

Estimación del volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* Kunth en plantaciones forestales

Estimation of individual tree volume of *Alnus acuminata* Kunth in forest plantations

Duberli Geomar Elera-Gonzales^{1,4*}  José Víctor Valdez Campos² 
Mikio Yosey González Acosta³  Emanuel Araújo Silva⁴ 

¹ Universidad Nacional Autónoma de Chota, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Grupo de Investigación Biometría y Geomática Forestal, Jr. José Orores 418, Chota 06121, Cajamarca, Perú.

² Instituto Tecnológico de la producción, CITE Forestal Pucallpa, Jr. Flora y fauna 199, Pucallpa 25000, Callería, Coronel Portillo, Ucayali, Perú.

³ Maderas Prosperidad SAC, Autopista del Sol Mz. A Lt. 0 Zona Industrial N° 5, Sullana 20103, Piura, Perú.

⁴ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Laboratório de Sensoriamento Remoto – LASER, Recife – PE, CEP: 52171-900, Brasil.

*Autor de correspondencia: [E-mail: dgelerag@unach.edu.pe]

RESUMEN

La cuantificación de la producción maderable forma parte fundamental del modelamiento del crecimiento y productividad de las plantaciones forestales, y es de vital importancia en la toma de decisiones durante el ciclo del manejo forestal, en ese sentido, el objetivo en este estudio fue estimar el volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* Kunth en plantaciones forestales de una región de los andes del norte peruano. Fueron utilizados datos de cubicación rigurosa de árboles de *Alnus acuminata* (Aliso) de una plantación forestal localizada en la Comunidad Campesina Magdalena, distrito Magdalena, provincia Chachapoyas, en los andes del norte de Perú, a una altitud de 2 570 m s.n.m. Fueron ajustados seis modelos volumétricos que estiman el volumen individual (v) de los árboles en función del DAP y H . Cinco de los seis modelos ajustados obtuvieron todos sus coeficientes altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$). El modelo $v = \beta_0(DAP^2H)^{\beta_1} + \varepsilon$ obtuvo el mejor coeficiente de determinación ajustado ($R_{aj}^2 = 0,9777$), menor error estándar residual ($S_{y.x} = 0,0281$) y menor raíz del error cuadrático medio ($RMSE = 0,0271$). De acuerdo con ello, la ecuación $v = 0,0001468(DAP^2H)^{0,8610}$ puede ser utilizada para estimar el volumen total del fuste en árboles de *Alnus acuminata* en plantaciones forestales en la zona de estudio y ambientes

similares. Mayor cantidad de estudios que permitan ampliar el rango de diámetros y alturas, así como ampliar la cobertura territorial de los datos son requeridos.

Palabras clave: Aliso, modelamiento forestal, manejo forestal, producción forestal, Perú.

ABSTRACT

The quantification of timber production is a fundamental part of growth and productivity modeling of forest plantations and is of vital importance in decision-making during the forest management cycle. Therefore, the objective of this research was to estimate the individual volume of *Alnus acuminata* Kunth trees in forest plantations within a region of the northern Andes of Peru. Rigorous tree volume data of *Alnus acuminata* (Aliso) from a forest plantation located in the Comunidad Campesina Magdalena, Magdalena district, Chachapoyas province, in the northern Andes of Peru, at an altitude of 2,570 m above sea level, were used. Six volumetric models were fitted to estimate the individual volume (v) of the trees based on DBH (Diameter at Breast Height) and H (Height). Five out of the six fitted models obtained all their coefficients highly significant ($\alpha \leq 0.01$). The model $v = \beta_0(DAP^2H)^{\beta_1} + \varepsilon$ achieved the best adjusted coefficient of determination ($R_{aj}^2 = 0,9777$), the lowest residual standard error ($S_{y,x} = 0,0281$), and the lowest root mean square error ($RMSE = 0,0271$). Accordingly, the equation $v = 0,0001468(DAP^2H)^{0,8610}$ can be used to estimate the total stem volume of *Alnus acuminata* trees in forest plantations in the study area and similar environments. Further studies that allow expanding the range of diameters and heights, as well as broadening the territorial coverage of the data, are required.

Keywords: Aliso, forest modelling, forest management, forest production, Peru.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, la industria forestal en el Perú ha priorizado el manejo y aprovechamiento de bosques nativos, principalmente en los que, según la ley forestal, se denominan bosques de producción permanente (BPP) que están localizados en la Amazonía (SERFOR & INEI, 2021). A pesar de que las primeras informaciones de establecimiento de plantaciones forestales datan de hace más de 150 años, como la introducción del *Eucalyptus globulus* en los andes centrales (Pinto et al., 2007) y las primeras plantaciones de *Pinus patula* y

Pinus radiata establecidos a partir del año 1960 en la sierra de La Libertad (Guariguata et al., 2017), la actividad de plantaciones forestales no ha logrado consolidarse como una fuente importante de generación de recursos económicos para el país, como ocurre en otros países de la región.

En términos de extensión territorial, Perú cuenta con alto potencial para establecer y manejar plantaciones forestales, especialmente en la zona andina ya amazónica, sin embargo, hasta la fecha esta actividad representa menos del 0.05% del PIB (Mendiburu &

Cosavalente, 2022). El estancamiento del desarrollo del sector de plantaciones forestales en el país se debe fundamentalmente a la incorrecta selección de especies y sitios, falta de semillas de calidad y mejora genética, además la falta de manejo silvicultural y monitoreo del crecimiento de las plantaciones que han sido establecidas en todo el territorio nacional desde los primeros años de la década de 1960 (FAO, 2016; Guariguata et al., 2017). Revertir ese hecho, es quizá uno de los mayores desafíos al que nos enfrentamos la comunidad científica, académica y profesional de ingeniería forestal de Perú, lo cual se vuelve mucho más relevante, ya que cada año, gobiernos locales y regionales e incluso el gobierno nacional, destinan recursos económicos para el establecimiento de plantaciones forestales de especies nativas y exóticas en costa, sierra y selva, sin programas de seguimiento y monitoreo de su crecimiento.

Anticipar el volumen maderable, así como el rendimiento y la calidad de los árboles y bosques representa un desafío creciente en el manejo forestal y requiere el uso de herramientas para realizar proyecciones precisas sobre el desarrollo y crecimiento a nivel de árbol, así como el rendimiento y calidad de los diversos productos forestales (Drew, 2021), en ese sentido, la predicción del crecimiento forestal constituye la base de la planificación a largo plazo

(Tompalski et al., 2021). Los inventarios forestales son sin lugar a duda, la mejor fuente de información para dicho proceso (Campos & Leite, 2017), por tanto, las decisiones de manejo están directamente influenciadas por la cantidad, calidad y disponibilidad de información biométrica relevante de los árboles (Asrat et al., 2020).

El modelamiento del crecimiento a escala individual a partir de datos del inventario de árboles permite ajustar y calibrar mejor los parámetros de los modelos (Drew 2021), en ese contexto, la cuantificación del volumen maderable es una variable clave que es necesario determinar en toda la cadena del manejo forestal (Revilla Chávez et al. 2021), para la toma de decisiones durante el ciclo forestal, con lo cual se genera beneficios a nivel regional y nacional, en términos de madera de bajo costo, almacenamiento de carbono, biodiversidad y otros servicios ecosistémicos que brindan las plantaciones forestales (Guo et al., 2023). *Alnus acuminata* es una especie nativa de la región andina, que se desarrolla en ambientes naturales por encima de los 1 700 m.s.n.m. (Jimenez et al., 2023), manejada en ambientes naturales y aprovechada de manera selectiva para uso maderable y energético (Vidaurre et al., 2006), y que, desde inicios del presente milenio, es utilizada en programas de forestación y reforestación en sistemas agroforestales en toda

Latinoamérica (Badilla et al., 2000). Los agroecosistemas de la región andina de Perú no son ajenos a esta realidad, pues en los últimos años, *Alnus acuminata* ha sido regularmente utilizada en el establecimiento de macizos forestales y sistemas agroforestales, principalmente en la zona norte de los andes peruanos (Visscher et al. 2023), a pesar de ello, la falta de información sobre el crecimiento y rendimiento productivo de esta especie es un problema recurrente, ya que no existe reporte de investigaciones sobre modelamiento de las variables dasométricas de *Alnus acuminata*, dentro del territorio nacional.

Entre los métodos para cuantificar el volumen de los árboles, las ecuaciones volumétricas son las más utilizadas, se destacan porque estiman el volumen total del fuste de una manera simple y precisa, utilizando como variables independientes mediciones del diámetro a la altura del pecho y la altura total o comercial (Andrade et al. 2019; Campos & Leite 2017). En ese sentido, con la finalidad de generar información científicamente válida que contribuya al desarrollo del sector de plantaciones forestales en Perú; a través del ajuste de modelos matemáticos, el presente estudio tuvo el objetivo de estimar el volumen individual de árboles de *Alnus*

acuminata Kunth en plantaciones forestales de una región de los andes del norte peruano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se realizó en una plantación forestal de *Alnus acuminata* (Betulaceae) ubicada en la margen derecha del río Utcubamba en el territorio de la Comunidad Campesina Magdalena, perteneciente al distrito Magdalena, provincia Chachapoyas, región Amazonas, en el norte de Perú, y localizada en las coordenadas -6,388526° S y -77,865488° O, a una elevación de 2570 m.s.n.m. (Figura 1). El área de estudio corresponde a la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT) (Aybar Camacho & Lavado-Casimiro, 2017), la geología del lugar corresponde a areniscas cuarcíticas que corresponde a rocas sedimentarias. La precipitación anual en el área de estudio es de 1100 mm en promedio. De acuerdo con lo reportado en el Mapa Climático del Perú, el clima de la zona está clasificado como Templado, lluvioso con humedad abundante todas las estaciones del año, con temperaturas máximas entre 25 a 29 °C y mínimas de 11 a 17 °C (Castro et al., 2021).

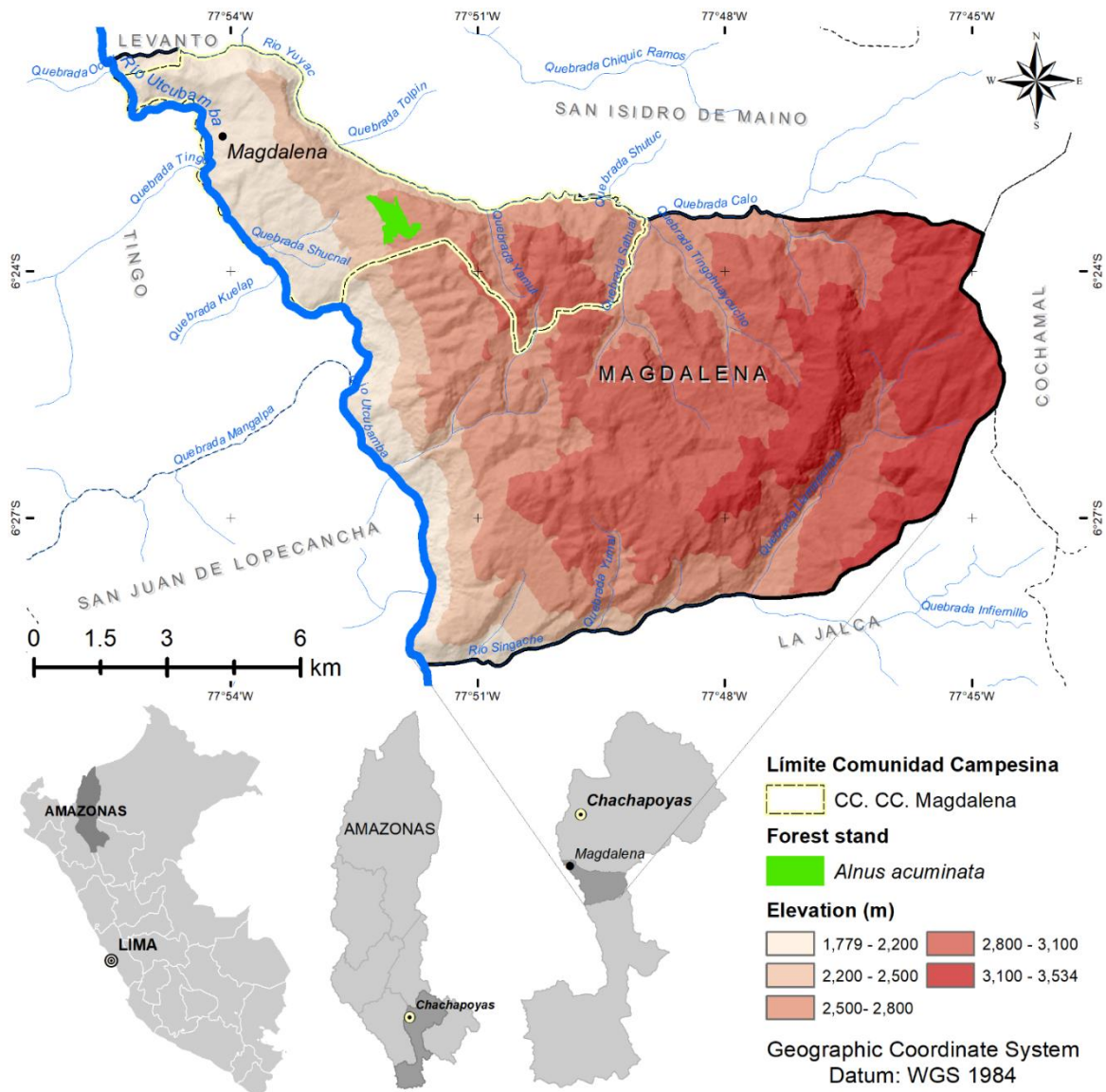


Figura 1. Localización del área de estudio. Plantación de *Alnus acuminata* en la comunidad campesina Magdalena, distrito de Magdalena, provincia de Chachapoyas, región Amazonas.

Material de estudio

La plantación está ubicada a 5 km de la capital del distrito de Magdalena y 45 km de la ciudad de Chachapoyas, fue establecida en el año 2007 a través de un proyecto de inversión pública financiado por el Fondo Ítalo-Peruano, gestionado y ejecutado a través de los fondos

concurables de Sierra Norte con participación técnica del Gobierno Regional de Amazonas y mano de obra de la población beneficiaria; la densidad inicial de la plantación fue de 1283 árboles por hectárea, establecida en sistema tresbolillo a un distanciamiento de 3 m x 3 m.

Colecta de datos

Los datos utilizados en este trabajo fueron colectados a partir de un inventario forestal en parcelas temporales de 400 m² (20 m x 20 m) en la plantación de *Alnus acuminata* con 12 años. Después de realizado el inventario, una muestra de 30 árboles, distribuidos de manera proporcional en toda la amplitud del diámetro a la altura del pecho (**DAP**); fueron seleccionados y cubcados rigurosamente por el método destructivo. La medición del diámetro a la altura del pecho, registrado a 1,30 m sobre el nivel del suelo (**DAP**) y de la altura total (**H**) de los árboles fue realizada con el árbol en pie con cinta diamétrica e hipsómetro analógico de la marca Suunto, respectivamente. Después de la medición de los árboles en pie, los 30 árboles fueron talados. Posteriormente se realizó la cubicación rigurosa, los diámetros fueron medidos a lo largo del fuste en secciones de 1 m de longitud. Los árboles seleccionados tuvieron un rango de 4,30 a 37,5 cm de **DAP** y de 4,1 a 15,2 m de altura total. Los datos de cubicación fueron digitalizados en una planilla de Microsoft Excel, conteniendo informaciones referentes al número de árbol (**n**), **DAP** en cm, **H** en m, *i*-ésimo diámetro (**d_i**) en la *i*-ésima altura del

árbol (**h_i**), en cm y m respectivamente, así como el volumen de la *i*-ésima sección del fuste en m³. El volumen de cada sección del fuste (**v_i**) fue calculado aplicando la fórmula de Smalian (1).

$$v_i = \left(\frac{S_i + S_{i+1}}{2} \right) \cdot l \quad (1)$$

Donde: $S_i = \frac{\pi}{4} d_i^2$ es calculada en m², **S_i** es el área seccional inferior y **S_{i+1}** el área seccional superior de la *i*-ésima sección del fuste, **l** es la longitud en m de la *i*-ésima sección de cada fuste.

El volumen total (**v**) e individual de los árboles en m³, fue calculado por la sumatoria sucesiva de los volúmenes de todas las secciones cubicadas en cada árbol. Finalmente, una base de datos conteniendo los valores del **DAP**, **H** y **v**, fue construida.

Modelos ajustados

Fueron ajustados los seis modelos volumétricos a nivel de árbol individual, los cuales se muestran en la *Tabla 1*, estos modelos son constantemente sugeridos y utilizados en estudios de dendrometría (Binkley et al., 2020; Campos & Leite, 2017; Olmedo et al., 2023). El ajuste de dichos modelos fue realizado utilizando el software R (R Core Team 2022).

Tabla 1. Modelos volumétricos utilizados, estiman el volumen del fuste de los árboles en relación con el *DAP* y Altura total

Código	Fórmula del modelo	Autor
M1	$v = \beta_0(DAP^2 \cdot h) + \varepsilon$	Spurr (1952)
M2	$\log(v) = \beta_0 + \beta_1 \log(DAP) + \beta_2 \log(H) + \varepsilon$	Schumacher & Hall (1933)
M3	$v = \beta_0 DAP^{\beta_1} + \varepsilon$	Husch (1963)
M4	$v = \beta_0(DAP^2 H)^{\beta_1} + \varepsilon$	Spurr (1952)
M5	$\log(v) = \beta_0 + \beta_1 \log(DAP) + \beta_2 DAP^{-1} + \varepsilon$	Brenac (s.f.)
M6	$\log(v) = \beta_0 + \beta_1 \log(DAP^2 \cdot H) + \varepsilon$	Spurr (1952)

Análisis estadístico

Los estudios de modelamiento forestal requieren el uso de diversos parámetros estadísticos con la finalidad de realizar la evaluación y análisis de los modelos matemáticos ajustados (Asrat et al., 2020; Guo et al., 2023; Sharma, 2021). Para los seis modelos volumétricos, fue calculado el coeficiente de determinación – R^2 (2), coeficiente de determinación ajustado – R_{aj}^2 (3), el error estándar residual – $S_{y,x}$ (4) (Campos & Leite, 2017), raíz del error

cuadrático medio – $RMSE$ (5) y error medio absoluto – MAE (6), criterios estadísticos más utilizados en la evaluación de la bondad de ajuste de modelos (Sabatia & Burkhart, 2014; Sebrala et al., 2022) adicionalmente, fueron realizados gráficos del volumen observado (v) frente al volumen estimado (\hat{v}), y del volumen estimado (\hat{v}) frente a los residuos de todos los datos utilizados. Sobre la base de la evaluación descrita, se seleccionó el mejor modelo volumétrico, entre los seis ajustados y evaluados.

$$R^2 = \frac{(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{(y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p}\right) \cdot (1 - R^2) \quad (3)$$

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

Donde, y_i es la variable observada; \hat{y}_i es la variable estimada; \bar{y} es la media de la variable observada; n es el número de observaciones; p es el número de parámetros del modelo ajustado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores estimados de los coeficientes para los seis modelos volumétricos utilizados en este estudio se presentan en la Tabla 2 que incluye el indicador del nivel de significancia para cada coeficiente y el *p-valor* para cada modelo.

Tabla 2. Coeficientes y significancia de los seis modelos ajustados, incluye el símbolo del nivel de significancia de cada

Código	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	<i>p – valor</i>
M1	0,00004022***	-	-	< 0,0001
M2	-9,34560***	2,06943***	0,60197***	< 0,0001
M3	0,0004574*	2,0099259**	-	< 0,0001
M4	0,0001468**	0,8610***	-	< 0,0001
M5	-8,6698***	2,3011***	0,3065 ^{0,909}	< 0,0001
M6	-9,7098***	0,9574***	-	< 0,0001

Leyenda: $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ e $\hat{\beta}_2$ son los coeficientes estimados de los modelos, *** nivel de significancia $\alpha < 0,001$, ** nivel de significancia $\alpha = 0,001$, * nivel de significancia $\alpha = 0,01$.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de la varianza (ANOVA) de cada modelo, se confirmó que los seis modelos ajustados son altamente significativos (*p-valor* < 0,0001), indicativo de que existe un alto nivel de confianza que los modelos ajustados pueden utilizarse para explicar la variable dependiente en función de variables independientes (Molina Arias, 2017) en este caso el volumen individual de los árboles de *Alnus acuminata* (*v*) en función de las variables independientes *DAP* y *H*.

Por su parte, los coeficientes estimados de los seis modelos ajustados fueron altamente significativos ($\alpha \leq 0,01$) a excepción del coeficiente $\hat{\beta}_2$ del modelo M5 ($\alpha \leq 0,5$, *p-valor* = 0,909). Un modelo genera una ecuación estadísticamente adecuada cuando todos sus coeficientes son significativos (Romero et al., 2022), consecuentemente, el modelo M5 debe ser descartado, debido a que no cumple con dicha exigencia estadística

Tabla 3. Estadísticas de bondad de ajuste de los 6 de modelos volumétricos

Código	R^2	R_{aj}^2	$S_{y,x}$	$RMSE$	MAE
M1	0,9683	0,9683	0,0334	0,0328	0,0213
M2	0,9759	0,9741	0,0302	0,1318	0,1002
M3	0,9499	0,9481	0,0428	0,0413	0,0296
M4	0,9784	0,9777	0,0281	0,0271	0,0226
M5	0,9402	0,9358	0,0476	0,1957	0,1512
M6	0,9730	0,9720	0,0314	0,1579	0,1190

A excepción del modelo M5, al observar los valores de R^2 e R_{aj}^2 obtenidos y dado que todos los modelos fueron altamente significativos, podemos afirmar que los modelos M1, M2, M3, M4 y M6 presentan buenas estadísticas de ajuste ($0.9481 \leq R_{aj}^2 \leq 0.9777$), es decir, los modelos explican entre el 94,81 % y el 97,77% de la variabilidad de los datos de volumen por la relación que existe con los correspondientes valores de DAP y H de los árboles, por tanto, estos modelos pueden ser utilizados para estimar el volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* de plantaciones forestales en la zona de estudio y que además pueden utilizarse como referencia para otras zonas y plantaciones con similares características (Campos & Leite, 2017; Yoon et al., 2013).

La *Figura 2* muestra los gráficos de dispersión del volumen individual observado (eje x) frente a los valores estimados (eje y) por cada uno de los seis modelos ajustados. Este tipo de gráficos es sugerido para realizar una adecuada selección de modelos. Es posible conocer la precisión con la que los modelos se ajustan a los datos empíricos mediante el diagrama de dispersión de los valores observados frente a los valores estimados, seguido de la prueba de la importancia de la pendiente ($b = 1$) y la intersección ($a = 0$), el análisis gráfico sugiere que un modelo es mejor a medida que los puntos en el gráfico se ajustan a la pendiente (Sebrala et al., 2022).

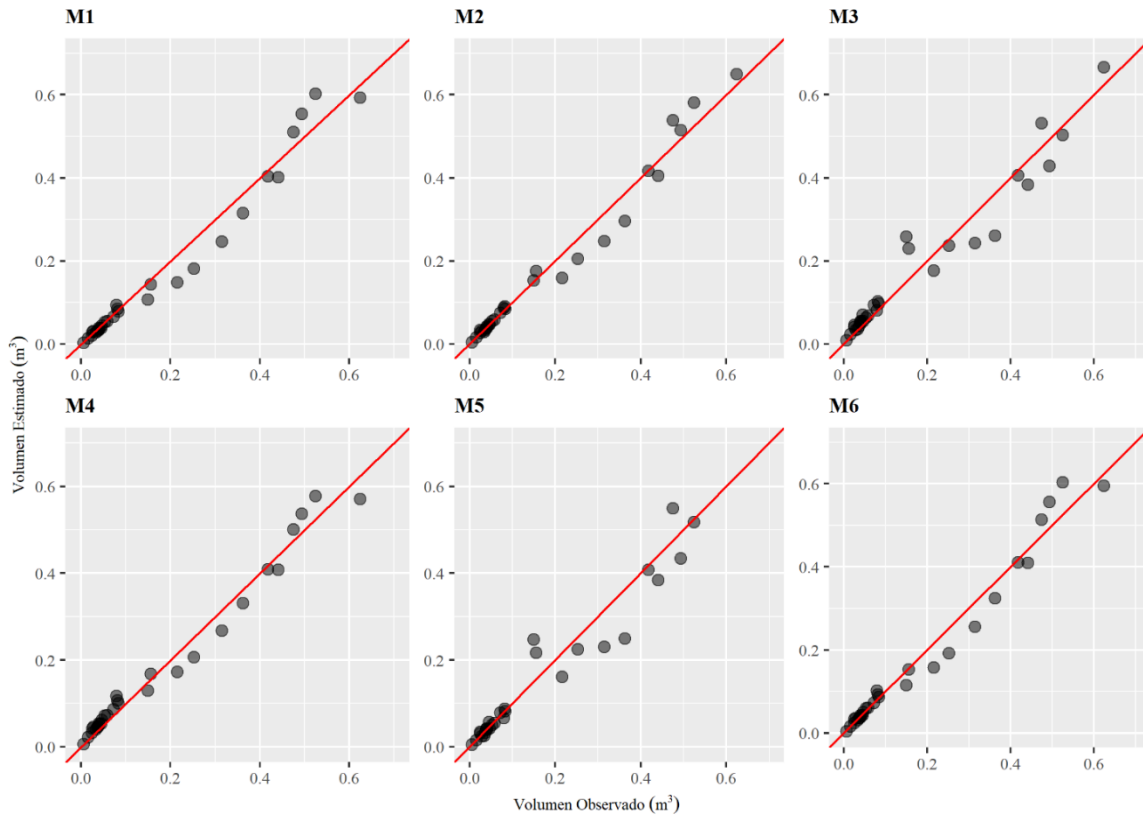


Figura 2. Valores observados vs valores estimados de los seis modelos volumétricos utilizados

Similar a lo que se muestra en la *Figura 2*, a continuación, se muestra la distribución de los residuos (eje y) en función a los valores estimados (eje x)

por cada modelo (*Figura 3*). Un modelo es mejor a medida que los puntos en el grafico se ajustan a eje de las abscisas

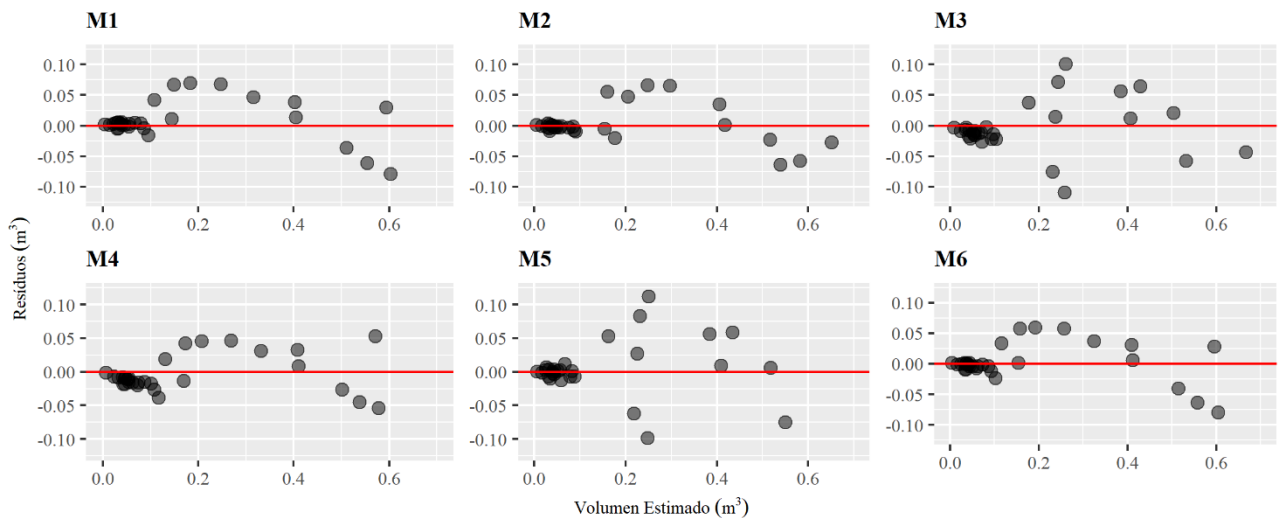


Figura 3. Residuos vs valores estimados de los seis modelos volumétricos utilizados

De acuerdo con las estadísticas calculadas para cada uno de los modelos ajustados, además, teniendo en consideración el análisis gráfico de los valores observados frente a los valores estimados (*Figura 2*), así como la distribución de los residuos frente al volumen estimado (*Figura 3*), se recomienda el uso y aplicación de la (1) puesto que estimó mejor el volumen

$$v = 0,0001468(DAP^2H)^{0,8610} \quad (1)$$
$$R^2 = 0,9777; S_{y.x} = 0,0281; RMSE = 0,0271$$

El presente trabajo es el primero que presenta modelos matemáticos para estimar el volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* en plantaciones forestales de los andes del norte peruano. Su importancia resulta crucial, dado que *Alnus acuminata* es una especie nativa de rápido crecimiento que representa una alternativa real para el desarrollo de proyectos de forestación y reforestación con fines comerciales y protección de las cuencas de los andes (Aulestia-Guerrero et al. 2018).

Los modelos volumétricos son una herramienta fundamental en el manejo forestal (Campos & Leite 2017) y facilitan el conocimiento del crecimiento y desarrollo a nivel de árbol y bosque, permitiendo la toma de decisiones acorde a los requerimientos y necesidades de cada especie. La buena calidad de ajuste de los modelos presentados, indica que es posible estimar el volumen del fuste en árboles de aliso a partir de datos de *dap* y *h* obtenidos a partir de inventarios forestales, tal como se utiliza en la gran

individual de árboles de *Alnus acuminata*, comúnmente conocido como aliso, en las plantaciones de la zona de estudio, pudiendo ser utilizada también como una ecuación de referencia para calcular el volumen de esta especie plantada en otras zonas con características similares de manejo silvicultural.

mayoría de especies con cierto nivel de conocimiento silvicultural como *Guazuma crinita* (Revilla Chávez et al. 2021) o con un conocimiento avanzado de manejo como *Pinus patula* (Villar et al. 2014).

Finalmente, el incremento de áreas de manejo, los avances en el manejo silvicultural de la especie, la mejora genética y nuevos inventarios son necesarios para contar con mayores datos que permitan generar modelos hipsométricos e incluso modelos volumétricos más simples y precisos, así como el uso y aplicación de tecnologías modernas de inventario en plantaciones de *Alnus acuminata* y otras especies manejadas en plantaciones forestales de la región y el país.

CONCLUSIONES

Seis ecuaciones de regresión fueron generadas para estimar el volumen total del fuste de árboles de *Alnus acuminata* Kunth de plantaciones forestales puras

establecidas en una región de los andes del norte de Perú, de las cuales cinco mostraron coeficientes altamente significativos y excelentes estadísticas de bondad de ajuste.

El volumen del fuste de árboles de *Alnus acuminata* se puede estimar satisfactoriamente con la ecuación $v = 0,0,0001468(DAP^2H)^{0,8610}$, por lo que puede ser aplicada en el procesamiento de datos de inventarios forestales, utilizando el diámetro a la altura del pecho (*DAP*) y la altura total (*H*) de los árboles como variables de entrada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Andrade, V. H. F., Machado, S. do A., Figueiredo Filho, A., Botosso, P. C., Miranda, B. P., & Schöngart, J. (2019). Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 438, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030>

Asrat, Z., Eid, T., Gobakken, T., & Negash, M. (2020). Modelling and quantifying tree biometric properties of dry Afromontane forests of south-central Ethiopia. *Trees*, 34(6), 1411–1426. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02012-8>

Aulestia-Guerrero, E., Jiménez, L., Quizhpe-Palacios, J., & Capa-Mora, D. (2018). *Alnus acuminata* kunth: una alternativa de reforestación y fijación de dióxido de carbono. *Bosques Latitud Cero*, 8(2).

<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/495>

Aybar Camacho, C. L., & Lavado-Casimiro, W. (2017). *Atlas de zonas de vida del Perú: guía explicativa. Nota Técnica N° 003 SENAMH-DHI-2017*.

Badilla, Y., Murillo, O., Hidalgo, N., Sánchez, N., Obando, G., & Salazar, R. (2000). Programa de mejoramiento y conservación genética de especies forestales de altura de Costa Rica. *Segundo Simposio Sobre Avances En La Producción de Semillas Forestales En América Latina*, 91–96.

Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C. A., Carneiro, R. L., & Stape, J. L. (2020). Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. *Forest Ecology and Management*, 462, 117953. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2020.117953>

Campos, J. C. C., & Leite, H. G. (2017). *Mensuração florestal: perguntas e respostas. 5ª Edição, atualizada e ampliada. In Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa (5ª Edição). Editora UFV*.

Castro, A., Dávila Arriaga, C., Laura, W., Cubas Saucedo, F., Ávalos, G., López, C., Villena, D., Valdez, M., Urbiola, J., Trebejo, I., Menis, L. & Marin Sanchez, D. E. (2021). Climas del Perú: mapa de clasificación climática nacional. In *Repositorio Institucional - SENAMHI* (Primera Edición). Servicio Nacional de

- Meteorología e Hidrología del Perú.
<http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1336>
- Drew, D. M. (2021). Exploring new frontiers in forecasting forest growth, yield and wood property variation. *Annals of Forest Science*, 78(2), 30.
<https://doi.org/10.1007/s13595-021-01054-3>
- FAO. (2016). *Los bosques y el cambio climático en el Perú*.
- Guariguata, M. R., Arce, J., Ammour, T., & Capella, J. L. (2017). *Las plantaciones forestales en Perú: Reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro*. Center for International Forestry Research (CIFOR).
<https://doi.org/10.17528/cifor/006461>
- Guo, H., Jia, W., Li, D., Sun, Y., Wang, F., & Zhang, X. (2023). Modelling branch growth of Korean pine plantations based on stand conditions and climatic factors. *Forest Ecology and Management*, 546, 121318.
<https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2023.121318>
- Jimenez, Y. G., Grau, H. R., Fernandez, R. D., Ceballos, S. J., Blundo, C., Malizia, A., Carilla, J., Osinaga Acosta, O., & Aráoz, E. (2023). The role of species composition in montane reforested areas to offset carbon emissions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101024.
<https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2023.101024>
- Mendiburu, C., & Cosavalente, I. (2022). Sector forestal: Potencialidades, desafíos e incentivos para su desarrollo. *MONEDA*, 41–45.
- Molina Arias, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? *Pediatría Atención Primaria*, 19, 377–381.
- Olmedo, G. M., Hornink, B., Arenhardt, B. B., Nunes, A. J., de Oliveira, C., Amaral, I. S. do, Santos, M. R. dos, Fontana, C., & Oliveira, J. M. de. (2023). Growth dynamic and climate signals on abandoned plantation of *Pinus elliottii* in Southern Brazil: A dendrochronological contribution. *Dendrochronologia*, 82, 126136.
<https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2023.126136>
- Pinto, C. A. L., Espezúa, R. M. H., & Bermúdez, L. M. L. (2007). Plantaciones forestales, agua y gestión de cuencas. *Debate Agrario*, 42, 79–110.
<https://cepes.org.pe/wp-content/uploads/2019/03/03-llerena.pdf>
- R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. In *R Foundation for Statistical Computing* (4.2.2). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Revilla Chávez, J. M., Abanto-Rodríguez, C., Guerra Arévalo, W. F., García Soria, D., Guerra Arévalo, H., Domínguez Torrejón, G., & da Silva Carmo, I. L. G. (2021). Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en

- plantaciones forestales. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>
- Romero, F. M. B., Jacovine, L. A. G., Torres, C. M. M. E., Ribeiro, S. C., da Rocha, S. J. S. S., Novais, T. de N. O., Gaspar, R. de O., da Silva, L. F., Vidal, E., Leite, H. G., Staudhammer, C. L., & Fearnside, P. M. (2022). Aboveground biomass allometric models for large trees in southwestern Amazonia. *Trees, Forests and People*, 9, 100317. <https://doi.org/10.1016/J.TFP.2022.100317>
- Sabatia, C. O., & Burkhardt, H. E. (2014). Predicting site index of plantation loblolly pine from biophysical variables. *Forest Ecology and Management*, 326, 142–156.
- Sebrala, H., Abich, A., Negash, M., Asrat, Z., & Lojka, B. (2022). Tree allometric equations for estimating biomass and volume of Ethiopian forests and establishing a database: Review. *Trees, Forests and People*, 9, 100314. <https://doi.org/10.1016/J.TFP.2022.100314>
- SERFOR, & INEI. (2021). *Cuenta de Bosques del Perú*. www.gob.pe/serfor
- Sharma, M. (2021). Modelling climate effects on diameter growth of red pine trees in boreal Ontario, Canada. *Trees, Forests and People*, 4, 100064. <https://doi.org/10.1016/J.TFP.2021.100064>
- Tompalski, P., Coops, N. C., White, J. C., Goodbody, T. R. H., Hennigar, C. R., Wulder, M. A., Socha, J., & Woods, M. E. (2021). Estimating Changes in Forest Attributes and Enhancing Growth Projections: a Review of Existing Approaches and Future Directions Using Airborne 3D Point Cloud Data. *Current Forestry Reports*, 7(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00135-w>
- Vidaurre, M., Pacheco, L. F., & Roldán, A. I. (2006). Composition and abundance of birds in Andean alder (*Alnus acuminata*) patches with past and present harvest in Bolivia. *Biological Conservation*, 132(1), 12–21. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2006.03.008>
- Villar, C. M. Á., Marcelo, B. F. E., Baselly, V. J. R., & Villena, V. J. J. (2014). Estimación de volúmenes maderables en plantaciones de *Pinus patulifolia* Schrad. & Cham. en la Cooperativa Atahualpa Jerusalén Granja Porcón en la región Cajamarca. In *Instituto Nacional de Innovación Agraria*. INIA. Estación Experimental Agraria Baños del Inca - Cajamarca. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/inia/912>
- Visscher, A. M., Vanek, S., Meza, K., Wellstein, C., Zerbe, S., Ccanto, R., Olivera, E., Huaraca, J., Scurrah, M., & Fonte, S. J. (2023). Tree-based land uses enhance the provision of ecosystem services in agricultural

Elera-Gonzales, Valdez, Gonzalez y Araújo (2023). Estimación del volumen...

landscapes of the Peruvian highlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342, 108213. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2022.108213>

Yoon, T. K., Park, C. W., Lee, S. J., Ko, S., Kim, K. N., Son, Y., Lee, K. H., Oh, S., Lee, W. K., & Son, Y. (2013).

Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 344–349. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2013.03.006>

Recibido: 15-11-2023 Aceptado: 30-11-2023 Publicado:31-12-2023