por Ledo et al.(2016), los cuales se detallan en la Tabla 1. En este análisis, el diámetro a la altura del pecho fue considerado como la variable independiente, mientras que la altura total se trató como la variable dependiente.

Tabla 1. Modelos alométricos propuestos para estimar la altura total de *Alnus acuminata* Kunth en función del diámetro a la altura del pecho.

Modelo	Ecuación
Lineal	$m = a + b \cdot DAP$
Logarítmica-lineal	$m = a + b \cdot \log(DAP)$
Logaritmo-Logaritmo	$\log(H) = a + b \cdot \log(DAP)$
Ley de potencia	$m = a \cdot DAP^b$
Canham-MM	$m = \frac{a \cdot DAP}{b + DAP}$
Weibull dos parámetros	$m = a \cdot (1 - \exp(-\frac{DAP}{b}))$
Weibull tres parámetros	$m = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot DAP^k))$
Gompertz	$m = k \cdot \exp(-\log(\frac{k}{1.3}) \cdot \exp(-r \cdot DAP))$

Se empleó el método de validación cruzada, un enfoque que garantiza que los datos utilizados para la generación del modelo no sean empleados en la fase de validación (Aguilar et al., 2019). En este sentido, el conjunto completo de 3449 datos se dividió de manera aleatoria, asignando el 70% para el entrenamiento y cálculo de los coeficientes de regresión, mientras que el restante 30% se designó como conjunto de validación. El procedimiento se repitió 50 veces, utilizando diez subconjuntos aleatorios.

Análisis estadístico

Los datos dasométricos se analizaron por medio de estadística descriptiva, mientras que para los datos morfológicos se empleó análisis de frecuencias correspondencias múltiples, componentes principales y conglomerados.

Para el análisis alométrico, una vez se comprobó que los modelos cumplieran con los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas, se procedió a estimar el coeficiente de determinación ajustado (R^2), Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Sesgo de estimación, empleando las siguientes ecuaciones:

$$R^2 = \frac{\sum (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum (H_i - \bar{H}_i)^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\text{Sesgo}_m = \frac{\sum (\hat{m}_i - m_i)}{n} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{RMSE}_m = \sqrt{\frac{\sum (\hat{m}_i - m_i)^2}{n - p}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

- n : Número de árboles.
- p : Número de parámetros del modelo.
- \hat{m}_i : Valor estimado de la altura de árbol.
- m_i : Valor real de la altura de árbol.

La elección del modelo alométrico se basó en los criterios establecidos en el modelo alométrico para *A. acuminata* desarrollado por Bacca et al. (2023), buscando un ajuste robusto a los datos observados, con valores elevados de R^2 ajustado, así como un bajo RMSE y sesgo de estimación. Además, se priorizó el modelo con la menor complejidad estadística, buscando una funcionalidad de cálculo sencilla.

Resultados

Dasometría

A los 98 meses de establecimiento la plantación de *Alnus acuminata* Kunth de la colección forestal del CI Obonuco, presentó 76 % de sobrevivencia, y registros promedios en HT de $9,06 \pm 1,4$ m, en DAP de $11,47 \pm 2,84$ cm, un AB media de $0,019 \pm 0,005$ m² y V de $0,06 \pm 0,03$ m³. Con respecto al Incremento medio anual en altura total fue de $1,10$ m año⁻¹ y en diámetro a la altura de pecho de $1,40$ cm año⁻¹.

Descriptorios morfológicos de planta

La plantación de *Alnus acuminata* Kunth a los 56 meses se caracterizó por estar compuesta de árboles con dimensiones promedio: altura total (HT: $5,97 \pm 1,01$ m), altura de copa (HC: $4,13 \pm 0,91$ m), DAP ($7,46 \pm 1,8$ cm) y longitud de copa de $3,10 \pm 0,76$ m (LCSN) y $3,04 \pm 0,82$ m (LCEW), volumen de tronco (VOL_TRONCO: $0,02 \pm 0,01$ m³), diámetro de copa (D_COPA: $3,07 \pm 0,77$ m).

Los individuos fueron predominantemente de forma elipsoide (FARB: 92,35%), hábito de crecimiento erecto (HABARB: 99,41%), fuste cilíndrico (FFU: 99,41%) y recto (RFU: 47,06%). Ramificación erecta (RAM: 99,41%), árboles no ramificados (HRAM: 75,29%) ni bifurcados (HB: 85,29%) y con dominancia completa en el eje inicial (DEP: 75,88%). Con ramas insertadas en el fuste en un ángulo entre 31° y 60° (AIR: 67,65%), copa de forma piramidal en el perfil vertical (FCV: 64,71%) y circular irregular en el perfil horizontal (FCH: 52,94%), densidad de copa escasa (DNC: 73,53%), corteza lisa (TCORT: 100%) y de tonalidades amarillas 2.5Y5/2 (CT: 61,76%). En el momento de la evaluación, se observó hábito de fructificación en toda la copa (HABF: 73,53%).

Para el análisis multivariado se seleccionaron los descriptorios HT, HC, LCNS, LCEW, DAP, VOL_TRONCO, D_COPA, FARB, RFU, HRAM, HB, DEP, AIR, FCV, FCH, DNC, CT y HABF, ya que presentaron variación con respecto a las categorías de cada descriptor. El análisis de correspondencias múltiples (ACM) permitió seleccionar las primeras seis dimensiones, que acumularon 85,30% de la variabilidad contenida en las variables originales. Se observaron correlaciones muy altas y significativas ($P < 0,0001$) entre HT y HC (0,97), LCEW y LCNS (0,87), VOL_TRONCO y DAP (0,94), D_COPA y LCNS (0,96), D_COPA y LCEW (0,97).

A partir de los factores seleccionados en el ACM y en los componentes retenidos mediante el análisis de componentes principales (91,68% de variabilidad en 2 componentes), se realizó el análisis de conglomerados que permitió clasificar los individuos de *A. acuminata* en cinco grupos acumulando 99,52% de la variabilidad contenida en las variables incluidas en el nuevo conjunto de datos (Figura 1 y Tabla 2). En el primer componente principal las mayores correlaciones se presentaron en VOL_TRONCO, D_COPA y DAP, y en el segundo componente se evidenció en HT y HC.

Modelos alométricos de crecimiento en altura total

Todos los modelos evaluados cumplieron con los supuestos estadísticos y mostraron una tasa de cambio significativa para la variable dependiente. Con una explicación de la variabilidad en la altura de *A. acuminata* entre el 69,85% y 91,29% considerando únicamente el DAP como variable predictiva, lo que resalta la robustez de los modelos alométricos examinados (Tabla 3).

Al basarse en el RMSE, se destacan los modelos Weibull con tres parámetros, Canham-MM, Weibull con dos parámetros y logaritmo-logaritmo, los cuales exhibieron un error inferior a 0,92 m y demostraron una generalización adecuada del comportamiento de los datos para esta especie arbórea. En contraste, los modelos Gompertz y Logarítmico-lineal disminuyeron la precisión en la

Figura 1. Dendrograma de la plantación de *Alnus acuminata* en un ecosistema de montaña en la región altoandina colombiana, a partir de 18 variables cuantitativas y cualitativas de árbol. Agrupamiento por el método Ward, distancia euclidiana.

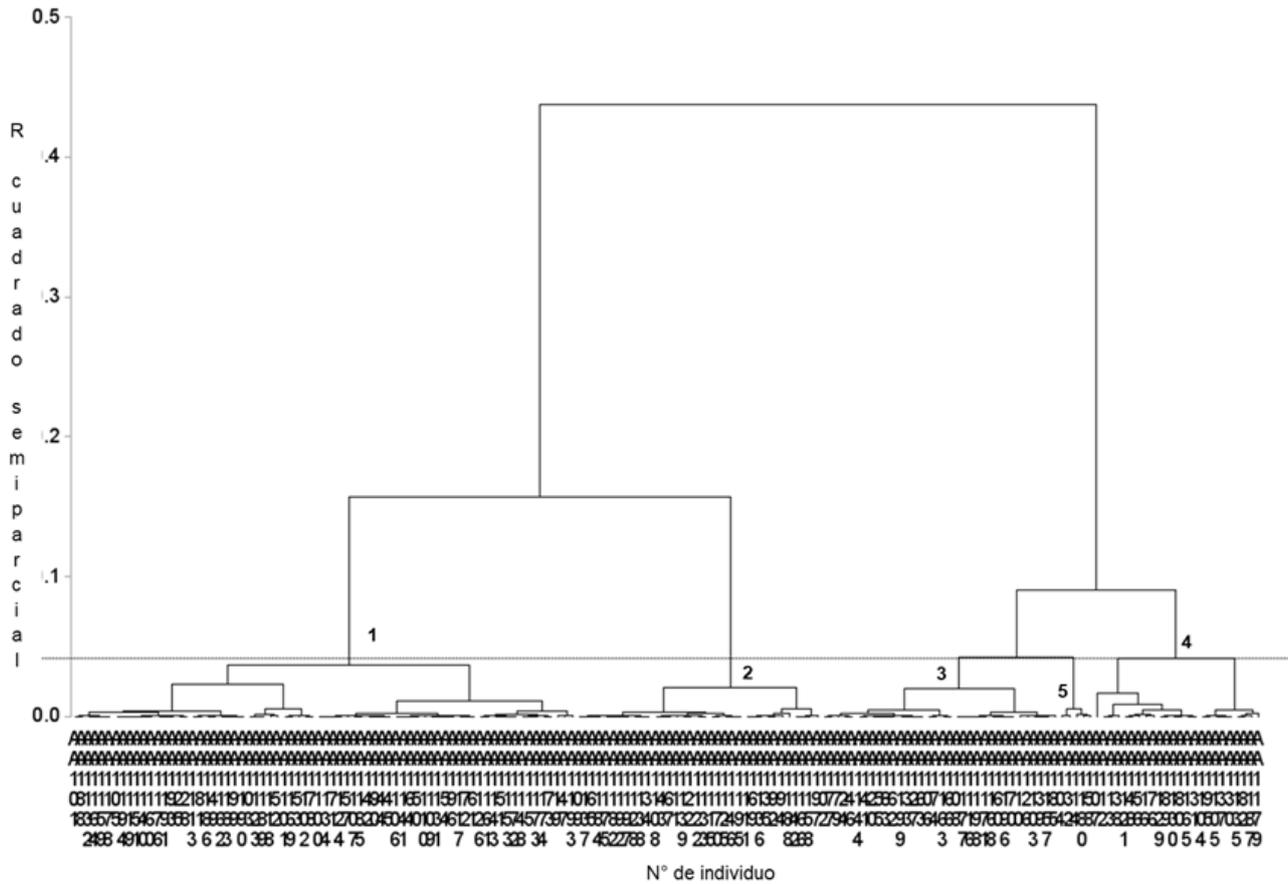


Tabla 2. Principales características de los conglomerados obtenidos en una plantación de *Alnus acuminata* Kunth en un ecosistema de montaña en la región altoandina colombiana.

Grupo	Número de individuos	%	Descripción
1	72	42.35	Valores promedio de HT (6.01 m), HC (4.17 m), DAP (7.09 cm), VOL.TRONCO (0.018 m ³), D.COPA (2.85 m) e IMAHT (1.25 m). RFU con algunas curvaturas en más de un plano, AIR 31° a 60°, FCV predomina piramidal y FCH circular irregular, DNC intermedia y HABF en toda la copa.
2	35	20.59	Valores promedio de HT (4.71 m), HC (3.09 m), DAP (5.37 cm), VOL.TRONCO (0.008 m ³), D.COPA (2.16 m) e IMAHT (0.98 m). RFU con algunas curvaturas en más de un plano, FCH menos de un tercio del círculo, AIR 31° a 60°, DNC intermedia y HABF en toda la copa.
3	34	20.00	Valores promedio de HT (6.30 m), HC (4.40 m), DAP (8.60 cm), VOL.TRONCO (0.027 m ³), D.COPA (3.67 m) e IMAHT (1.31 m). Fuste recto, FCH circular irregular y HABF en toda la copa.
4	24	14.12	Valores promedio de HT (7.48 m), HC (5.47 m), DAP (9.70 cm), VOL.TRONCO (0.042 m ³), D.COPA (3.94 m) e IMAHT (1.56 m). Árboles de forma predominantemente elipsoide, con algunos individuos de forma semicircular, piramidal y extendida. FCH circular irregular, RFU predominante recto, AIR 31° a 60° y HABF en toda la copa.
5	5	2.94	Valores promedio de HT (4.58 m), HC (2.63 m), DAP (8.90 cm), VOL.TRONCO (0.022 m ³), D.COPA (4.36 m) e IMAHT (0.95 m). Árbol de forma semicircular, RFU de rectitud variable (recto a torcido), HRAM en el tercio medio, HB en el tercio medio, DEP dominancia parcial del eje inicial sobre las ramas laterales, FCV irregular y FCH variable.

estimación de la HT, con valores de RMSE de 1,104 m y 1,303 m respectivamente, que se confirma con la representación gráfica, donde la línea de tendencia se aleja

Tabla 3. Modelos alométricos de crecimiento en altura total para *Alnus acuminata* Kunth en un ecosistema de montaña en la región altoandina colombiana.

Modelo	Ecuación	R ² Aj (%)	RMSE (m)	Sesgo (%)	(m)
Lin-	$HT = 0,131 + 0,702 \cdot DAP$	85,63	0,941	-1,89	3,499
Log-lin	$HT = 0,544 + 2,338 \cdot \log(DAP)$	69,85	1,303	-3,14	3,501
Loga-Loga	$\log(HT) = 0,243 + 0,939 \cdot \log(DAP)$	91,29	0,922	-1,39	3,376
Ley de potencia	$HT = 0,804 \cdot DAP^{0,946}$	85,71	0,932	-1,03	3,507
Canham-MM	$HT = \frac{82,73 \cdot DAP}{106,27 + DAP}$	85,82	0,919	-0,86	3,510
Weibull dos parámetros	$HT = 42,781 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{DAP}{54,975}\right)\right)$	85,90	0,919	-0,79	3,509
Weibull tres parámetros	$HT = 19,706 \cdot \left(1 - \exp\left(-0,034 \cdot DAP^{1,116}\right)\right)$	86,37	0,916	-3,33	3,482
Gompertz	$HT = 20,018 \cdot \exp\left(-\log\left(\frac{20,018}{1,3}\right) \cdot \exp(-0,096 \cdot DAP)\right)$	82,01	1,041	2,42	3,756

notablemente de la nube de puntos, lo que condujo a no ser seleccionados en este estudio (Tabla 3 y Figura 2).

Fue posible atribuir a las características inherentes de los modelos probados, la tendencia sistemática a sobreestimar o subestimar los valores reales. Evidenciando que, en siete de los ocho casos, se detectó una menor valoración de la altura con un sesgo que osciló entre el -0,79% al -3,33% y para el modelo Gompertz el valor estimado se incrementó respecto al valor real en un promedio del 2,24% (Tabla 3).

Con lo anterior, se optó por seleccionar el modelo de ecología forestal Canham-MM debido a su sólido desempeño y la simplicidad de cálculo. Este modelo no lineal, presentado en la Tabla 3, permitió que integrar dos coeficientes que determinan la magnitud de cambio en la altura total en respuesta al aumento en el DAP, lo que corrige el modelo ante la variabilidad de datos obtenidos en las condiciones de alta montaña.

Discusión

El porcentaje de sobrevivencia del 76 %, sugiere que la mayoría de los árboles plantados lograron adaptarse y persistir a largo plazo en el ecosistema de montaña. Además, si también se considera los registros medios de altura total (HT) y diámetro a la altura del pecho (DAP), se puede inferir que los árboles presentaron un estado sanitario y de vigor aceptable. Por otro lado, el ritmo de crecimiento anual determinado por el IMAh (1,10 m por año⁻¹), y el IMAD (1,40 cm por año⁻¹), indican que la especie está prosperando en el ecosistema; el desarrollo vertical de los árboles se considera adecuado para las condiciones de altitud y clima en las que se encuentran establecidos.

Los datos dasométricos de la plantación de *Alnus acuminata* Kunth presentaron un rango de crecimiento similar al reportado por otros autores para la misma especie, quienes observaron una relación entre desarrollo de la especie y altura sobre el nivel del mar, siendo la altitud un posible factor que influye en el comportamiento biológico de *A. acuminata* al afectar su crecimiento y vigor (Obando-Enriquez, Castro-Rincón, et al., 2023). En ese sentido L. Escobar et al (2019) en suramerica y Cyamweshi et al., en África (2021), al evaluar la dasometría de esta especie en diferentes cotas, determinaron que, a mayor altitud y menor precipitación, el crecimiento de los árboles fue menor. Al igual que Romahn et al. (2020) mencionaron que la temperatura y la humedad ambiental y del suelo están

influenciadas por la altitud, afectando la movilización de la biota del suelo, lo que en esta especie forestal puede afectar el IMA, la supervivencia, y el vigor de la vegetación.

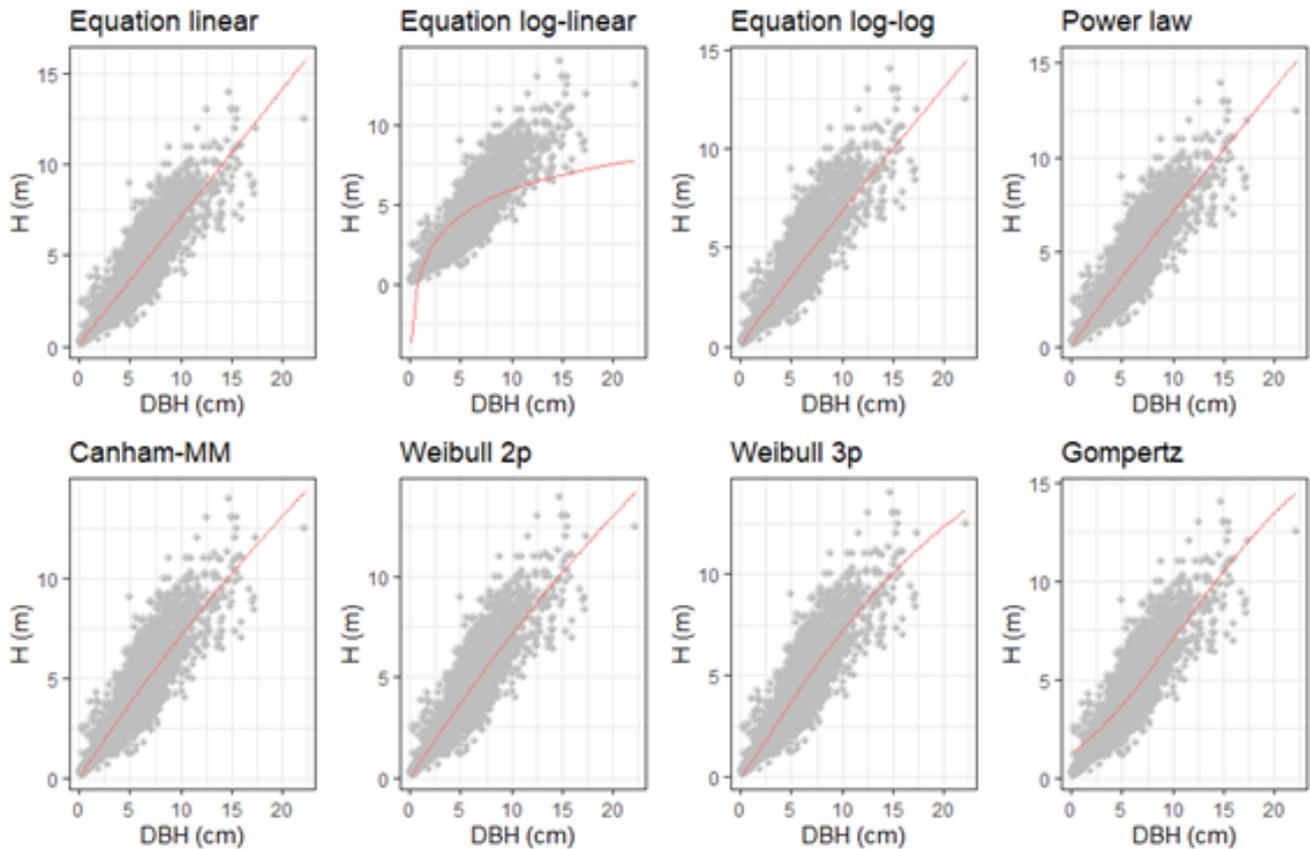
En las regiones montañosas de Latinoamérica, se han realizado diversas investigaciones sobre el crecimiento de *A acuminata*. Los resultados señalan que esta especie presenta distintos rangos dasométricos según la altitud y el sistema de manejo empleado. De este modo, en el norte de Perú, a 2 570 msnm, se constató que una plantación de 12 años presentó un DAP entre 4,30 y 37,5 cm, y una HT entre 4,1 y 15,2 m (Elera-Gonzales et al., 2023). En México, a 2 750 msnm, en una plantación forestal de 11 años Aulestia-Guerrero et al. (2018) reportaron una media de 31 cm de DAP ± 6,73 y una HT de 15,93 ± 1. En Colombia, por un lado en un sistema silvopastoril de 22 años a 2 760 msnm, se registró una HT de 11,74 m y un DAP de 19,17 cm (Obando-Enriquez, Castro-Rincón, et al., 2023). Por otro, a 3 230 msnm, se reportó una HT media de 7,40 ± 1,30 m y un DAP promedio de 9,51 ± 2,23 cm (Bacca-Acosta et al., 2023).

Los estudios previos de diferentes autores citados y la información de esta investigación sugieren que *A acuminata* presenta una buena capacidad de adaptación a diferentes condiciones altitudinales, por lo cual, la selección de individuos sobresalientes puede mejorar la productividad y la calidad de los productos forestales maderables, medicinales y biomasa forrajera comestible, que generan un impacto positivo en la economía local y global. Además, la adaptabilidad y plasticidad de *A acuminata* puede mejorar la restauración de bosques degradados y la creación de bosques mixtos, la implementación de agroforestería en agroecosistemas de alta montaña, así como la resiliencia de los bosques frente a los cambios climáticos, al mejorar la calidad del suelo y en general de los recursos naturales.

Descriptores

En un sistema silvopastoril (SSP) del CI Obonuco de AGROSAVIA (Pasto, Nariño) la evaluación de *A. acuminata* por descriptores resaltó la presencia de árboles con forma semicircular, fuste cilíndrico y copa de densidad intermedia y de forma ovoide invertida (perfil vertical) y de pocas ramas (perfil horizontal) (Obando-Enriquez, Castro-Rincón, et al., 2023). Mientras que en la plantación juvenil evaluada en el C.I. Obonuco se evidenció predominancia de árboles de forma elipsoide, fuste cilíndrico y copa escasa de forma piramidal (perfil vertical) y circular irregular (perfil

Figura 2. Curvas ajustadas de predicción de altura total a partir de diámetro a la altura del pecho aplicando diferentes ecuaciones alométricas.



horizontal). Lo observado concuerda con lo expuesto por Rojas y Torres (2008), al mencionar que el árbol exhibe copa irregular, estrecha o delgada en condiciones naturales, pero es de forma piramidal en condición de plantación forestal, mientras que (A. Diaz, 2019) menciona que la especie presenta fuste cilíndrico a cónico dependiendo del tipo de arreglo en el que se encuentra establecido.

En esta plantación juvenil de *A. acuminata* las características que más discriminaron los conglomerados fueron las cuantitativas (HT, HC, DAP, V_TRONCO, D_COPA, IMAHT) (Tabla 2). El primer conglomerado agrupó la mayor cantidad de individuos, de porte intermedio, copa predominantemente piramidal y con rasgos variables en algunas características.

El segundo grupo se caracterizó por menor DAP, V_TRONCO y D_COPA, copas con follaje en menos de un tercio del círculo y densidad de copa intermedia, características de interés para el asocio con otras especies, considerando que “en sistemas ganaderos, los productores rechazan especies con copas densas y toleran árboles de copa amplia siempre y cuando éstos permitan entrada de luz suficiente y producción del pasto”. “*A. acuminata* es empleada en SPP en el trópico alto y tiene potencial de uso en restauración ecológica y en agroforestería” (Calle Díaz & Murgueitio, 2020).

Los individuos de porte alto con respecto a HT y HC, DAP y D_COPA intermedio se agruparon en el tercer conglomerado, mientras que los individuos de mayores dimensiones en HT, HC, DAP, V_TRONCO e IMAHT se asociaron en el cuarto grupo. Estas características son de

interés para la selección de árboles con fines de producción de biomasa y maderables, pero es importante incluir en la etapa de madurez, la evaluación de las variables número y tamaño de ramas, número de nudos, tasa de crecimiento, forma de fuste y anatomía de la madera (Escobar-Sandoval et al., 2018) entre otras. La categoría del AIR observada en los dos grupos fue entre 31° y 60°, siendo predominante en el cuarto conglomerado.

Por otra parte, en el quinto grupo se asociaron los individuos de menor HT, HC e IMAHT, V_TRONCO intermedio y mayor D_COPA; en este caso, las variables cualitativas fueron las que discriminaron más su agrupación. Referente a las variables altura, bifurcación y rectitud del fuste en etapa juvenil de desarrollo, éstas han sido igualmente útiles para evaluar individuos en un SPP del CI. Obonuco (Escobar-Pachajoa et al., 2019) revelando la presencia de árboles de calidad tipo dos, correspondiente a plantas con algunos aspectos indeseables en su porte.

En cualquiera de los grupos obtenidos, es importante tener en cuenta que la especie tiene potencial de uso en diferentes ámbitos y lugares. Se ha demostrado que el uso de *A. acuminata* en sistemas agroforestales (SAF) y SPP contribuye a mejorar la salud del suelo al emplear biomasa obtenida de la poda de árboles de la especie a cultivos de papa y trigo (Cyamweshi et al., 2022) mejorar la fertilidad del suelo y la liberación de nutrientes gracias a la presencia de artrópodos del suelo (Mberwa et al., 2022) así como contribuir a la captura de carbono pero el beneficio varía con la edad del árbol y la elevación (Cyamweshi et al., 2021).

Modelo

La mayoría de los modelos evaluados demostraron un ajuste apropiado en la estimación de la altura en *A. acuminata*, con un coeficiente de determinación superior al 60% y un sesgo inferior al 20%, criterios usualmente empleados para evaluar la eficiencia de modelos alométricos en diversas especies forestales (Jiménez et al., 2018). Es relevante destacar que, debido al desempeño similar entre modelos, en este estudio se optó por seleccionar el modelo Canham-MM, dada la simplicidad de aplicación, lo que lo hace particularmente adecuado para trabajar con productores.

Además, el modelo Canham-MM ha demostrado un desempeño sobresaliente en diversas investigaciones. Por ejemplo, Ledo et al. (2016) evaluaron la predicción de la altura en función de DAP en más de 600 especies arbóreas de bosques húmedos tropicales y bosques lluviosos, encontrando que este modelo solo fue superado por Weibull con tres parámetros. De manera similar, Martínez-Cano et al. (2019), utilizando un conjunto de datos de 162 especies arbóreas nativas de un bosque húmedo tropical en Panamá, determinaron que el mejor modelo para predecir la altura combinaba una función generalizada Canham-MM.

De forma específica sobre *A. acuminata* Bacca-Acosta et al. (2023) en la misma localidad, evaluaron diferentes modelos alométricos obteniendo un valor máximo de ajuste del 86% con la relación lineal mixta con efecto aleatorio por la edad del árbol, valor que no solo fue superado en este estudio, sino que además al emplear el modelo Canham-MM, de acuerdo con Jiménez et al. (2018), se evita conocer el tiempo de establecimiento de la plantación, generando una mayor facilidad de aplicación al simplificar los cálculos.

En relación específica a *A. acuminata*, Bacca-Acosta et al. (2023) evaluaron diferentes modelos alométricos en la misma localidad, alcanzando un ajuste máximo del 86% mediante la utilización de la relación lineal mixta que incorpora efecto aleatorio por la edad del árbol. Este valor fue superado en este estudio, donde el modelo Canham-MM alcanzó un ajuste del 91,29% (Tabla 3). Según lo indicado por Jiménez et al. (2018), este modelo prescinde de la necesidad de conocer el tiempo de establecimiento de la plantación, lo que simplifica significativamente los cálculos y facilita su aplicación práctica.

Las relaciones alométricas que demuestran una capacidad predictiva adecuada, se emplean ampliamente para evaluar la adaptación y el desempeño de las especies forestales, inferir la morfología de los árboles de manera indirecta, estimar la biomasa de carbono, la producción primaria, entre otras aplicaciones (Jiménez et al., 2018; Martínez et al., 2019; Bacca-Acosta et al., 2023).

Por lo cual, el modelo seleccionado puede constituirse como una herramienta funcional para comprender y cuantificar aspectos importantes de plantaciones forestales de *A. acuminata* en condiciones edafoclimáticas similares. Con mayor relevancia en este estudio, dado que fue generado a partir de estimaciones locales que captura de una amplia gama de factores intrínsecos, como el clima, la estructura de la población, la arquitectura de la especie, las condiciones específicas del sitio y la ontogenia, garantizando una alta robustez en el modelo (Ledo et al., 2016; Aguilar et al., 2019; Paz y Velázquez, 2021).

Conclusión

La plantación juvenil de *A. acuminata* en el Centro de Investigación Obonuco (San Juan de Pasto, Colombia) presentó predominancia de árboles de forma elipsoide, hábito de crecimiento erecto, ramificación erecta, fuste cilíndrico y recto, ángulo de inserción de ramas entre 31° y 60°, copa escasa de forma piramidal (perfil vertical) y circular irregular (perfil horizontal). Los descriptores cuantitativos altura total, altura comercial, diámetro a la altura del pecho. Volumen del tronco, diámetro de copa e incremento medio anual de la altura total discriminaron en mayor medida los conglomerados obtenidos, con individuos con potencial de uso en sistemas agroforestales o silvopastoriles y en la producción de biomasa. Además, los descriptores morfológicos brindan información sobre crecimiento, salud y adaptación de árboles al entorno. Su estandarización es fundamental para la comparación global y el mejoramiento genético de la especie.

El desarrollo dasométrico de la especie *Alnus acuminata* Kunth está influenciado por las condiciones de los ecosistemas de alta montaña donde se encuentra establecido. En este contexto, disponer de una base de datos sólida a lo largo del tiempo posibilita la creación de un modelo alométrico ajustado, el cual, a su vez, facilita una estimación más precisa de la altura total, sin mediciones directas de HT. Este enfoque proporciona una herramienta valiosa para comprender y estimar el crecimiento de la especie en diversos entornos, especialmente en situaciones costosas o impracticables.

Agradecimientos

Esta publicación se deriva de los resultados e información obtenidos en el proyecto “Evaluación de especies arbustivas y arbóreas para uso múltiple en diferentes agroecosistemas de Colombia”, ejecutado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, en el ámbito de la Agenda Dinámica Corporativa, financiado con recursos públicos a través del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). A Martín José Jairo Piscal y Edgar Efrén Naspiran por su apoyo en la recolección de material vegetal y procesamiento, a Jorge Argüelles por su apoyo en el análisis estadístico de datos morfológicos.

Referencias

- Aguilar, F. J., Nemmaoui, A., Peñalver, A., Rivas, J. R., & Aguilar, M. (2019). Developing allometric equations for teak plantations located in the coastal region of Ecuador from Terrestrial Laser Scanning Data. *Forests*, 10(1050), 2–22. <https://doi.org/doi:10.3390/f10121050>
- Aulestia; Edgar, Jiménez; Leticia, Quizhpe; José, & Capa; Daniel. (2018). *Alnus acuminata* kunth: una alternativa de reforestación y fijación de dióxido de carbono. *Bosques Latitud Cero*, 8(2), 64–74. <https://app.bitly.com/Bmc30R8g20R/links/bit.ly/49SRw4P/details>
- Bacca-Acosta, P. P., Obando-Enriquez, B. G., Lerma-Lasso, J. L., Ortega-Cepeda, M. C., Palacio, R. M., & Zuluaga-Pelaez, J. J. (2023). Allometric model for height estimation of *Alnus acuminata* Kunth in

- agroecological zones of the high Andean tropics. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 40(2), 1–13. <https://doi.org/10.22267/rcia.20234002.209>
- Calle Díaz, Z., & Murgueitio, E. (2020). Árboles nativos para predios ganaderos: especies focales del Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible. In CIPAV (Ed.), *Árboles nativos para predios ganaderos: especies focales del Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible*. <https://bit.ly/3xTUKI4>
- Castañeda-Garzón, S. L., Argüelles-Cárdenas, J. H., Zuluaga-Peláez, J. J., & Moreno-Barragán, J. (2021). Evaluación de la variabilidad fenotípica en Simarouba amara Aubl., mediante descriptores cualitativos y cuantitativos. *Orinoquia*, 25(1), 67–77. <https://doi.org/10.22579/20112629.656>
- Cyamweshi, A. R., Kuyah, S., Mukuralinda, A., & Muthuri, C. W. (2021). Potential of *Alnus acuminata* based agroforestry for carbon sequestration and other ecosystem services in Rwanda. *Agroforestry Systems*, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00619-5>
- Cyamweshi, A. R., Muthuri, C. W., Kuyah, S., Mukuralinda, A., Mbaraka, R. S., & Sileshi, G. W. (2022). Pruning and green manure from *Alnus acuminata* improve soil health, and potato and wheat productivity in Rwanda. *Agroforestry Systems*, 98(2), 269–282. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00904-5>
- Díaz, A. (2019). *Identificación, aspectos morfológicos y fenológicos de las especies forestales nativas en el valle de Cajamarca* [Universidad de Cajamarca]. <https://bit.ly/3UYbKCB>
- Díaz, R. D., Machaca, A. D., Belizario, G., & Lujano, E. (2023). Effects of Climate Change on Mountain Ecosystems in the Carabaya Mountain Range-Peru. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38, 1–14. <https://doi.org/10.1590/0102-778638230088>
- Elera-Gonzales, D. G., Valdez Campos, J. V., Gonzalez Acosta, M. Y., & Araujo Silva, E. (2023). Estimación del volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* Kunth en plantaciones forestales. *Revista Nor@Ndina*, 6(2), 145–159. <https://doi.org/10.37518/2663-6360x2023v6n2p145>
- Erazo, O., Fernandez, Y., Molina, Y., Araujo, J., & Encinas, O. (2022). *Natural durability of Alnus acuminata Kunth*. 63, 23–36. <https://bit.ly/3U6Su7A>
- Escobar-Pachajoa, L., Guastumal-Gelpud, C., Meneses-Buitrago, D. H., Cardona Iglesias, J. L., & Castro Rincón, E. (2019). Evaluación de estratos arbóreos y arbustivos en un sistema silvopastoril en el trópico altoandino colombiano. *Agronomy Mesoamericana*, 30(3), 803–819. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35645>
- Escobar-Sandoval, M. C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Espinosa-Zaragoza, S., & Borja-De la Rosa, A. (2018). Genetic parameters for wood quality, growth and branching traits in pinus patula. *Madera y Bosques*, 24(2), 1–11. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>
- García Bustamante, A., & Leal Esper, Y. (2019). Analysis to the protection of the state to the ecosystems of moor. *Justicia*, 35, 1–19. <https://doi.org/10.17081/just.24.3.5.338>
- Holguín, V. A., García, I. I., & Mora Delgado, J. R. (2018). *Aplicación de modelos matemáticos no lineales para la estimación de parámetros de crecimiento de Alnus acuminata en sistemas silvopastoriles de Roncesvalles, Tolima*. <https://bit.ly/3hZ9mxU>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2024, March 2). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*. <https://bit.ly/44feRfV>
- Jiménez, L. D., Valverde, J. C., & Arias, D. (2018). Determinación del mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea* Roxb procedente de plantaciones con manejo de rebrotes. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15, 51–59. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i1.3775>
- Leal Esper, Y. E. (2022). importancia de la preservación de los ecosistemas de páramo como fuentes de agua y vida en Colombia. *Diálogos de Saberes*, 52, 111–126. <https://doi.org/10.18041/0124-0021/dialogos.52.2020.8651>
- Ledo, A., Cornulier, T., Illian, J., Iida, Y., Rahman, A., & Burslem, D. (2016). Re-evaluation of individual diameter: height allometric models to improve biomass estimation of tropical trees. *Ecological Applications*, 26(8), 2376–2382. <https://doi.org/10.1002/eap.1450>
- Lerma-Lasso, J. L., Bacca-Acosta, P. P., Obando-Enriquez, B. G., Castro-Rincón, E., & Cardona Iglesias, J. L. (2023). *Sistemas silvopastoriles: una opción para la sostenibilidad de los sistemas ganaderos de alta montaña*. 46, 1–9. <https://bit.ly/3U6Teto>
- Lifeder. (2020, December 18). *Aile: características, hábitat y aspectos ecológicos*. <https://bit.ly/3w3wJxB>
- Lopes, M. A., Moraes, M. I., & Wilcox, R. (2020). Ranching in the Americas: Reflections on Technology, Consumption, and Trade. *Mundo Agrario*, 21(46). <https://doi.org/10.24215/15155994E129>
- Martínez-Cano, I., Muller-Landau, H. C., Wright, J., Bohlman, S., & Pacala, S. (2019). Tropical tree height and crown allometries for the Barro Colorado Nature Monument, Panama: A comparison of alternative hierarchical models incorporating interspecific variation in relation to life history traits. *Biogeosciences*, 16(4), 847–862. <https://doi.org/10.5194/bg-16-847-2019>
- Mberwa, J. W., Nsengimana, V., & Naramabuye, F. X. (2022). Investigation of effect of *Alnus acuminata* tree species on soil biochemical properties in silvopasture around Gishwati forest western Rwanda. *Wildlife & Environment*, 14(3), 35–48. <https://bit.ly/3FBxG0G>
- Méndez Polo, O. L. (2019). Los intereses emergentes sobre la alta montaña y la vida campesina: tensiones y contradicciones de la delimitación de páramos en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(2), 322–339. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n2.70549>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Ecorregiones Estratégicas de Colombia, Ecosistemas de alta montaña*. <https://bit.ly/3Uuk3Jw>

- Muñoz, D., Navia, J. F., & Solarte, J. G. (2018). *El conocimiento local en los sistemas Silvopastoriles tradicionales: Experiencias de investigación en la región andina* (Universidad de Nariño (ed.); 1st ed.). <https://bit.ly/3W8Dj0n>
- Navas Panadero, A., Aragón Henao, L. F., & Triana Valenzuela, J. F. (2020). Efecto del componente arbóreo sobre la dinámica de crecimiento y calidad nutricional de una pradera mixta en trópico alto. *Revista de Medicina Veterinaria*, 1(41), 71–82. <https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss41.7>
- Obando-Enriquez, B. G., Bacca-Acosta, P. P., Portillo-Lopez, P. A., Hernandez-Oviedo, F., & Castro-Rincón, E. (2023). Contenido mineral de *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone, asociado a *Alnus acuminata* (Kunth), en trópico alto colombiano. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 25(4), 224–232. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.571>
- Obando-Enriquez, B. G., Castro-Rincón, E., & Castañeda-Garzón, S. L. (2023). Caracterización de *Alnus acuminata* (Kunth) en un arreglo silvopastoril, en la región altoandina colombiana. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 25(3), 129–139. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.505>
- Obando-Enriquez, B. G., Hernandez-Oviedo, F., Portillo-Lopez, P. A., & Castro-Rincón, E. (2023). Productividad y calidad del forraje de *Cenchrus clandestinus* (Hochst. ex Chiov.) Morrone en dos sistemas pastoriles en la cordillera andina colombiana. *Pastos y Forrajes*, 46(09), 1–7. <https://bit.ly/3Qk6WYW>
- Penagos, Á. M., Parra, M. A., & Granados, S. (2022). La biodiversidad y el desarrollo agropecuario en Colombia: propuesta para avanzar hacia una transformación desde la perspectiva del desarrollo sostenible. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, 2, 51–67. <https://doi.org/10.53010/nys2.03>
- Pérez, Y., Reyes, R., & Ríos, C. (2017). Variables dasométricas relacionadas con la productividad de *Acacia mangium* Willd. *Revista Centro Agrícola*, 44(2), 14–21. <https://bit.ly/3FY9B5R>
- Pinos-Morocho, D., Morales-Matute, O., & Durán-López, M. E. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 157–179. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.8>
- Rojas Rodríguez, F., & Torres Córdoba, G. (2008). Árboles del Valle Central de Costa Rica: reproducción Cedro dulce. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(13), 72–74. <https://bit.ly/3U9IE4Z>
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I., & Pérez-Hernández, M. D. J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 8(22), 1–17. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.72751>
- Sampson, A. L. (2022). *Mixed species plantations and their potential role in innovative production systems for forest restoration Lessons from Latin America , sub-Saharan Africa, South and Southeast Asia* (Issue December 2021). <https://doi.org/10.17528/cifor/008448>
- Tafur Sanchez, B. (2020). Efecto del sistema silvopastoril con *Alnus acuminata* en el valor agronómico y nutricional del *Pennisetum clandestinum*. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 3(3), 9–14. <https://doi.org/10.25127/ucni.v3i3.630>
- Tarazona, Á. A., & Lugos, A. D. C. (2019). Thinking socio-environmental change: An approach to collective actions in defense of the páramo de Santurbán (Santander, Colombia). *Revista Colombiana de Sociología*, 42(1), 157–175. <https://doi.org/10.15446/rcs.v42n1.73070>
- Valle-Carrión, L., Hildebrandt, P., Castro, L. M., Ochoa-Moreno, W.-S., & Knoke, T. (2021). Simultaneous optimization model for thinning and harvesting *Alnus acuminata* and *Pinus patula* plantations in Southern Ecuador. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 36(2–3), 144–154. <https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1858956>
- Vargas Terranova, C., Gonzalez Díaz, J., & Rueda Ramirez, M. (2022). Evaluación ambiental en el escenario actual y con bonos de carbono: páramo La Cortadera, departamento de Boyacá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 27(1). <https://doi.org/10.19053/01233769.11953>
- Vergara-Buitrago, P. A. (2020). Estrategias implementadas por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia para conservar los páramos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(1), 167–176. <https://doi.org/10.15359/rca.54-1.9>