

## ARTICULO CIENTÍFICO

## Estimación de la biomasa aérea con el paquete BIOMASS de R: Un estudio de caso en el Bosque Experimental Elías Meneses, Santa Cruz, Bolivia

Juan Edgar Ponce

Instituto de Investigaciones Forestales (INIF), Carrera de Ingeniería Forestal, Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Campus Universitario El Vallecito, Km 8 al Norte, Santa Cruz, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-5750-833X>. Email: [juanponce@uagrm.edu.bo](mailto:juanponce@uagrm.edu.bo)

### RESUMEN

La estimación de la biomasa aérea de los árboles presenta una alta variabilidad espacial y se utilizan diferentes métodos para su determinación, lo cual genera una incertidumbre en la cuantificación del carbono y del dióxido de carbono. El objetivo del trabajo fue aplicar un método automatizado para cuantificar la biomasa aérea con la menor incertidumbre. La toma de datos se realizó en una parcela de 2.25 ha en el Bosque Experimental Elías Meneses (BEEM) que se encuentra dentro la Reserva Forestal El Choré. La metodología utiliza las funciones del paquete BIOMASS del entorno de R para corregir la taxonomía vegetal y, con base en esto, asignar la densidad de la madera desde un repositorio, estimar la altura total por un modelo local (muestra de mediciones de diámetro y altura), por un modelo con base en una región geográfica y con base en las coordenadas geográficas, y la cuantificación de la biomasa aérea por árbol. Los resultados mostraron 19 órdenes, 40 familias y 116 especies forestales y con un 88.3% de individuos correctamente clasificados y una biomasa aérea de 227.91 t/ha, siendo las familias Moraceae, Euphorbiaceae, Annonaceae, Chrysobalanaceae, Phyllanthaceae y Meliaceae las que presentaron las mayores biomásas aéreas; mientras que las especies *Hura crepitans*, *Clarisia racemosa*, *Pseudolmedia laevis*, *Licania oblongifolia*, *Richeria grandis* y *Ficus boliviana* son las de mayor biomasa aérea. Aplicando la simulación de Monte Carlo, el modelo alométrico es el componente que presentó la mayor incertidumbre, mientras que el diámetro tuvo la menor incertidumbre. En este trabajo se concluye que las funciones del paquete BIOMASS de R permiten automatizar la estimación de la biomasa aérea de los bosques tropicales minimizando los errores y aumentando la precisión.

**Palabras clave:** biomasa aérea, Bosque Experimental Elías Meneses, BIOMASS, Modelo local, Propagación de errores

Estimation of aboveground biomass using the BIOMASS package in R: A case study in the Elías Meneses Experimental Forest, Santa Cruz, Bolivia

### ABSTRACT

Estimating aboveground biomass in trees demonstrates significant spatial variability, and various methods are employed for its assessment, leading to uncertainty in the quantification of carbon and carbon dioxide. This study aims to implement an automated approach to quantify aboveground biomass with minimal uncertainty. Data collection was conducted in a 2.25 ha plot within the Elías Meneses Experimental Forest (BEEM), situated in the El Chore Forest Reserve. The methodology utilizes the functions of the BIOMASS package in the R environment to rectify plant taxonomy and subsequently

assign wood density from a database, estimate total height using a local model (derived from a sample of diameter and height measurements), a model based on geographic region, and a model based on coordinates, thereby quantifying aboveground biomass per tree. The findings revealed 19 orders, 40 families, and 116 forest species, with 88.3% of individuals accurately classified and an aboveground biomass of 227.91 t/ha. The families Moraceae, Euphorbiaceae, Annonaceae, Chrysobalanaceae, Phyllanthaceae, and Meliaceae displayed the highest aboveground biomass, while the species *Hura crepitans*, *Clarisia racemosa*, *Pseudolmedia laevis*, *Licania oblongifolia*, *Richeria grandis*, and *Ficus boliviana* exhibited the greatest aboveground biomass. Through Monte Carlo simulation, the allometric model revealed the highest uncertainty, whereas the diameter presented the least uncertainty. This research concludes that the functions of the BIOMASS package in R facilitate the automated estimation of aboveground biomass in tropical forests, thereby reducing errors and enhancing accuracy.

**Keywords:** aboveground biomass, BIOMASS, Elías Meneses Experimental Forest, local model, Error propagation

## INTRODUCCIÓN

La cuantificación precisa de la biomasa de los árboles en un área forestal es importante para comprender el ciclo global del carbono y apoyar estrategias de conservación y manejo forestal sostenible. El paquete BIOMASS de R ha surgido como una herramienta para estandarizar y mejorar la estimación de la biomasa aérea, teniendo en cuenta la valoración de la incertidumbre y el uso de datos alométricos regionales (Réjou-Méchain *et al.* 2017). La Amazonia almacena grandes cantidades de carbono, con una alta variabilidad espacial y métodos utilizados en las estimaciones de biomasa, lo cual genera una incertidumbre en los balances de carbono y en la evaluación de emisiones por deforestación y quemadas (Saatchi *et al.* 2007). Los árboles con dimensiones mayores concentran la mayor parte de la biomasa, por lo tanto, es importante efectuar una medición correcta (Benítez-Romero *et al.* 2022).

La estimación de la biomasa aérea está basada en ecuaciones alométricas que relacionan el diámetro, la altura total y la densidad de la madera (Nogueira *et al.* 2012). La utilización de modelos locales de altura-diámetro permite una mayor precisión de las estimaciones en comparación con los modelos regionales o pantropicales, especialmente en bosques con diferentes tipos ecológicos (Fareed y Numata 2025). Asimismo, la utilización de la densidad de la madera y una precisa identificación taxonómica son factores importantes para reducir los errores (Fearnside 1997).

El avance de sensores remotos, como LiDAR, imágenes hiperespectrales y radar de apertura sintética (SAR), junto con algoritmos de aprendizaje automático, ha mejorado la capacidad de estimar la biomasa a escalas espaciales mayores y con mayor precisión (Lu *et al.* 2016, Madhab y Dev, 2018, Jilo *et al.* 2025). La integración de datos de campo y los obtenidos de los sensores remotos, así como la inclusión de variables ambientales (topografía, suelo, clima), incrementa la robustez de los modelos y permite generar mapas que incluyan toda la variabilidad espacial de la biomasa (Su *et al.* 2025, Ayushi *et al.* 2024, Chen *et al.* 2025)

El paquete BIOMASS del entorno R automatiza la corrección de la identificación de especies corrigiendo a diferentes niveles: orden, familia, género y especie. Asimismo, estimada la densidad de la madera, ajusta diferentes modelos locales de altura-diámetro y propaga la incertidumbre en cada paso de los cálculos, promoviendo la transparencia y la reproducibilidad (Réjou-Méchain *et al.* 2017). En adición, es posible la integración de datos de sensores remotos (LIDAR, GEDI) y las técnicas de aprendizaje

automático que permiten escalar las estimaciones a grandes extensiones y mejorar la representación de la heterogeneidad estructural del bosque (Fareed *et al.* 2025).

En la estimación de la biomasa de los árboles, la cuantificación de la incertidumbre asociada a la inferencia estadística es importante, ya que se tienen varias fuentes de errores como: errores en la medición de las variables, la selección de ecuaciones alométricas y el tamaño de las unidades de muestreo. Por lo tanto, se recomienda enfocar el muestreo en árboles grandes y utilizar parcelas de mayor tamaño para capturar la mayor variabilidad (Brown *et al.* 1995). El paquete BIOMASS de R cuantifica la propagación de errores y la incertidumbre en las estimaciones, las mismas que son esenciales para la robustez estadística (da Costa *et al.* 2025).

Las estimaciones precisas de biomasa son fundamentales para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, proyectos REDD+ y la planificación de la conservación de la vegetación arbórea (Rodríguez y Freitas, 2025). Por otro lado, la generación de mapas de biomasa con imágenes de alta resolución apoya en la toma de decisiones y en la evaluación de impactos de degradación, deforestación e incendios forestales (Saatchi *et al.* 2007). En el Cuadro 1, se presentan los principales hallazgos y aportes para la estimación de la biomasa aérea de los árboles.

**Cuadro 1.** Principales enfoques en la estimación de la biomasa aérea de árboles

Tema	Principales hallazgos y aportes	Citas bibliográficas
Estandarización y BIOMASS	Herramienta robusta para la estimación de la biomasa aérea y la cuantificación de la incertidumbre en bosques tropicales	Réjou-Méchain <i>et al.</i> 2017
Modelos alométricos locales	Mejoran la precisión en comparación con los modelos genéricos	Bojórquez <i>et al.</i> 2020, Amanuel <i>et al.</i> 2024, Jilo <i>et al.</i> 2025
Integración de sensores remotos	Aumentan la exactitud y cobertura espacial de las estimaciones	Lu <i>et al.</i> 2016, Ghosh y Behera 2018, Chave <i>et al.</i> 2014, Marchesan <i>et al.</i> 2019

La aplicación de modelos y herramientas como BIOMASS debe considerar las particularidades ecológicas y florísticas del área de estudio, como en el Bosque Experimental Elías Meneses en Santa Cruz, Bolivia, para asegurar la validez de las estimaciones. El desarrollo de modelos ajustados localmente y la evaluación rigurosa de la incertidumbre son pasos clave para obtener resultados confiables y útiles para la gestión forestal y la investigación científica (Bojórquez *et al.* 2020, Amanuel *et al.* 2024).

La biomasa aérea de los bosques en Bolivia se estima aproximadamente en 9,77 gigatoneladas (Gt) y el 90,1% (8,8 Gt) se concentra en los departamentos de Santa Cruz, Beni, Pando y La Paz; de los cuales 3,51 Gt están en Santa Cruz y 2,58 Gt en el Beni; con densidades entre 200 - 300 t ha<sup>-1</sup> (Villarroel *et al.* 2022). En los bosques tropicales húmedos la cantidad de biomasa almacenada puede llegar hasta 500 t ha<sup>-1</sup> y en los bosques secundarios puede ser menor que 100 t ha<sup>-1</sup> (Mostacedo *et al.*, 2008). En cambio, en un área del bosque seco chiquitano se estimó una biomasa de 213 t ha<sup>-1</sup> en el bosque hidrofítico y 209 t ha<sup>-1</sup> en el bosque semideciduo (Paz-Roca y Mostacedo, 2020).

Pereira *et al.* (2025), señalan que en el caso de un modelo altura-diámetro para un área del bosque amazónico del Brasil, los modelos asintóticos y en especial el cuadrático son los que tienen un mejor ajuste y una mayor precisión que los modelos de Feldpausch *et al.* (2012) y Chave *et al.* (2014). Por otro

lado, un modelo de regresión con un coeficiente que representa a una altura asintótica (altura máxima de un árbol) fue el que mejor se ajustó para estimar la altura total a partir del diámetro, generando diferencias significativas con otras regiones de la Amazonia (Nogueira *et al.* 2012).

La incertidumbre en la estimación de la biomasa aérea está relacionada con la copa de los árboles y en el bosque amazónico de Brasil fue estimada en base del volumen del fuste, la densidad de la madera y un factor de expansión de la biomasa y los mejores modelos alométricos utilizaron el diámetro del árbol al cuadrado, la altura del árbol y la densidad de la madera que permitieron reducir los errores en la estimación de la biomasa aérea (Benítez-Romero *et al.* 2022). El error de las mediciones de la biomasa en la Amazonía del Brasil fue de  $\pm 20\%$ ,  $\pm 57 \text{ Mt ha}^{-1}$  con relación a la media y con un intervalo de confianza del 95%. El promedio de biomasa aérea global varió de 228 a 342  $\text{Mt ha}^{-1}$  calculado por una simulación de Montecarlo (Brown *et al.* 1995).

Por lo expuesto, el presente trabajo tiene el objetivo de comprobar la eficiencia del paquete BIOMASS de R en la estimación de la biomasa aérea de los árboles de un área del Bosque Experimental Elías Meneses; esto significa automatizar procesos para la corrección de nombres científicos, la asignación de densidades de madera promedio, la selección de ecuaciones alométricas locales, la estimación de alturas en base a la localización y la cuantificación de la incertidumbre en las estimaciones.

## MÉTODOS

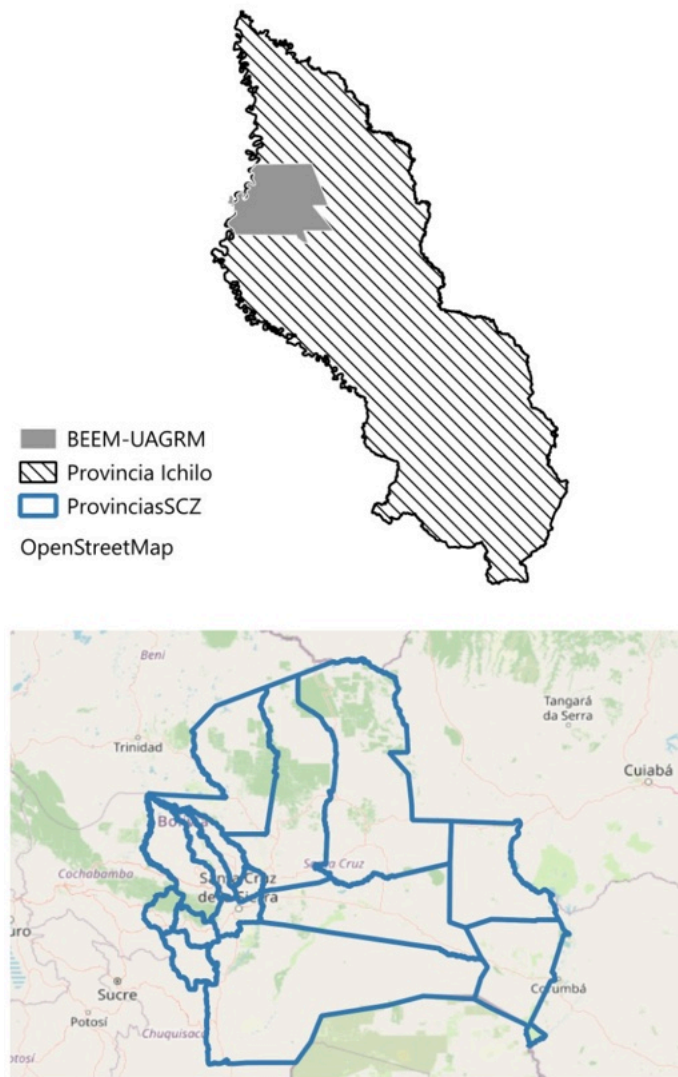
### Área de estudio

El Bosque Experimental Elías Meneses (BEEM) está localizado en el Municipio de Yapacaní, dentro de la Provincia Ichilo del Departamento de Santa Cruz a unos 209 km al noroeste de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra ( $16^{\circ}38' \text{ S}$ ,  $64^{\circ}30' \text{ O}$ ), con elevaciones que oscilan entre 170 y 200 m (Acosta y Aguanta, 2006). Esta área se encuentra dentro de la Reserva Forestal El Choré y fue concedida a la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM) en 1988 para desarrollar trabajos de investigación. La Reserva Forestal El Chore está disminuyendo su cobertura forestal como consecuencia de la deforestación y en beneficio de la agricultura y de áreas antrópicas (Pinto 2006).

Datos de la estación meteorológica de San Juan de Yapacaní, reportan una precipitación media anual de 1000 - 2000 mm, con una temperatura promedio de  $24^{\circ}\text{C}$ , con una época lluviosa bien marcada de noviembre a abril y una época seca de junio a octubre (Farel, 2006). El Bosque Experimental Elías Meneses (BEEM) cubre una superficie de 112043 ha y, geográficamente, se ubica entre las coordenadas  $64^{\circ} 45'$  y  $64^{\circ} 25'$  de longitud oeste y  $16^{\circ} 40'$  y  $16^{\circ} 25'$  de latitud sur.

### Toma y análisis de datos

La toma de datos se realizó en las parcelas permanentes de muestreo implementadas por la UAGRM en el Bosque Experimental Elías Meneses (BEEM). Para una correcta identificación de las especies forestales, muestras botánicas fueron recolectadas por especialistas del Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado (MHNNKM). De hecho, estas muestras se encuentran debidamente procesadas en el Herbario



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio en el Bosque Experimental Elías Meneses (BEEM)

Regional (USZ) del Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado, para su consulta. Por otro lado, a partir de una muestra de árboles se han obtenido datos de diámetro y altura para generar un modelo local para la estimación de la altura.

El paquete BIOMASS de R es una herramienta especializada para estimar la biomasa aérea (AGB) y su incertidumbre en bosques tropicales. Tiene varias funciones para la corrección taxonómica de las especies, la estimación de la densidad de la madera (WD), la construcción de modelos de altura-diámetro (HD) y la incertidumbre asociada. Además de manejar datos biológicos, el paquete tiene funciones para la gestión y corrección de coordenadas de árboles y parcelas, como la interpolación de coordenadas y el manejo de datos del GPS. La función principal es AGBmonteCarlo, que permite conocer la propagación de errores para calcular la biomasa aérea a nivel de parcela. En resumen, permite procesar datos de inventario forestal, asignar valores de la densidad de la madera y de la altura y finalmente calcular la biomasa aérea con un análisis robusto de la incertidumbre (Réjou-Méchain *et al.* 2017), tal como se muestra en la Figura 2.

En realidad, BIOMASS agiliza el procedimiento del cálculo de la biomasa aérea. En el caso de la medición del diámetro del árbol, es la variable de entrada, aunque las mediciones del diámetro presentan errores por diversas causas y es necesaria una verificación cuidadosa para corregir algunos errores obvios. En el caso de la densidad de la madera, esto es, el peso seco en horno dividido por el volumen verde de madera presenta una alta variación entre las especies de árboles (Chave *et al.* 2009) y, en realidad, esta característica no se mide para arboles individuales en los inventarios forestales y con BIOMASS se asigna un valor de la densidad a cada árbol a partir de una base de datos de la densidad de la madera global (GWD) y basado en la identidad taxonómica. De hecho, la función *getWoodDensity* asigna este valor a cada uno de los árboles; asimismo, se pueden agregar valores adicionales de la densidad de la madera utilizando la función *addWoodDensityData* (Réjou Méchain *et al.* 2017). Las características de estas funciones se presentan en el Cuadro 2.

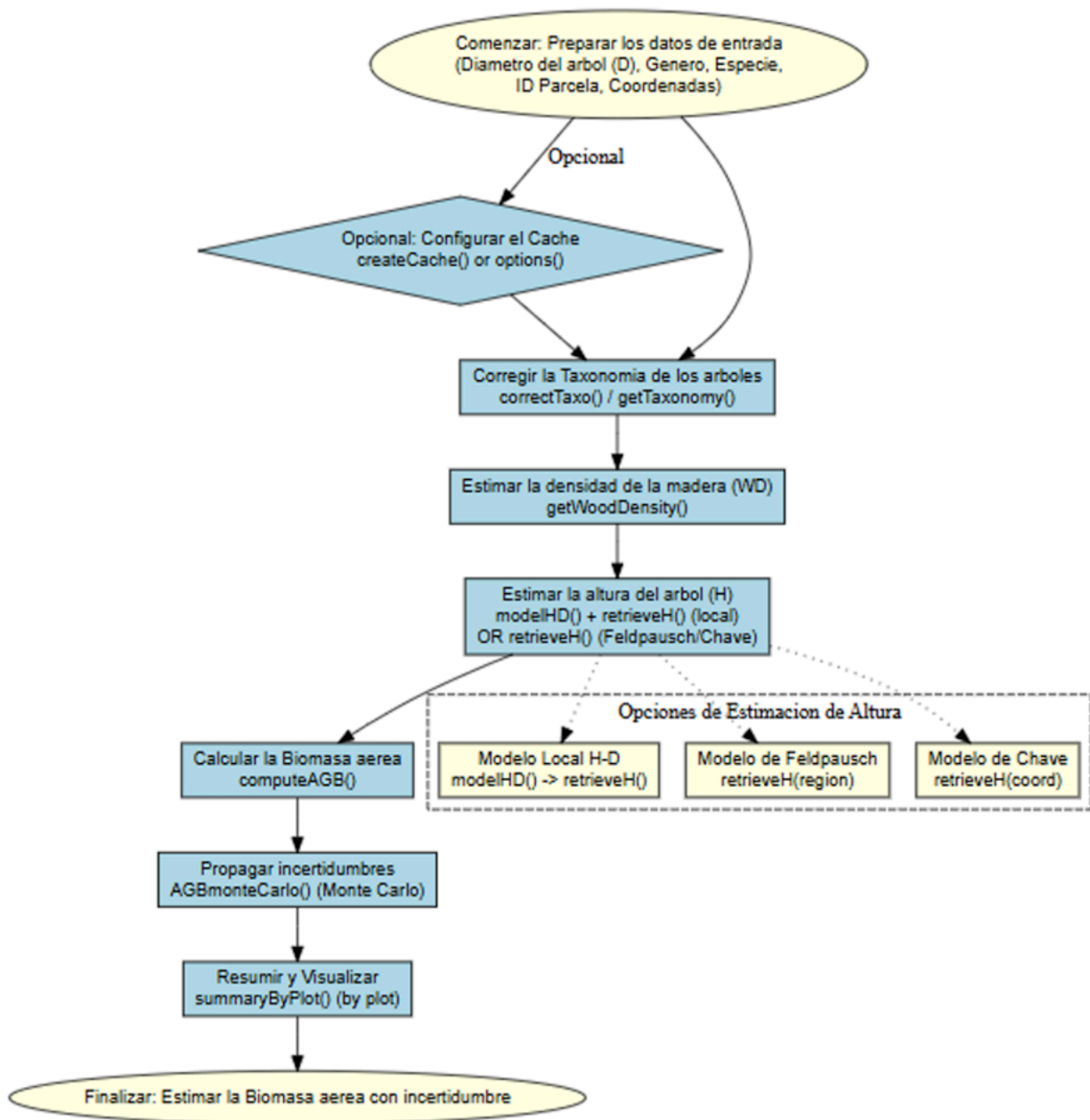


Figura 2. Diagrama de flujo de la librería BIOMASS

**Cuadro 2.** Funciones de BIOMASS para corrección taxonómica y asignación de la densidad de la madera.

N	Función	Propósito
1	correctTaxo	Corrige errores tipográficos en los nombres científicos de los árboles para asegurar que las especies estén correctamente identificadas y se pueda asignar la densidad de madera adecuada. Para esto se utiliza la base de datos global en línea del Servicio de Resolución de Nombres Taxonómicos (TNRS).
2	getWoodDensity	Encuentra la densidad de la madera para cada árbol basándose en su especie, género o familia. Para asignar este valor se utiliza una gran base de datos global con los nombres estandarizados (Chave <i>et al.</i> 2009 y Zanne <i>et al.</i> 2009)

Los modelos utilizados por la librería BIOMASS para este ajuste son lineales y no lineales. Se tienen dos modelos logarítmicos, uno lineal y otro no lineal, y los modelos de Weibull y de Michaelis; la función modelHD permite estimar los parámetros de los modelos y conocer el grado de ajuste de cada uno de ellos (Réjou-Mechain *et al.* 2017). Los métodos utilizados para el ajuste de la altura en función del diámetro (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Modelos lineales y no lineales para estimar la altura en base de la medición del diámetro

N	Modelo	Ecuación	Fuente
1	log1	$\log(H) = a + b * \log(D)$	Baskerville (1972)
2	log2	$\log(H) = a + b * \log(D) + c * \log(D)^2$	Baskerville (1972)
3	Weibull	$H = a * (1 - \exp(- (D/b)^c))$	Weibull (1951)
4	Michaelis	$H = (A * D)/(B + D)$	Michaelis-Menten (1913)

La estimación de la biomasa aérea se efectuó utilizando modelos pantropicales. La función computeAGB tiene dos métodos para calcular la biomasa aérea, dependiendo de si se tienen datos de altura o no. Si se dispone de datos de altura se calcula utilizando la ecuación 4 del estudio de Chave *et al.* (2014), con la siguiente ecuación:

$$AGB = 0,0673 * (WD * H * D^2)^{0,976}$$

Donde:

AGB es la biomasa aérea en Mg o toneladas

WD es la densidad de madera en g/cm<sup>3</sup>

H es la altura del árbol en m

D es el diámetro del árbol en cm

En el caso de que no se disponga de las alturas, la estimación de la biomasa aérea se calcula utilizando las coordenadas del sitio para incorporar una variación de la relación altura-diámetro a través de una variable ambiental y la ecuación a utilizar es la siguiente:

$$AGB = \exp(-2,024 - 0,896 * E + 0,920 * \log(WD) + 2,795 * \log(D) - 0,0461 * (\log(D)^2))$$

Donde:

E es una medida del estrés ambiental que se estima a partir de las coordenadas del sitio

WD es la densidad de la madera en g/cm<sup>3</sup>

D es el diámetro del árbol en cm

Para evaluar la incertidumbre en la estimación de la biomasa aérea se utilizó el enfoque de simulación de MonteCarlo a través de la función AGBmonteCarlo de BIOMASS. Este método permite la propagación de los errores a través de los pasos necesarios para calcular la biomasa aérea. a) densidad de la madera, se incorporó la desviación estándar asociada a las estimaciones, la cual se obtiene a través de la función getWoodDensity, b) altura de los árboles, se utilizó el error estándar residual de los modelos de altura-diámetro, c) diámetro del árbol, se puede especificar un valor de desviación único o utilizar el método "chave2004", que aplica un error mayor al 5% de las mediciones y uno menor al 95% restante, en este trabajo se utilizó el método "chave2004", d) modelo alométrico, para propagar los errores atribuidos a esta fuente se ha utilizado la altura del modelo local (Réjou-Méchain *et al.* 2017).

La función de propagación de errores de BIOMASS genera una distribución posterior de la biomasa aérea calculando: a) la media, mediana y desviación estándar de la biomasa aérea, b) intervalos de credibilidad al 95%, y c) una matriz de simulaciones que contiene los resultados de cada iteración (1000 iteraciones). En este proceso se considera cada componente del modelo como determinista (usando solo el valor medio de sus parámetros) uno a la vez (Molto *et al.* 2013).

## RESULTADOS

### Taxonomía de especies forestales

La verificación de la taxonomía de las especies forestales en las parcelas de estudio se realizó utilizando la función *correctTaxo* de la librería de BIOMASS. Esta corrección es vital ya que la asignación de la densidad de la madera en g/cm<sup>3</sup> está en función de las categorías de género y especie. Se tiene que el 88,34% de los árboles no tenían errores tipográficos, en un 9,5% no fueron encontradas las especies debido a que se identificó solamente hasta el nivel de género. Asimismo, solo el 2,2% de los árboles fueron corregidos hasta el nivel de especie. Esto significa que un alto porcentaje de los árboles (88,34%) no presentaron errores tipográficos (Figura 3).



**Figura 3.** Corrección taxonómica de especies forestales

Con base en el género y la especie corregidos, se recuperó la taxonomía a nivel de orden y familia de acuerdo con el sistema de clasificación de las angiospermas y según criterios filogenéticos (APG III). De las 19 categorías de orden encontradas, el 27,7% de los árboles corresponden al orden de los Malpighiales, el 27,5% al orden de los Rosales, el 16,3% al orden de los Magnoliales y el 10% al orden de los Arecales, siendo los principales órdenes. El orden Malpighiales agrupa a 8 familias y siendo las más importantes Dichapetalaceae y Violaceae; mientras que el orden Rosales agrupa a 4 familias y siendo la más importante Moraceae; en el caso del orden Magnoliales agrupa a 2 familias, siendo las Annonaceae la más importante.

En el caso de las familias, se tienen 40 categorías, siendo la familia Moraceae la que tiene más árboles y representa el 25,4% y agrupa a géneros importantes como *Pseudolmedia*, *Poulsenia* y *Clarisia*. Seguido de la familia Annonaceae que representa el 15,8% con géneros importantes como *Duguetia* y *Unonopsis*. Luego se encuentra la familia Arecaceae con el 10% de los individuos y con el género *Astrocaryum* como el más importante. La familia Violaceae representa el 9,7% de los árboles con el género *Leonia* (Figura 4).

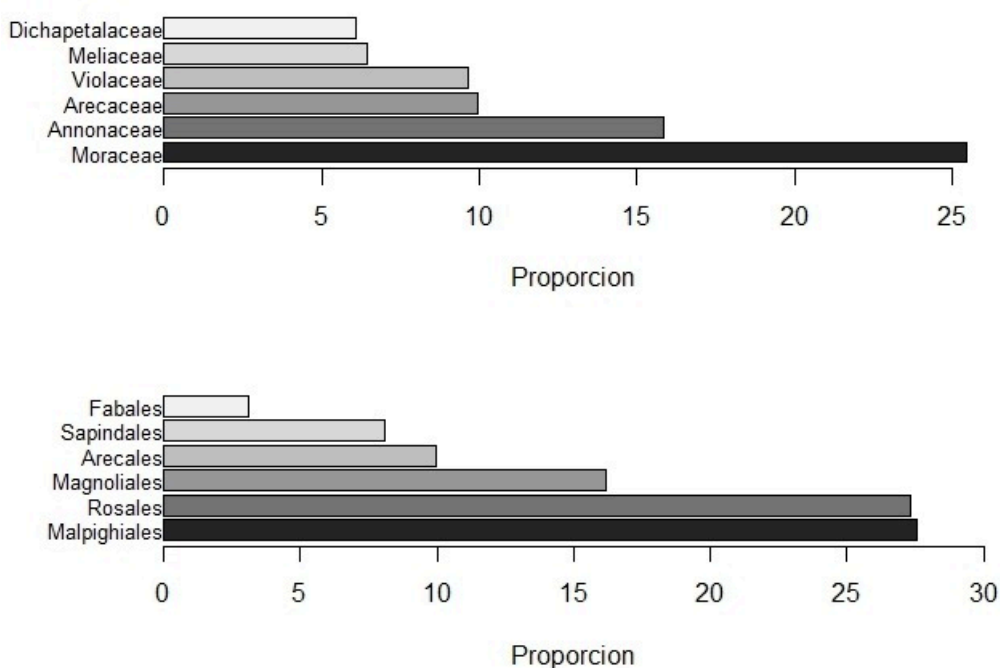
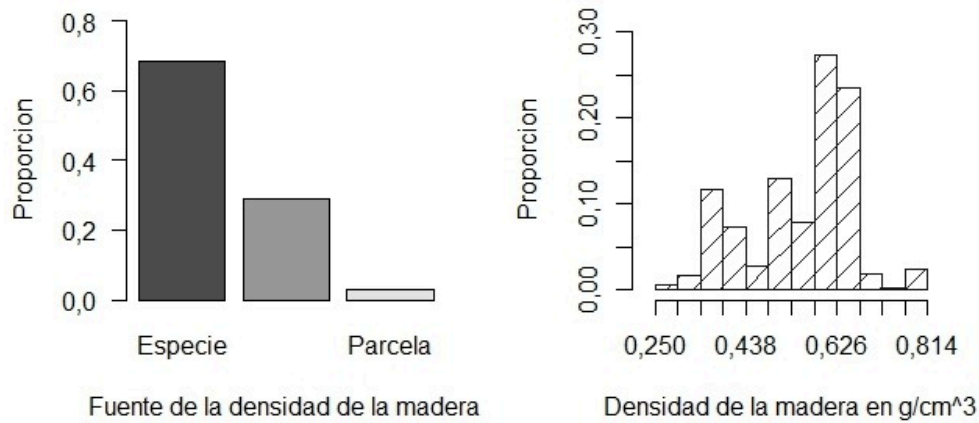


Figura 4. Presencia de árboles a nivel de orden y familia

### Determinación de la densidad de madera

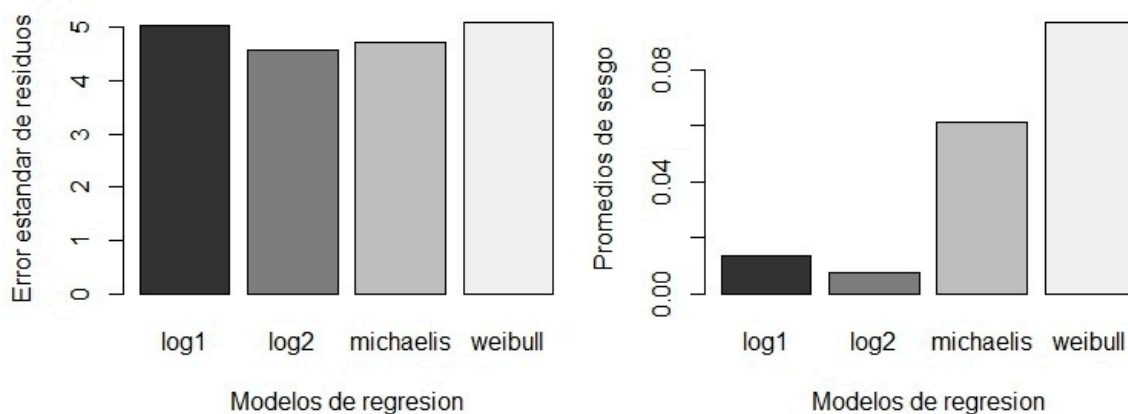
La densidad de la madera en g/cm<sup>3</sup> se obtuvo con base en la especie y en promedios por género y parcela. Un 68,4% de los datos de densidad se obtuvieron con base en la clasificación botánica hasta el nivel de especie, un 28,8% como promedio de la densidad por género y un 2,8% como un promedio de la parcela. Asimismo, el 27,37% de los árboles presentaron densidades de madera entre 0,579 y 0,626 g/cm<sup>3</sup>, y un 23,44% con densidades de madera entre 0,626 y 0,673 g/cm<sup>3</sup> (Figura 5).



**Figura 5.** Fuente de la densidad de la madera y su distribución

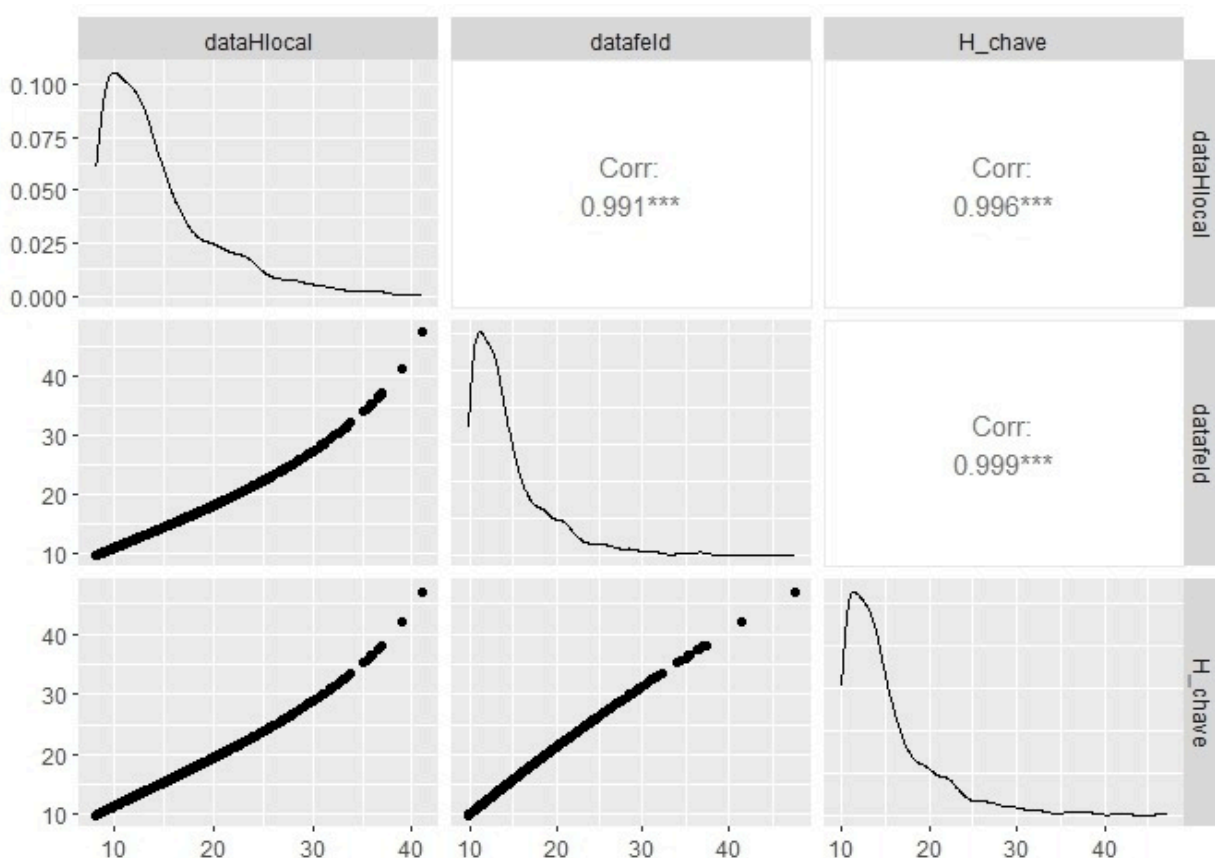
**Estimación de la altura de árboles**

Una muestra de las parcelas permanentes del BEEM de 632 árboles con mediciones de diámetro, altura total y altura de fuste se utilizó para generar un modelo local que permita estimar la altura en función del diámetro. La altura total de los árboles presentó un promedio de 20,2 m, una mediana de 19,5 m y con valores que varían entre 11,7 m a 27,8 m. Estos datos han sido ajustados para generar un modelo local de H-D aplicando modelos lineales y no lineales. Las métricas utilizadas para evaluar los cuatro modelos de relación altura-diámetro (H-D) mostraron que el modelo log2 (polinomial de segundo orden) presento el menor error estándar residual (RSE) con un valor de 4,56 y el menor sesgo promedio (Average\_bias) con un valor de 0,0076 (Figura 6).



**Figura 6.** Métricas para evaluar la precisión de los modelos lineales y no lineales

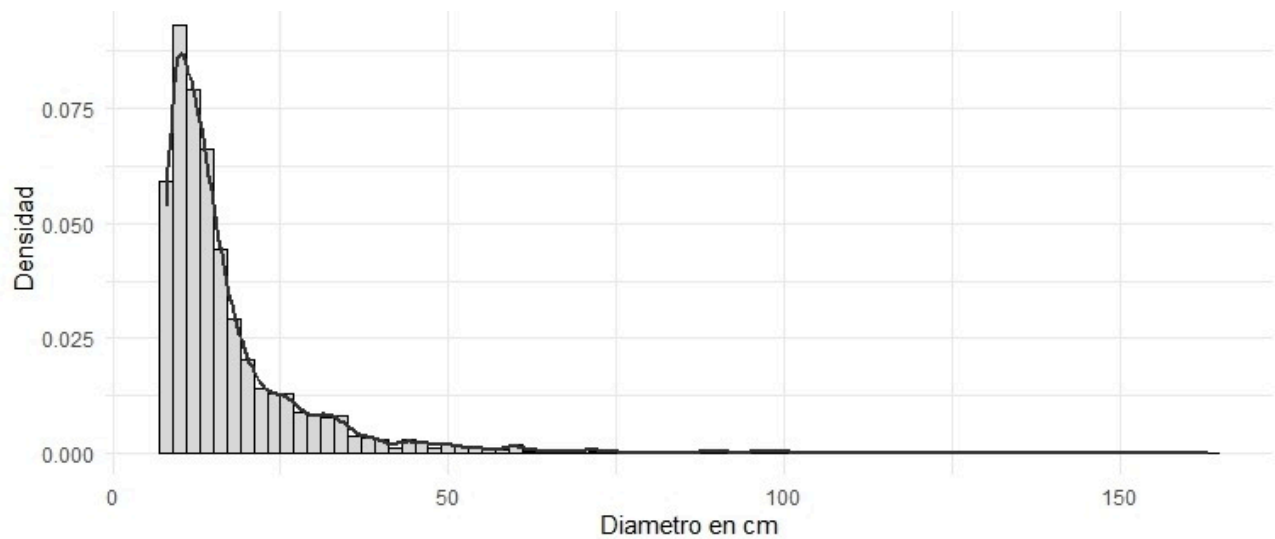
Se han recuperado las alturas de los árboles de tres fuentes: a) modelo local, b) modelo de Feldpausch y c) modelo de Chave. En el primer caso, se ha recuperado la altura de los árboles que han sido estimados por el mejor modelo local (log2) utilizando la función retrieveH de BIOMASS. Por otro lado, se han recuperado las estimaciones de la altura por el modelo de Feldpausch con base de una región geográfica que en este caso fue Brazilian Shield (región del escudo brasileño). Finalmente, se han obtenido las estimaciones de la altura por el método de Chave, el mismo que se basa en el promedio de coordenadas geográficas decimales de la localización de las parcelas (Long: -64,50782 y Lat: -16,63848). Comparando la estimación de la altura de los árboles por los tres modelos, se obtuvieron altos grados de asociación entre ellos. Las alturas presentan curvas de distribución asimétricas a la derecha, debido a que las mayores frecuencias se encuentran concentradas en los valores más bajos de altura. Por otro lado, los modelos presentaron un alto grado de asociación, ya que entre el modelo local y el modelo de Feldpausch se tiene un 0,991 (99,1% de asociación); entre el modelo local y el modelo de Chave un 0,996 (99,6% de asociación) y finalmente, entre el modelo de Feldpausch y el modelo de Chave un 0,999 (99,9% de asociación). Esto corrobora la validez del uso de modelos diferentes al modelo local para estimar la altura de los árboles (Figura 7).



**Figura 7.** Correlación entre diferentes fuentes de estimación de la altura de árboles

### Diámetro de árboles

La distribución del diámetro de los árboles presenta una curva con asimetría a la derecha, ya que las mayores proporciones se encuentran en las categorías de diámetro más bajas. El 77,9% de los árboles presentan diámetros menores o iguales a 21 cm; mientras que un 91,9% presentan diámetros menores o iguales a 34 cm. Esto significa que solo un 8,1% presenta diámetros superiores a 34 cm (Figura 8).



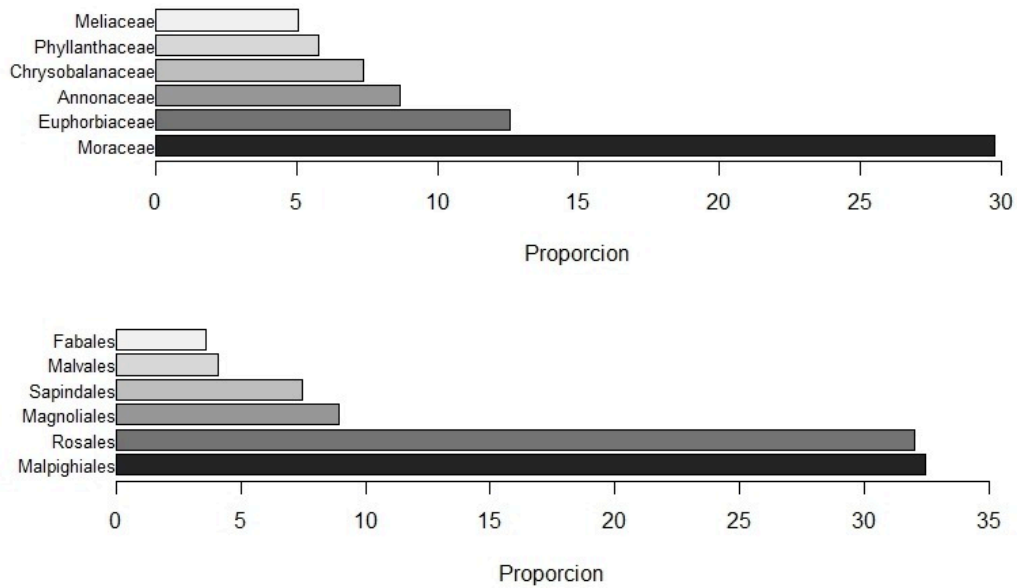
**Figura 8.** Distribución del diámetro de los árboles

### Estimación de la biomasa aérea

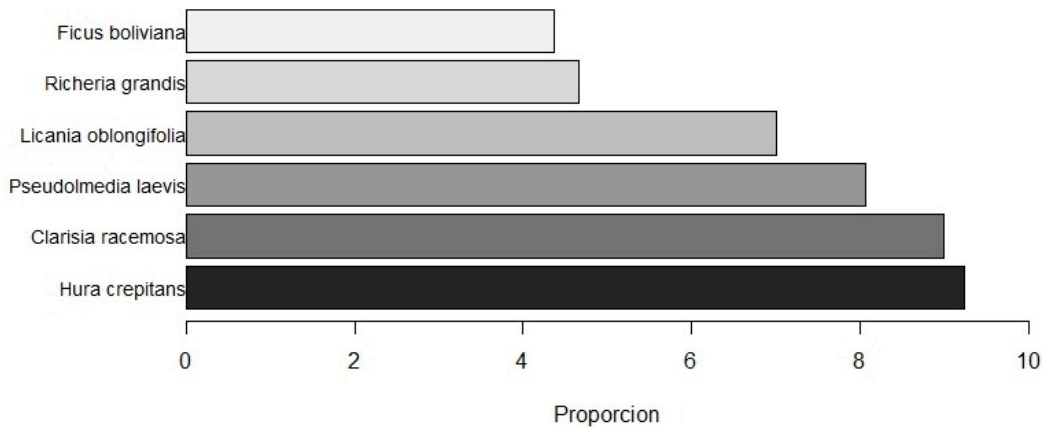
Las variables que se utilizaron para calcular la biomasa aérea presentan relaciones en cuanto a sus distribuciones, ya que los histogramas del diámetro, la altura del modelo local (dataHlocal), la altura del modelo de Feldpausch, y la altura del modelo de chave tienen asimetrías a la derecha, las mismas que tienen relación con la estimación de la biomasa de los árboles que presenta una concentración en los valores bajos. Asimismo, se observó una alta relación entre la biomasa aérea y las variables de entrada, con presencia de algunos valores atípicos, ya que se tienen muy pocos árboles en las clases diamétricas superiores.

La biomasa aérea total presenta 227,91 t/ha con una media, por árbol, de 0,138 t/ha y variando desde 0,0048 hasta 9,72 t/ha, distribuida en el caso de los órdenes botánicos en Malpighiales con un 32,4% de la biomasa aérea total, Rosales (32,0%), Magnoliales (8,9%), Sapindales (7,5%), Malvales (4,1%), Fabales (3,6%) siendo los 6 principales órdenes. En el caso de las familias botánicas, se tiene a las Moraceae con 29,8% de la biomasa aérea total, seguidas de Euphorbiaceae con 12,6%, Annonaceae con 8,7%, Chrysobalanaceae con 7,4%, Phyllanthaceae con 5,8%, Meliaceae con 5,1%, representando las 6 principales familias con biomasa aérea (Figura 9).

En la parcela han sido identificadas 116 especies forestales y de estas 6 especies presentan las mayores proporciones de biomasa aérea total de 227,91 t/ha, alcanzando 96,45 t/ha que representa el 42,31%. Estas especies son: el Ochoó (*Hura crepitans*) con 21,06 t/ha (9,2%), Isirí (*Clarisia racemosa*) con 20,5 t/ha (8,9%), Ojoso colorado (*Pseudolmedia laevis*) con 18,39 t/ha (8,1%), Mondadiente (*Licania oblongifolia*) con 15,95 t/ha (6,9%), Coquino colorado (*Richeria grandis*) con 10,6 t/ha (4,6%), Bibosi colorado (*Ficus boliviana*) con 9,94 t/ha (4,4%), tal como se muestra en la Figura 10.

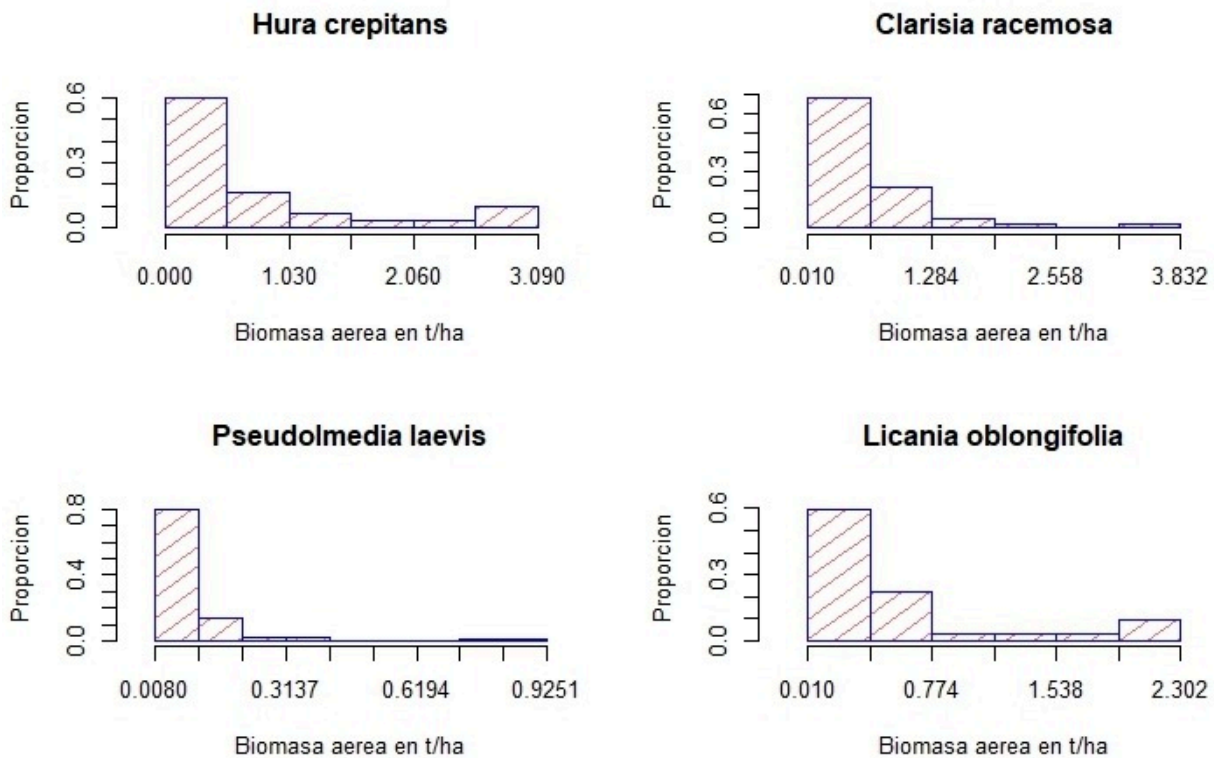


**Figura 9.** Biomasa aérea distribuidos por orden y familia botánica



**Figura 10.** Principales especies con biomasa aérea en t/ha

La especie *Hura crepitans* presenta una distribución donde el 60% de la biomasa aérea presenta valores menores o iguales a 0,515 t/ha y un 76,7% con valores menores o iguales a 1,03 t/ha, considerando que el máximo de biomasa es de 3,09 t/ha; de manera similar la especie *Clarisia racemosa* tiene un 68,4% valores de biomasa menores o iguales a 0,647 t/ha y un 89,5% con valores menores o iguales a 1,284 t/ha y un máximo de biomasa de 3,832 t/ha. En el caso de la especie *Pseudolmedia laevis*, un 79,8% son valores de biomasa menores o iguales a 0,1099 t/ha y un 93,1% son valores menores o iguales a 0,2118 t/ha, con un valor máximo de 0,9251 t/ha. Finalmente, la especie *Licania oblongifolia* presenta un 59,4% de los valores de biomasa menores o iguales a 0,392 t/ha y un 81,2% con valores menores o iguales a 0,774 t/ha y un máximo de biomasa de 2,302 t/ha (Figura 11).

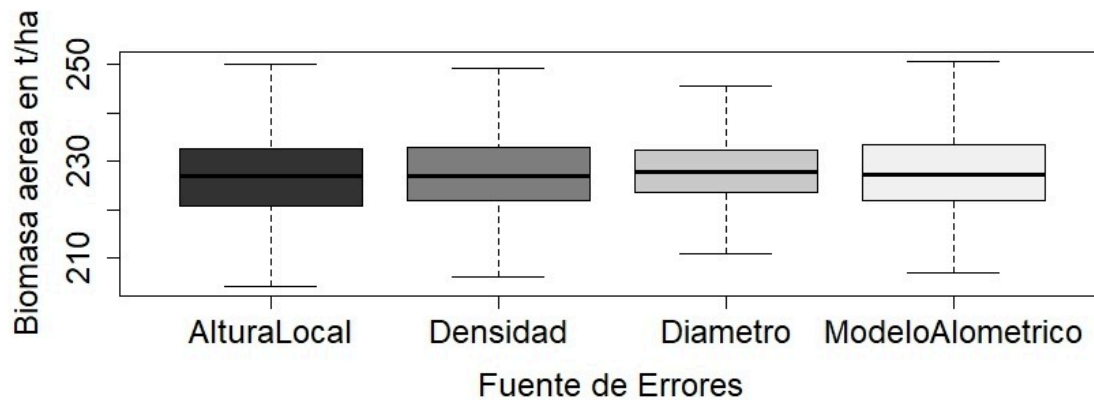


**Figura 11.** Distribución de la biomasa aérea en especies forestales

### Propagación de errores

La biomasa aérea total y su incertidumbre asociada se estimaron mediante la propagación de errores a través de 1000 simulaciones de Monte Carlo. Los errores incorporados incluyeron la incertidumbre en la densidad de la madera, el error estándar residual de los modelos de altura-diámetro, el error de las mediciones de diámetro y los errores atribuidos al modelo alométrico.

El análisis de la incertidumbre reveló que los mayores rangos intercuartílicos corresponden al modelo alométrico y a las mediciones de altura con valores de 36,42 t/ha y 35,66 t/ha y con desviaciones estándar de 9,33 t/ha y 9,28 t/ha. Asimismo, los intervalos de confianza al 95% para el componente modelo alométrico fueron de 210,82 a 247,24 t/ha y para la altura de 211,09 a 246,75 t/ha. En contraste, los menores rangos intercuartílicos corresponden a las mediciones de densidad de la madera y del diámetro con valores de 32,62 t/ha y 27,14 t/ha y con desviaciones estándar de 8,25 t/ha y 7,03 t/ha. En adición, los intervalos de confianza al 95% para la densidad de la madera fueron de 213,38 a 246,01 t/ha y para el diámetro de 215,39 a 242,53 t/ha. Por lo tanto, la mayor incertidumbre se atribuye al modelo alométrico seguido de la altura, luego la densidad de la madera y finalmente la medición del diámetro con la menor incertidumbre (Figura 12).



**Figura 12.** Propagación de errores en la estimación de la biomasa aérea

## DISCUSIÓN

### Taxonomía de especies forestales

La aplicación de las funciones de BIOMASS para corregir la base de datos, reportó que un 88,34% estaban correctos hasta el nivel de especie y solo un 2,2% eran incorrectos y fueron corregidos. Esto significa que se tienen registros verdaderos y el número de especies es el real y se pueden tomar decisiones correctas (Boyle *et al.* 2013). Este alto porcentaje de árboles correctamente clasificados se atribuye a la toma de muestras botánicas y posterior identificación por expertos del Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado (MHNNKM).

La corrección de la taxonomía de las plantas fue posible utilizando la información disponible en la web. Es el caso del Servicio de Resolución de Nombres Taxonómicos (SRNT) que estandariza los nombres científicos de las plantas analizando y corrigiendo nombres científicos con errores ortográficos. Asimismo, se tienen otros paquetes en el lenguaje R que permiten verificar la taxonomía de los árboles (Chamberlain y Szöcs 2013). La diversidad del estrato arbóreo de la parcela (2.25 ha) del Bosque Experimental Elías Meneses (BEEM), registró 1655 individuos, pertenecientes a 19 órdenes, 40 familias y 118 especies, Las familias de mayor importancia son Moraceae, Annonaceae y Arecaceae. Esta diversidad de árboles es inferior a lo encontrado en un bosque amazónico preandino del Parque Nacional Madidi, mientras que las familias de importancia son similares (Araujo-Murakami *et al.* 2005).

### Determinación de la densidad de la madera

La determinación de la densidad de la madera se efectuó en un 68,4% con base en la clasificación del estrato arbóreo a nivel de especie y utilizando una base de datos global de la densidad. Este repositorio digital cuenta con 16469 registros de diferentes fuentes (Zanne *et al.* 2009). Los restantes valores de la densidad fueron asignados con base en promedios por género y parcela, lo cual permite disminuir los sesgos atribuidos a esta variable en la estimación de la biomasa aérea (Flores & Coomes, 2011). Esta asignación de la densidad de la madera en función de la identificación botánica de los árboles es importante para disminuir la incertidumbre debido a la gran variabilidad que presenta y el efecto que tiene en las estimaciones de biomasa y carbono (Fearnside 1997).

En cuanto a los valores de la densidad de la madera, un 76% de los árboles presentan densidades que varían entre 0,48 y 0,814 g/cm<sup>3</sup>, lo cual se aproxima a lo encontrado por Sullivan y otros (2025) que presentan densidades entre 0,5 y 0,8 g/cm<sup>3</sup> para condiciones similares al área de estudio. La media de la densidad de la madera fue de 0,55 g/cm<sup>3</sup> y una mediana de 0,58 g/cm<sup>3</sup>, lo cual es inferior a lo encontrado por Mostacedo y otros (2008) que tienen un promedio de 0,62 g/cm<sup>3</sup> para un bosque seco de la Chiquitania y por Fearnside (1997) que encontró un promedio de 0,65 g/cm<sup>3</sup>, lo cual puede atribuirse a la variabilidad entre individuos de la misma especie y a las condiciones ambientales de las áreas de estudio.

### **Estimación de la altura de los árboles**

La relación diámetro-altura puede ser ajustada a modelos lineales y no lineales y puede ser de dos o tres parámetros (Mehtatalo *et al.* 2015). En el caso de los datos de la muestra de las parcelas, el modelo de mejor ajuste resultó ser el logarítmico cuadrático, ya que presentó el menor error estándar relativo (4,56); este es un modelo no lineal asintótico y este resultado coincide con lo obtenido por Pereira *et al.* (2025) en el noreste amazónico del Brasil. El uso del modelo asintótico para estimar la altura de los árboles mejora la precisión de la estimación de la biomasa aérea. Aunque para mejorar la precisión se podría incluir una variable de estrés climático como la variabilidad de la temperatura, precipitación y la intensidad de sequía (Chave *et al.* 2014). Asimismo, el uso de la tecnología LiDAR es eficiente para estimar las alturas y la biomasa aérea (Rejou-Mechain *et al.* 2017).

Los modelos de estimación de altura de Feldpausch (en base a las regiones) y de Chave (en base a las coordenadas geográficas), si bien tienen mayores errores estándar relativos en comparación con el modelo local, presentaron altos niveles de asociación con el modelo local, ya que el coeficiente de correlación es alto con 0,99. La altura de los árboles es un importante factor alométrico y debe incluirse en las estimaciones de la biomasa aérea para reducir los errores en las reservas de carbono y en las emisiones debidas a la deforestación (Feldpausch *et al.* 2012). El promedio de la altura total de los árboles obtenidos a través del modelo local es de 20,2 m, variando de 11,7 m a 27,8 m, lo cual contrasta a lo encontrado en un bosque amazónico preandino con un promedio de 27,62 m y variando de 22 a 33 m (Araujo-Murakami *et al.* 2005), lo cual se atribuye a factores del ambiente como precipitación, temperatura y sequías.

### **Estimación de la biomasa aérea**

La biomasa aérea estimada con el paquete de BIOMASS es de 227,91 t/ha, el mismo que es inferior a lo encontrado por Keller *et al.* (2001) en el Bosque Nacional Tapajos en Brasil con 372 t/ha; por Nogueira-Lima *et al.* (2012) con 252,6 t/ha en un bosque amazónico al Noroeste en el Brasil, por Nascimento y Laurance (2002) con 397,7 t/ha; esto puede atribuirse a que las dimensiones de los árboles en las parcelas del Bosque Experimental Elías Meneses presentaron dimensiones muy bajas en diámetro y altura y con una distribución asimétrica muy pronunciada a la derecha.

Por otro lado, en comparación con los bosques de Bolivia, la biomasa aérea de 227,91 t/ha sigue siendo inferior, ya que en el Parque Noel Kempff Mercado se encontró una biomasa aérea de 326 t/ha para un bosque húmedo y 260 t/ha para un bosque seco (Araujo-Murakami *et al.* 2006). En contraste, la biomasa aérea estimada es mayor a lo encontrado en el bosque seco y en el bosque de transición chiquitano-amazónico en el Departamento de Santa Cruz con biomásas entre 160 y 170 t/ha (Mostacedo *et al.*, 2008), lo cual se atribuye a las condiciones ambientales de los tipos de bosques. Por otro lado, en el bosque chiquitano se ha obtenido una biomasa de 213 t/ha en un bosque hidrofítico y 209 t/ha en un

bosque semidecíduo (Mostacedo y Paz-Roca, 2020), los cuales son similares a los del estudio. Esto podría atribuirse a la estructura del bosque.

La familia Moraceae es la más importante ya que representa un 29,8% de la biomasa aérea total y también es la que presenta la mayor abundancia de árboles con una presencia del 25,4%, lo cual es similar a lo encontrado en un bosque amazónico en Guarayos, Bolivia (Flores-Valencia *et al.* 2016). Las especies de mayor importancia con relación a la biomasa aérea son *Hura crepitans*, *Clarisia racemosa*, *Pseudolmedia laevis*, y *Licania oblongifolia*. En el caso del Ojoso colorado (*Pseudolmedia laevis*) también presenta una alta abundancia, lo cual coincide con lo encontrado en los bosques amazónicos de Bolivia (Araujo-Murakami *et al.* 2015).

## Propagación de errores

Es importante analizar como la incertidumbre individual de los parámetros impacta sobre la estimación final de la biomasa aérea (Brown *et al.* 1995 y Molto *et al.* 2013). La función AGBmonteCarlo de BIOMASS permite una integración holística de los errores, generando distribuciones de parámetros en lugar de estimaciones puntuales (enfoque bayesiano), lo cual es vital cuando se aplican métodos no destructivos y generando una mayor transparencia en los inventarios de informes de carbono (Rejou-Mechain *et al.* 2017).

La mayor fuente de la incertidumbre en la estimación de la biomasa aérea es atribuida al modelo alométrico, lo cual coincide con Molto *et al.* (2013), y esto podría deberse a que los modelos pantropicales utilizados en la función computeAGB presentan un error residual intrínseco derivado de la enorme variabilidad en las estructuras de los árboles y que no pueden ser explicados totalmente por el diámetro, altura y densidad de la madera (Rejou-Mechain *et al.* 2017 y Reyes *et al.* 2025). En contraste, las mediciones de diámetro presentan los menores errores y poca influencia en la incertidumbre final, esto podría atribuirse a que el diámetro es generalmente la variable más fácil de adquirir en campo (Brown *et al.* 1995).

## CONCLUSIONES

Con base en los objetivos planteados en el presente trabajo, las conclusiones son las siguientes:

El paquete BIOMASS del entorno de R presenta funciones que permiten automatizar la estimación de la biomasa aérea de los árboles en los bosques tropicales, disminuyendo la incertidumbre con base en las correcciones de la taxonomía vegetal para una correcta selección de la densidad de la madera de un repositorio con varias fuentes de información.

La altura total estimada por el modelo local, modelo en base a la región geográfica (Feldpausch) y modelo en base a un promedio de coordenadas (Chave) no presenta diferencias significativas y, por lo tanto, estos dos últimos modelos pueden ser utilizados en la estimación de la biomasa aérea cuando no se tienen los datos de la altura. Adicionalmente, estas variables presentan una buena relación con la biomasa aérea estimada.

La biomasa aérea es de 227,91 t/ha, la cual se considera como una cantidad leve en los bosques tropicales. Los órdenes botánicos con mayor biomasa aérea fueron Malpighiales, Rosales y Magnoliales, mientras que las familias con mayor biomasa fueron Moraceae, Euphorbiaceae y Annonaceae. En relación con las especies, las que presentaron las mayores biomásas fueron Ochoó (*Hura crepitans*), Isirí (*Clarisia racemosa*), Ojoso colorado (*Pseudolmedia laevis*) y Mondadiente (*Licania oblongifolia*).

Los componentes del modelo alométrico y el modelo local de diámetro-altura son las principales fuentes en la cuantificación de la incertidumbre asociada a la estimación de la biomasa aérea, mientras que la densidad de la madera y las mediciones del diámetro presentan los menores errores, esto significa, una menor contribución a la incertidumbre.

## LITERATURA CITADA

- Acosta, L. Y Aguanta, F. 2006. Lista preliminar de los mamíferos del Bosque Experimental Elías Meneses, Santa Cruz, Bolivia. *Kempffiana*, 2(1): 144-149.
- Amanuel, W., Tadesse, C., Molla, M., Getinet, D. y Mekonnen, Z. 2024. Allometric equation for estimating aboveground biomass of *Acacia-Commiphora* forest, southern Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*. 48:20. <https://doi.org/10.5141/jee.24.036>
- Araujo Murakami, A., Jørgensen, P. M., Maldonado, C., Paniagua Zambrana, N. Y., Cardona Peña, V., Quintana, D. de la, Fuentes, A. F., Miranda, T. y Seidel, R. 2005. Estructura y diversidad de plantas leñosas en un bosque amazónico preandino en el sector del Río Quendeque, Parque Nacional Madidi, Bolivia. *Ecología en Bolivia: Revista del Instituto de Ecología*, 40(3): 304-324.
- Araujo-Murakami, A., Arroyo Padilla, L., Killeen, T. J. y Saldias Paz, M. 2006. Dinámica del bosque, incorporación y almacenamiento de biomasa y carbono en el Parque Nacional Noel Kempff Mercado. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000268980>
- Araujo-Murakami, A., Daniel, V., Molina, G., Vos, V., Parada, G., Arroyo Padilla, L. y Killeen, T. J. 2015. Diversidad arbórea de los bosques de Tierra Firme de la Amazonia Boliviana. *Kempffiana*, 11, 1-28.
- Ayushi, K., Babu, K. N., Ayyappan, N., Nair, J. R., Kakkara, A. y Reddy, C. S. 2024. A comparative analysis of machine learning techniques for aboveground biomass estimation: A case study of the Western Ghats, India. *Ecological Informatics*, 80: 102479. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102479>
- Baskerville, G. L. 1972. Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 2(1): 49-53. <https://doi.org/10.1139/x72-009>
- Benitez-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. y 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>
- Bojórquez, A., Martínez-Yrizar, A., Búrquez, A., Jaramillo, V. J., Mora, F., Balvanera, P. y Álvarez-Yépez, J. C. 2020. Improving the accuracy of aboveground biomass estimations in secondary tropical dry forests. *Forest Ecology and Management*, 474: 118384. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118384>
- Boyle, B., Hopkins, N., Lu, Z., Raygoza Garay, J. A., Mozzherin, D., Rees, T., Matasci, N., Narro, M. L., Piel, W. H., Mckay, S. J., Lowry, S., Freeland, C., Peet, R. K. y Enquist, B. J. 2013. The taxonomic name resolution service: An online tool for automated standardization of plant names. *BMC Bioinformatics*, 14(1): 16. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-16>
- Brown, I. F., Martinelli, L. A., Thomas, W. W., Moreira, M. Z., Ferreira, C. a. C. y Victoria, R. L. 1995. Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: An example from Rondônia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 75: 175-189.
- Chamberlain, S. A. y Szöcs, E. 2013. taxize: Taxonomic search and retrieval in R. *F1000Research*. <https://doi.org/10.12688/f1000research.2-191.v2>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S., Swenson, N. y Zanne, A. 2009. Towards a Worldwide Wood Economics, *Spectrum. Ecology letters*, 12: 351-366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>

- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10): 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chen, Z., Yang, X., Pan, X., Wu, T., Lei, J., Chen, X., Li, Y. y Chen, Y. 2025. Estimating Forest Aboveground Biomass in Tropical Zones by Integrating LiDAR and Sentinel-2B Data. *Sustainability*, 17(8): 3631. <https://doi.org/10.3390/su17083631>
- da Costa, J., Barni, P., Sotta, E., Carim, M., Cunha, A., Guedes, M., Aparicio, P., Oliveira, L., Barbosa, R., Fearnside, P., Nascimento, H. y Toledo, J. 2025. Dense Forests in the Brazilian State of Amapá Store the Highest Biomass in the Amazon Basin. *Sustainability*, 17: 5310. <https://doi.org/10.3390/su17125310>
- Fareed, N. y Numata, I. 2025. Evaluating the impact of field-measured tree height errors correction on aboveground biomass modeling using airborne laser scanning and GEDI datasets in Brazilian Amazonia. *Trees, Forests and People*, 19: 100751. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100751>
- Fareed, N., Numata, I., Cochrane, M. A., Novoa, S., Tenneson, K., Melo, A. W. F. de, da Silva, S. S., Oliveira, M. V. N. d', Nicolau, A. y Zutta, B. 2025. Aboveground biomass modeling using simulated Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) waveform LiDAR and forest inventories in Amazonian rainforests. *Forest Ecology and Management*, 578: 122491. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122491>
- Farell, M. E. 2006. La ictiofauna del Rio Ibabo (Santa Cruz, Bolivia) en época de aguas altas. *Kempffiana*, 2(1): 4-34.
- Fearnside, P. M. 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 90(1): 59-87. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03840-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03840-6)
- Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Lewis, S. L., Brienen, R. J. W., Gloor, M., Monteagudo Mendoza, A., Lopez-Gonzalez, G., Banin, L., Abu Salim, K., Affum-Baffoe, K., Alexiades, M., Almeida, S., Amaral, I., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., Aymard C., G. A., ... Phillips, O. L. 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9(8): 3381-3403. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012>
- Flores, O. y Coomes, D. A. 2011. Estimating the wood density of species for carbon stock assessments. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(2): 214-220. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00068.x>
- Flores-Valencia, M., Araujo-Murakami, A., Cabrera-Severich, P., Zuck, D., Molina-Olivera, A., Lazarte-Chispa, M., Moreno, G., Km, V. y Norte, C. 2016. Diversidad y composición florística de los bosques amazónicos del Sur de la Amazonia en el sector Kenia, Guarayos, Bolivia, *Kempffiana* 12 (1): 20-46.
- Jilo, D., Birhane, E., Tadesse, T. y Ubuy, M. H. 2025. Aboveground Biomass Models for Common Woody Species of Lowland Forest in Borana Woodland, Southern Ethiopia. *Forests*, 16(5): 823. <https://doi.org/10.3390/f16050823>
- Keller, M., Palace, M. y Hurtt, G. 2001. Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil: Examination of sampling and allometric uncertainties. *Forest Ecology and Management, New Directions in Tropical Forest Research*, 154(3): 371-382. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00509-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00509-6)
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G. y Moran, E. 2016. A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1): 63-105. <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>
- Madhab, S. Y Behera, M. D. 2018. Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest. *Applied Geography*, 96: 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.05.011>

- Marchesan, J., Alba, E., Schuh, M. S., Favarin, J. A. S. y Pereira, R. S. 2020. Aboveground biomass estimation in a tropical forest with selective logging using Random Forest and LiDAR data. *Floresta*, 50(4): 1873-1882. <https://doi.org/10.5380/rf.v50i4.66589>
- Mehtätalo, L., Miguel, S. de y Gregoire, T. 2015. Modeling height-diameter curves for prediction. *Canadian Journal of Forest Research*, 45: 826-837. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0054>
- Michaelis, L. y Menten, M. L. 1913. Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochem*, 49: 333-369.
- Molto, Q., Rossi, V. y Blanc, L. 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2): 175-183. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00266.x>
- Mostacedo, B., Villegas, Z., Licona, J. C., Alarcon, A., Leñaño, C., Peña, M. y Poorter, L. 2008. Dinámica de la biomasa en áreas de manejo forestal sujetos a diferentes intensidades de aprovechamiento (Documento Técnico No. 3; p. 45). Instituto Boliviano de Investigación Forestal. Santa Cruz, Bolivia.
- Nascimento, H. y Laurance, W. 2002. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: A landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, 168: 311-321. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00749-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00749-6)
- Nogueira, A. J., Suwa, R., de Mello Ribeiro, G. H. P., Kajimoto, T., dos Santos, J., da Silva, R. P., de Souza, C. A. S., de Barros, P. C., Noguchi, H. y Ishizuka, M. 2012. Allometric models for estimating above-and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 277: 163-172.
- Paz-Roca, M. A. y Mostacedo, B. 2020. Biomasa aérea de árboles en bosques secos de la Ecorregión Chiquitana en Alta Vista, Santa Cruz, Bolivia. *Kempffiana*, 16(2): 1-15.
- Pereira, A. L., Nascimento, H. E. M., Guedes, M., Hilário, R. y Toledo, J. J. 2025. Tree height-diameter allometry and implications for biomass estimates in Northeastern Amazonian forests. *PeerJ*, 13: e18974. <https://doi.org/10.7717/peerj.18974>
- Pinto, J. 2006. Evolución del paisaje y estado de conservación de la Reserva Forestal El Chore. *Kempffiana*, 2(1): 45-56.
- Réjou-Méchain, M., Tanguy, A., Pioniot, C., Chave, J. y Hérault, B. 2017. biomass: An R package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(9): 1163-1167. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12753>
- Reyes, G., Andrés-Mauricio, J. y Hernández, S. 2025. Fuentes de error más comunes en la estimación y mapeo de la biomasa aérea de los bosques al usar datos de campo y de sensores remotos. Consideraciones en la Península de Yucatán. *Desde el Herbario CICY-DHCICY*, (17): 18-24.
- Rodrigues, J. C. y de Almeida, C. F. P. 2025. Accessing the spatial distribution of aboveground biomass in tropical mountain forests using regression kriging simulation: A geostatistical approach for local-scale estimates. *Ecological Processes*, 14(1): 44. <https://doi.org/10.1186/s13717-025-00590-4>
- Saatchi, S. S., Houghton, R. A., Dos Santos Alvalá, R. C., Soares, J. V. y Yu, Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13(4): 816-837. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x>
- Su, Y., Wu, Z., Zheng, X., Qiu, Y., Ma, Z., Ren, Y. y Bai, Y. 2025. Harmonizing remote sensing and ground data for forest aboveground biomass estimation. *Ecological Informatics*, 86: 103002. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103002>
- Sullivan, M. J. P., Phillips, O. L., Galbraith, D., Almeida, E., de Oliveira, E. A., Almeida, J., Dávila, E. Á., Alves, L. F., Andrade, A., Aragão, L., Araujo-Murakami, A., Arets, E., Arroyo, L., Cruz, O. A. M., Baccaro, F., Baker, T. R., Banki, O., Baraloto, C., Barlow, J., ... Zwerts, J. A. 2025. Variation in wood density across South American tropical forests. *Nature Communications*, 16(1): 2351. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56175-4>
- Villaruel, D., Rodríguez-Montellano, A., Araujo-Murakami, A., Camargo, R., Martínez-Ugarteche, M. T., Ledezma, R., Jørgensen, P. M., Klitgaard, B. B., Miliken, W., Pardo, G., Vos, V. A., Parada, G. A., Crezee, B., Feldpausch, T. R., Gutierrez-Sibauty, G., Viscarra, L. J., Killeen, T. J., Álvarez-Severiche, C., Paca, R.

- C., ... Proença, C. E. B. 2022. Estimación y modelamiento de la distribución espacial de la biomasa vegetal aérea para Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 57(1): 5-18.
- Weibull, W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18,:293-297. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>
- Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Ilic, J., Jansen, S., Coomes, D. A., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N. G., Wiemann, M. C. y Chave, J. 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. En *Dryad*. Dryad. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>