

Modelos predictivos de biomasa y carbono en árboles plantados de *Swietenia macrophylla* King en Costa Rica

Predictive models of biomass and carbon in planted trees of *Swietenia macrophylla* King in Costa Rica

William Fonseca González¹, Víctor Meza Picado², Orlando Chinchilla Mora³

[Recibido: 10 de septiembre de 2025; Aceptado: 19 de febrero de 2026; Corregido: 14 de mayo de 2026; Publicado: 01 de junio de 2026]

Resumen

[**Introducción**]: Las plantaciones forestales desempeñan un papel clave en la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros y reservorios de carbono, además de proveer múltiples bienes y servicios ambientales. La cuantificación precisa de la biomasa y el carbono en estos ecosistemas es fundamental para estimar su contribución en la captura de CO₂. [**Objetivo**]: Este estudio tuvo como objetivo desarrollar modelos alométricos para estimar la biomasa y el carbono del árbol y de sus componentes en plantaciones de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Costa Rica. [**Metodología**]: Se realizó un muestreo destructivo de 49 árboles, abarcando un rango diamétrico de 4.9 cm a 42.9 cm. Se cuantificó la biomasa de fuste, ramas, hojas y raíces mediante pesaje en campo y determinación de materia seca en laboratorio. Posteriormente, se ajustaron los modelos de regresión simple utilizando el diámetro normal como variable predictora, al seleccionar los modelos con base en criterios estadísticos y análisis gráfico de residuos. [**Resultados**]: La fracción de carbono varió entre 0.45 y 0.49 según el componente del árbol, con el follaje en el valor más alto (0.49). El fuste acumuló el 55.2 % de la biomasa total, seguido por ramas (20.1 %), raíces (19.51 %) y hojas (8.05 %). El factor de expansión de biomasa aérea fue de 1.54 (1.38 para ramas y 1.16 para follaje), mientras que para la raíz de 1.37. Los modelos ajustados presentaron coeficientes de determinación (R²) entre 83.4 % (carbono en hojas) y 98.4 % (biomasa total), con errores inferiores al 7 % en las fracciones leñosas. [**Conclusiones**]: Los modelos alométricos desarrollados permiten estimaciones precisas y eficientes de biomasa y carbono en *S. macrophylla*, lo cual facilita su aplicación en inventarios forestales, monitoreo de carbono y gestión forestal sostenible.

Palabras clave: ecuaciones alométricas; fracción de carbono; biomasa subterránea; factor de expansión de biomasa; partición de biomasa; contabilidad forestal de carbono.

Abstract

[**Introduction**]: Forest plantations play a key role in climate change mitigation by acting as carbon sinks and reservoirs, while also providing multiple ecosystem goods and services. Accurate quantification of biomass and carbon in these ecosystems is essential to estimate their contribution to carbon sequestration. [**Objective**]: This study aimed to develop allometric models to estimate whole-tree and component biomass and carbon in mahogany

- 1 Docente e investigador jubilado de la Escuela de Ciencias Ambientales e Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. will_fon@yahoo.es, <https://orcid.org/0000-0002-4546-9035>.
- 2 Docente e investigador del Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. victor.meza.picado@una.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0002-8223-4761>.
- 3 Docente e investigador del Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. orlando.070861.mora@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7336-3828>.



(*Swietenia macrophylla* King) plantations in Costa Rica. **[Methodology]:** Destructive sampling was conducted on 49 trees, covering a diameter range from 4.9 cm to 42.9 cm. Stem, branch, leaf, and root biomass were quantified through field weighing and laboratory determination of dry matter. Simple regression models were then fitted using diameter at breast height (DBH) as the predictor variable. Model selection was based on statistical criteria and graphical residual analysis. **[Results]:** The carbon fraction ranged from 0.45 to 0.49 depending on the tree component, with foliage showing the highest value (0.49). The stem accounted for 55.2 % of total biomass, followed by branches (20.1 %), roots (19.51 %), and leaves (8.05 %). The aboveground biomass expansion factor was 1.54, comprising 1.38 for branches and 1.16 for foliage, while the root biomass expansion factor was 1.37. The fitted models showed coefficients of determination (R^2) ranging from 83.4 % for leaf carbon to 98.4 % for total biomass, with estimation errors below 7 % for woody fractions. **[Conclusions]:** The allometric models developed in this study provide accurate and efficient estimates of biomass and carbon in *S. macrophylla*, supporting their application in forest management and carbon accounting.

Keywords: allometric equations; carbon fraction; belowground biomass; biomass expansion factor; biomass partitioning; forest carbon accounting.

1. Introducción

La cuantificación precisa de la biomasa y el carbono forestal es una condición fundamental para evaluar el papel de los ecosistemas forestales en la mitigación del cambio climático. En los inventarios de gases de efecto invernadero, la biomasa arbórea constituye uno de los reservorios más relevantes del sector uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura, por lo que su estimación requiere métodos consistentes, transparentes y reproducibles (IPCC, 2006). Esta necesidad resulta particularmente importante en regiones tropicales, donde la alta diversidad de especies, la variabilidad ambiental y la heterogeneidad estructural de los bosques y plantaciones pueden incrementar la incertidumbre de los cálculos de carbono (Chave *et al.*, 2014; Avitabile *et al.*, 2016).

Las plantaciones forestales desempeñan un papel creciente dentro de las estrategias de restauración productiva, abastecimiento de madera y almacenamiento de carbono. Sin embargo, su contribución real a la mitigación climática depende de la calidad de las metodologías utilizadas para estimar la biomasa aérea y subterránea. La cosecha destructiva constituye la base empírica más robusta para desarrollar modelos de biomasa, pero su aplicación a gran escala es costosa, laboriosa y ambientalmente limitada. Por esta razón, los modelos alométricos se han consolidado como herramientas esenciales para estimar biomasa y carbono a partir de variables dasométricas de fácil medición, como el diámetro normal, la altura total y, en algunos casos, la densidad de la madera (Picard *et al.*, 2012; Chave *et al.*, 2014; Cifuentes *et al.*, 2015). Estos modelos permiten reducir el esfuerzo de campo y mejorar la comparación de los inventarios, siempre que sean seleccionados o calibrados de acuerdo con la especie, el sitio, la edad y la estructura del rodal.

La selección de ecuaciones alométricas no es un aspecto menor de la contabilidad forestal de carbono. El uso de modelos generales o desarrollados para otras especies puede introducir sesgos cuando se aplican a especies con arquitectura, densidad de madera o patrones de



asignación de biomasa particulares. *Chave et al. (2014)* demostraron que el diámetro, la altura y la densidad de la madera son covariables relevantes para mejorar la estimación de biomasa aérea en árboles tropicales, mientras que *Forrester et al. (2017)* evidenciaron que la edad, la estructura del rodal y el clima pueden influir en las relaciones alométricas.

En consecuencia, las ecuaciones específicas por especie y región siguen siendo necesarias para reducir la incertidumbre, especialmente cuando los resultados se destinan a inventarios nacionales, proyectos de mitigación o mecanismos de monitoreo, reporte y verificación.

La caoba (*Swietenia macrophylla* King) es una de las especies maderables tropicales de mayor importancia económica y silvícola en América Latina y otras regiones tropicales. Su madera de alto valor, su uso en plantaciones comerciales y sistemas agroforestales, así como su potencial para combinar producción forestal con almacenamiento de carbono han motivado evaluaciones sobre crecimiento, productividad y carbono en diferentes países (*García et al., 2011; Krisnawati et al., 2011; Akhilraj y Inamati, 2023*). No obstante, el manejo de la especie presenta desafíos técnicos, entre ellos la susceptibilidad al ataque de *Hypsipyla grandella* y la limitada disponibilidad de modelos alométricos regionalizados para estimar biomasa y carbono con precisión en plantaciones productivas (*Silva et al., 2015*).

La literatura internacional muestra un interés creciente por la cuantificación de biomasa y carbono en *S. macrophylla*, aunque con diferencias importantes en escala, componentes evaluados y métodos de estimación. En México, *Rueda-Sánchez et al. (2014)* estimaron biomasa aérea y carbono en plantaciones de *Cedrela odorata* y *S. macrophylla*, con lo cual se aporta una referencia latinoamericana relevante para comparar la partición de biomasa aérea en caoba. En Bangladesh, *Khan et al. (2018)* evaluaron relaciones alométricas de volumen de fuste y reservas de carbono a nivel de rodal en plantaciones monoespecíficas de *S. macrophylla*, mientras que *Pitol et al. (2019)* y *Pitol y Mian (2023)* calcularon biomasa y carbono en parcelas arboladas comerciales de esta especie. En Filipinas, *Racelis et al. (2019)* documentaron el potencial de secuestro de carbono de plantaciones de caoba en el *Mount Makiling Forest Reserve*. Recientemente, *Paul et al. (2025)* desarrollaron modelos de estimación de biomasa mediante aprendizaje automático, evidenciando el avance hacia enfoques predictivos más complejos para la especie.

A pesar de estos avances, persisten vacíos relevantes para la aplicación de modelos de carbono en plantaciones de *S. macrophylla* en Costa Rica. Muchos estudios disponibles se concentran en biomasa aérea, volumen de fuste o carbono a escala de rodal, mientras que la biomasa radical y la fracción de carbono por componente se calculan con frecuencia mediante factores por defecto. Esta práctica simplifica los inventarios, pero puede aumentar la incertidumbre cuando se requiere convertir biomasa en carbono con mayor trazabilidad. La determinación directa de la fracción de carbono en fuste, ramas, hojas y raíces permite refinar las estimaciones y reducir la dependencia de valores genéricos, especialmente en especies de alto valor comercial y potencial climático.

Frente a esta necesidad, el presente estudio tuvo como objetivo desarrollar modelos alométricos para estimar la biomasa y el carbono del árbol completo y de sus componentes -fuste, ramas, hojas y raíces- en plantaciones de *Swietenia macrophylla* King en Costa Rica. Para ello, se



realizó un muestreo destructivo de 49 árboles con un rango diamétrico de 4.9 cm a 42.9 cm, se cuantificó la biomasa seca y se determinó la fracción de carbono por componente. Este enfoque permite abordar tres vacíos complementarios: primero, generar modelos biométricos específicos para caoba bajo condiciones costarricenses; segundo, describir la partición aérea y subterránea de la biomasa como una expresión funcional de la arquitectura del árbol; y tercero, mejorar la trazabilidad de la conversión de biomasa a carbono mediante fracciones de carbono medidas directamente. Con ello, el estudio aporta una base empírica regional para fortalecer inventarios forestales, monitoreo de carbono y estrategias de manejo sostenible en plantaciones tropicales.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

Las plantaciones evaluadas se ubican en las provincias Heredia (Sarapiquí), Limón (Guápiles), Alajuela (Venecia de San Carlos) y Guanacaste (Nosara de Nicoya). Las características biofísicas de los sitios se presentan en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Características de los sitios donde se extrajeron los árboles de *S. macrophylla*

Table 1. Biophysical characteristics of *S. macrophylla* plantations from which trees were extracted

Sitio	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm año ⁻¹)	Altitud (msnm)	Pendiente (%)	Zona de vida
Horquetas	26	4050	80	2	Bosque muy húmedo tropical (bmh-T)
Nicoya	26.2	2126	130	5	Bosque húmedo tropical (bh-T)
Venecia	24.6	4200	314	8	Bosque muy húmedo premontano (bmh-PM)
Guápiles	24	4500	215	5	Bosque muy húmedo tropical (bmh-T)

2.2 Muestreo de biomasa, determinación de la materia seca y de la fracción de carbono (FC)

En el campo se eligieron plantaciones con edades entre 9 y 23 años, de donde se extrajeron árboles de diferente diámetro hasta obtener una muestra que abarcara la amplitud diamétrica observada para la especie a nivel país. La muestra comprendió 49 árboles distribuidos entre 4.9 cm y 42.9 cm, el rango diamétrico con mayor tamaño de muestra fue el de 10 cm a 14.9 cm (18 árboles), seguido de 15 cm a 19.9 cm (nueve individuos); en las restantes clases de diámetro la muestra varió de 1 a 6 árboles.

La biomasa húmeda se estimó de forma destructiva al pesar por separado la fracción del fuste, ramas, hojas y raíz. La raíz, extraída con una retroexcavadora y polipasto manual de tracción horizontal, se lavó con agua y se pesó después de secada al aire. De las fracciones de



biomasa se obtuvo una muestra de aproximadamente 1 kg y se trasladaron al laboratorio para determinar su peso húmedo (kg). Las muestras se secaron en horno a 60 °C hasta alcanzar un peso constante y posteriormente se pesaron para determinar la materia seca. La biomasa seca de cada componente se trituró para establecer la fracción de carbono mediante combustión seca Dumas (FAO, 2019).

2.3 Ajuste de modelos alométricos

Los modelos se ajustaron usando el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa *Statgraphics Centurion XVI*. Se ensayaron alrededor de 10 modelos para la biomasa y carbono de cada fracción del árbol (hojas, ramas, fuste, raíz), para la biomasa y carbono leñoso del árbol (fuste + ramas + raíz) y para el individuo total, usando como variable independiente el diámetro normal (DAP).

La selección de la ecuación de mejor ajuste se realizó tomando en cuenta: la variabilidad del modelo, explicada por el coeficiente de determinación (R^2) (Puc-Kauil *et al.*, 2020); la precisión de las estimaciones, en función a la raíz del cuadrado medio del error (RCME) (Aquino *et al.*, 2015; Forrester *et al.*, 2017; Puc-Kauil *et al.*, 2020), y el comportamiento de la ecuación, determinado por el error absoluto medio (EMA) (Forrester *et al.*, 2017).

La precisión y validación de los modelos tomó en consideración: el método gráfico de dispersión entre los observados frente a predichos, y el error absoluto promedio porcentual:

$$EAPP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \times 100$$

donde P_i es la biomasa o carbono predicho, O_i es la biomasa o carbono observado y n es el número total de observaciones.

Adicionalmente, se calculó el estadístico Durbin Watson (DW), que mide la independencia de los datos (Ramos *et al.*, 2014); el Índice de Furnival (IF) para comparar modelos lineales con aquellos donde la variable dependiente es transformada (Segura y Andrade, 2008), el criterio de información de Akaike (AIC) como medida relativa de la calidad del modelo y el error del modelo o sesgo (E %) (Bueno *et al.*, 2019; Chave *et al.*, 2014), error cuadrático medio (ECM) y la diferencia agregada (DA).

Por último, se graficaron los valores estimados contra los observados para definir si los modelos sobreestiman o subestiman la variable respuesta. También, gracias al método gráfico, se observó el comportamiento biológico de los modelos. Todos los estadígrafos calculados fueron jerarquizados según su magnitud relativa tomando como referencia la metodología que exponen Segura y Andrade (2008) y Bueno *et al.* (2019).



3. Resultados

3.1 Fracción de carbono por componente (FC)

La fracción de carbono promedio varió entre los diferentes componentes del árbol, con valores que oscilaron entre 0.45 en ramas y 0.49 en hojas. La fracción de carbono en el fuste (0.46) y las ramas (0.45) fue muy similar, mientras que las raíces mostraron un valor intermedio de 0.48. La fracción de carbono presentó baja variabilidad entre componentes, con desviaciones estándar de 0.01 y errores de muestreo inferiores a un 1.05 % (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Fracción de carbono por componente
Table 2. Carbon fraction by component

Estadístico	Fuste	Ramas	Raíz	Hojas
N	27	27	17	24
X *	0.46	0.45	0.48	0.49
S	0.01	0.01	0.01	0.01
E%	1.0	1.05	0.66	0.96

* N = número de muestras; X = media de la fracción de carbono; S = desviación estándar; E % = error de muestreo al 95 % de confianza.

3.2 Partición de la biomasa por componente y factor de expansión de biomasa (FEB)

El análisis de la partición de la biomasa reveló que el fuste concentra la mayor proporción, con un 55.22 % del total, seguido por las ramas (20.10 %) y las raíces (19.51 %), mientras que las hojas representaron la menor fracción (8.05 %). La variabilidad (S) fue baja en general, con el valor más alto en el fuste (9.30), lo cual indica estabilidad en la partición de biomasa entre los árboles evaluados.

Las relaciones componente/fuste fueron 0.38 para ramas, 0.37 para raíces y 0.16 para hojas. Expresadas como factores multiplicadores respecto al fuste (FEB), equivalen a 1.38, 1.37 y 1.16, respectivamente. Esto indica que, en relación con el fuste, los componentes secundarios representan una proporción significativa de la biomasa total del árbol. El error de muestreo más alto correspondió a las hojas (23.20 %), lo que sugiere una mayor variabilidad en este componente, quizás debido a diferencias en la fenología de los individuos muestreados (**Cuadro 3**).



Cuadro 3. Distribución de la biomasa por componente del árbol y relación componente/fuste
Table 3. Biomass distribution by tree component and component-to-stem ratio

Estadístico	Biomasa (%)				Relación componente/fuste		
	Fuste	Ramas	Raíz	Hojas	Ramas	Raíz	Hojas
N	49	49	43	46	49	49	46
X*	55.22	20.10	19.51	8.05	0.38	0.37	0.16
S	9.30	7.08	5.79	5.24	0.17	0.07	0.13
E%	4.86	10.17	9.14	19.39	12.88	5.59	23.20

* N = número de árboles; X = promedio; S = desviación estándar; E % = error de muestreo al 95 % de confianza. Los porcentajes corresponden al promedio de la proporción de cada componente por árbol; por ello, la suma de los promedios puede diferir del 100 %. Los valores de ramas, raíz y hojas corresponden a la relación componente/fuste.

3.3 Modelos para la cuantificación de la biomasa y el carbono

Los modelos ajustados para estimar la biomasa y el carbono mostraron un buen desempeño, con coeficientes de determinación (R^2) superiores al 83.4 % en todos los componentes (**Cuadro 4** y **Figura 1a**). El follaje presentó el menor ajuste ($R^2 = 83.4$ %), mientras que los componentes leñosos y el árbol completo alcanzaron valores de hasta un 98.4 %. En todas las ecuaciones, los parámetros de regresión fueron significativos ($\alpha = 0.05$), lo que confirma la capacidad predictiva del DAP para estimar biomasa y carbono, con coeficientes de determinación iguales o superiores al 83.4 %. La raíz del cuadrado medio del error (RCME) y el error absoluto medio (EMA) fueron más altos en el follaje (0.343 y 0.4594, respectivamente), lo cual coincide con la mayor variabilidad observada en este componente.

El estadístico Durbin-Watson mostró diferencias entre componentes, con valores más cercanos a la independencia en ramas y hojas, mientras que algunos modelos de fuste, raíz y biomasa leñosa presentaron valores bajos. El análisis gráfico de residuos (**Figura 1b**) no evidenció patrones sistemáticos marcados; sin embargo, los valores bajos de Durbin-Watson en algunos componentes sugieren que la estructura residual debe interpretarse con cautela.

El índice de Furnival y el criterio de información de Akaike apoyaron la selección de los modelos con mejor desempeño relativo, con valores bajos en la mayoría de los casos. La DA, utilizada como medida de sesgo, fue más alta en la biomasa leñosa (3.6), mientras que el error cuadrático medio ECM, mayor en el árbol completo (49.9). Estos resultados indican que las estimaciones de biomasa y carbono presentan poco sesgo y son confiables para su aplicación en plantaciones de *S. macrophylla* (**Figura 1b**).



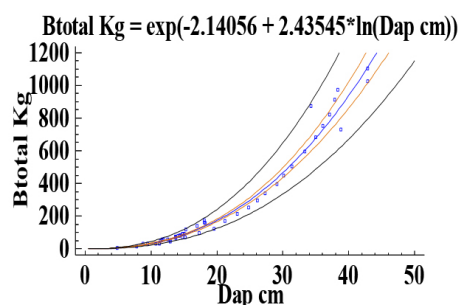
Cuadro 4. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol, expresados en kg, para distintos componentes y para el árbol completo

Table 4. Models for estimating tree biomass and carbon, expressed in kg, for different components and for the whole tree

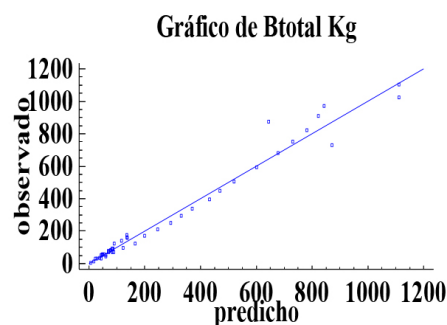
Modelo	R ²	RCME	EMA	DW	ECM	DA	IF	EAPP	AIC
Btotal = $\exp(-2.14056 + 2.43545 \cdot \ln(\text{DAP}))$	98.4	0.1606	0.1320	1.1420 (P=0.0005)	49.9	2.4	0.2	1.3	3.92
Ctotal = $\exp(-2.9002 + 2.43298 \cdot \ln(\text{DAP}))$	98.3	0.1613	0.1320	1.1543 (P=0.0006)	23.7	1.1	0.2	1.3	3.18
Bfuste = $\exp(-2.42506 + 2.31234 \cdot \ln(\text{DAP}))$	97.5	0.1891	0.1537	0.6054 (P=0.0000)	18.8	1.3	0.2	1.7	2.95
Cfuste = $\exp(-3.21158 + 2.31536 \cdot \ln(\text{DAP}))$	97.5	0.1897	0.1551	0.6090 (P=0.0000)	9.0	0.8	0.2	1.7	2.22
Bramas = $\exp(-5.36997 + 2.95843 \cdot \ln(\text{DAP}))$	94.6	0.3625	0.2470	1.67335 (P=0.1020)	26.5	1.8	0.4	7.0	3.29
Cramas = $\exp(-6.15595 + 2.95503 \cdot \ln(\text{DAP}))$	94.5	0.3631	0.2464	1.6719 (P=0.1011)	12.4	0.8	0.4	7.0	2.54
Bhojas = $\exp(-5.90956 + 2.79 \cdot \ln(\text{DAP}))$	83.6	0.6303	0.4542	1.5854 (P=0.0560)	17.7	2.7	0.6	24.7	2.89
Chojas = $\exp(-6.59657 + 2.77836 \cdot \ln(\text{DAP}))$	83.4	0.6343	0.4594	1.5847 (P=0.0557)	8.7	1.4	0.6	25.0	2.19
Braíz = $\exp(-2.9861 + 2.16093 \cdot \ln(\text{DAP cm}))$	96.9	0.1975	0.1501	0.6057 (P=0.0000)	12.2	1.5	0.2	1.9	2.53
Craíz = $\exp(-3.7086 + 2.15879 \cdot \ln(\text{DAP}))$	96.9	0.1977	0.1516	0.6637 (P=0.0000)	5.8	0.7	0.2	1.9	1.79
Bleñosa = $\exp(-2.13811 + 2.4062 \cdot \ln(\text{DAP}))$	98.2	0.1666	0.1359	0.8118 (P=0.0000)	47.3	3.6	0.2	1.3	3.87
Cleñoso = $\exp(-2.89718 + 2.40211 \cdot \ln(\text{DAP}))$	98.2	0.1671	0.1359	0.8032 (P=0.0000)	22.4	1.7	0.2	1.4	3.13

El tamaño de la muestra fue de 49 y todos los modelos poseen una $P < 0.0001$. B= biomasa (kg), C= carbono (kg), DAP= diámetro normal (cm), ln= logaritmo natural, exp= exponente, R²= coeficiente de determinación, RCME= raíz del cuadrado medio del error, EMA= error absoluto medio, DW= estadístico Durbin Watson, ECM= error cuadrático medio, DA= diferencia agregada, IF= Índice de Furnival, EAPP (%)= error absoluto promedio porcentual o sesgo, AIC= criterio de información de Akaike

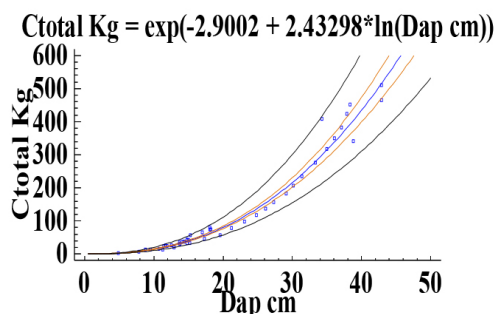
a



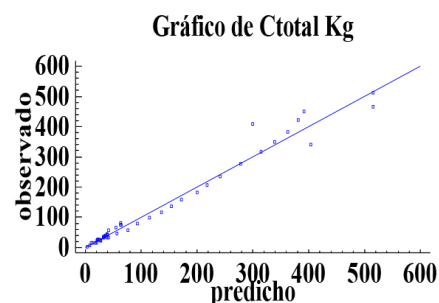
b



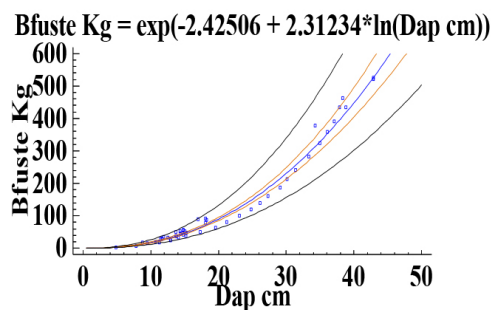
a



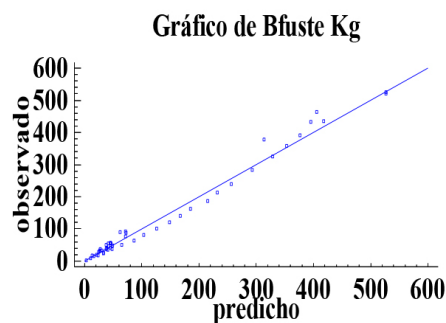
b



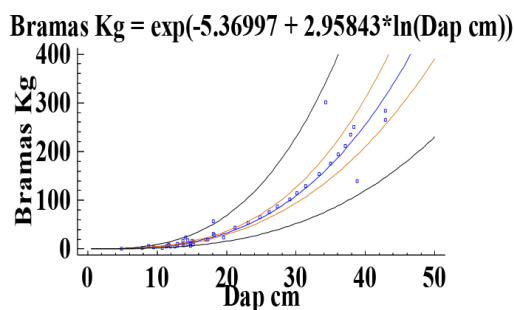
a



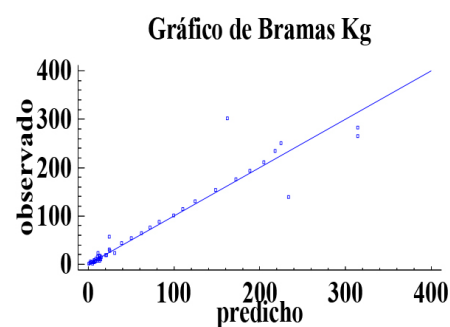
b



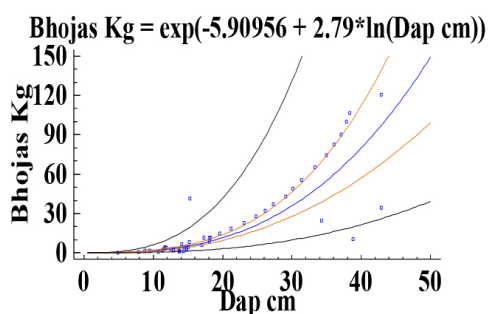
a



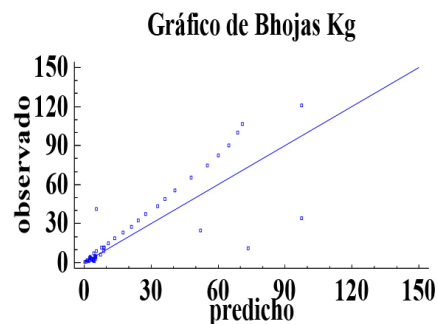
b



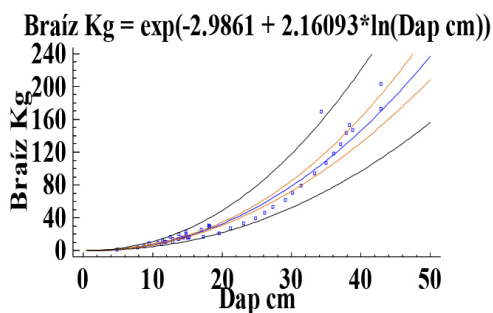
a



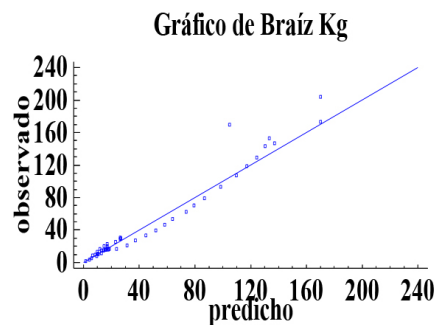
b



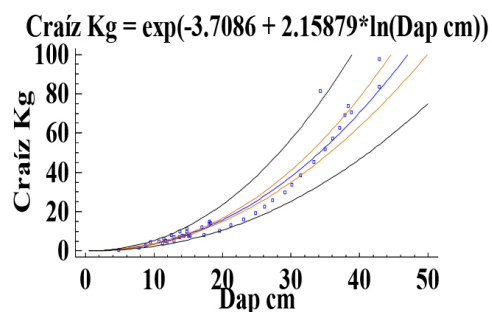
a



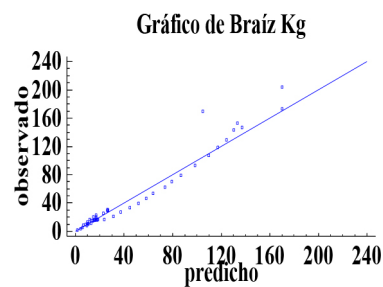
b



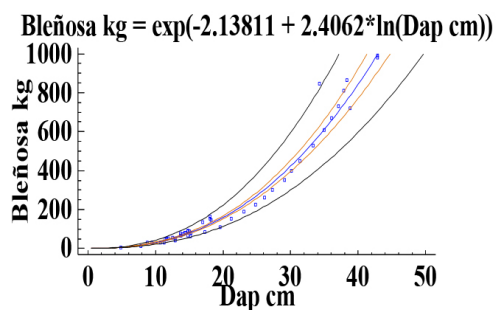
a



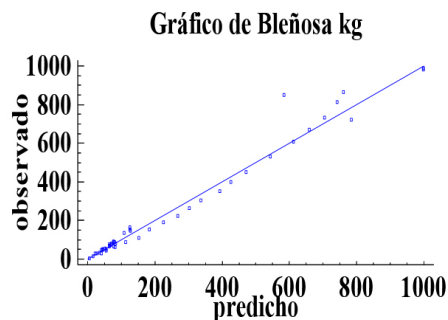
b



a



b



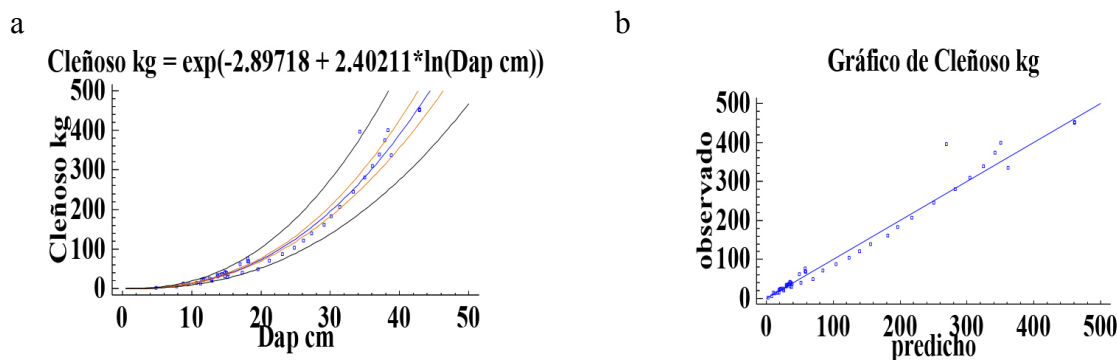


Figura 1. Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo: a) modelo ajustado; b) valores predichos frente a observados

Figure 1. Models for estimating biomass and carbon by tree component and for the whole tree: a) fitted model; b) predicted versus observed values

4. Discusión

Los resultados de este estudio muestran que la estimación de biomasa y carbono en plantaciones de *Swietenia macrophylla* requiere integrar la precisión biométrica de los modelos alométricos con una comprensión ecológica de la asignación de biomasa y una conversión trazable de biomasa a carbono. En este sentido, el aporte del estudio es triple. En primer lugar, se desarrollan ecuaciones específicas para caoba plantada en Costa Rica, lo cual reduce la dependencia de modelos genéricos o transferidos desde otras regiones. En segundo lugar, la inclusión de raíces y la estimación de biomasa por componente permiten interpretar la arquitectura del árbol más allá de la biomasa aérea comercial. En tercer lugar, la determinación de la fracción de carbono en fuste, ramas, hojas y raíces fortalece la utilidad de los modelos para inventarios forestales y esquemas de contabilidad de carbono. Por tanto, el valor del estudio no reside únicamente en el desempeño estadístico de las ecuaciones, sino en su capacidad para conectar medición de campo, funcionamiento del árbol y aplicación en monitoreo de carbono.

Bajo esta lógica, la discusión se organiza en torno a tres dimensiones complementarias: la fracción de carbono como base de trazabilidad, la partición de biomasa como expresión ecológico-funcional y el desempeño de los modelos como herramienta biométrica aplicable.

4.1 Fracción de carbono: implicaciones de medir en lugar de asumir

La fracción de carbono observada en los componentes de *S. macrophylla* varió entre 0.45 y 0.49, con valores menores en ramas y fuste, e incrementos relativos en raíz y hojas. Aunque este intervalo se encuentra dentro del rango general reportado para tejidos leñosos tropicales, su importancia metodológica es mayor de lo que aparenta.



En estudios previos con *S. macrophylla*, como el de Rueda-Sánchez *et al.* (2014), el carbono fue estimado mediante la aplicación de un factor fijo de 0.43 sobre la biomasa seca, sin diferenciar la concentración de carbono entre fuste, ramas y follaje. Esa aproximación permitió resolver una limitación práctica en plantaciones jóvenes, pero también puede introducir sesgos sistemáticos cuando se extrapola a proyectos de carbono o inventarios nacionales.

La comparación es ilustrativa. En el presente estudio, el fuste presentó una fracción de carbono de 0.46 y las hojas de 0.49; por tanto, el uso de un único factor fijo puede subestimar o sobreestimar el carbono según el componente dominante y la edad de la plantación. Esto resulta especialmente relevante en plantaciones jóvenes o en rodales sometidos a podas, aclareos o ataques de *Hypsipyla grandella*, donde la arquitectura de copa puede modificar la proporción relativa de biomasa foliar y ramificada. En términos de contabilidad de carbono, la diferencia entre medir el carbono por componente y aplicar un factor constante puede incidir en la trazabilidad y en la incertidumbre de las estimaciones utilizadas en inventarios o proyectos de mitigación. Así, la medición directa mediante combustión seca fortalece el valor del estudio, porque transforma un supuesto contable en un parámetro empírico específico para plantaciones costarricenses de caoba.

No obstante, la baja variabilidad observada en la fracción de carbono debe interpretarse con cautela. Más allá de demostrar que la fracción de carbono es invariable en toda la vida de la especie, los resultados indican estabilidad dentro del rango de edades, diámetros y sitios evaluados. Esta distinción es importante para evitar una sobreextensión de los hallazgos hacia plantaciones de mayor edad, sitios con estrés hídrico más severo o sistemas agroforestales con competencia interespecífica. La estabilidad observada es, por tanto, una fortaleza para el uso operativo de los modelos en condiciones similares, pero no sustituye la validación en nuevos gradientes ambientales.

4.2 Partición de biomasa: arquitectura funcional y diferencias con otros estudios de caoba

La biomasa de *S. macrophylla* se concentró principalmente en el fuste, seguido por ramas, raíz y hojas. Esta asignación confirma el patrón esperado para una especie maderable de alto valor comercial, en la cual la inversión estructural en fuste constituye el eje del crecimiento y de la acumulación de carbono. Sin embargo, la comparación con otros estudios de la misma especie permite una interpretación más fina. Rueda-Sánchez *et al.* (2014), en plantaciones de 12 años en Jalisco, México, reportaron para *S. macrophylla* una biomasa aérea promedio de 26 kg por árbol, distribuida en un 47.5 % en fuste, un 19.3 % en brazuelo, un 22.8 % en ramas y un 10 % en follaje. En contraste, el presente estudio evidencia una mayor contribución relativa del fuste y una menor proporción foliar.

Esta diferencia puede explicarse por al menos cuatro factores no excluyentes. Primero, el rango diamétrico del presente estudio es mucho más amplio, lo que incorpora árboles de mayor tamaño y, por tanto, una mayor inversión relativa en tejidos leñosos permanentes. Segundo, las plantaciones evaluadas en Costa Rica comprenden edades entre 9 y 23 años, mientras que



el estudio mexicano se concentró en plantaciones de 12 años; conforme aumenta el tamaño del árbol, la biomasa foliar tiende a representar una fracción menor de la biomasa total. Tercero, las condiciones de sitio difieren notablemente: los sitios costarricenses incluyen ambientes húmedos y muy húmedos tropicales, mientras que el estudio de Jalisco se desarrolló en un trópico subhúmedo. Cuarto, la inclusión de la raíz en el presente análisis modifica la interpretación de la arquitectura total del árbol, aspecto que no siempre está presente en las investigaciones sobre biomasa aérea.

La biomasa radical, cercana a una quinta parte de la biomasa total, constituye uno de los hallazgos más relevantes. En muchas evaluaciones forestales, el componente subterráneo se estima mediante proporciones generales o se excluye por la dificultad de extracción. Aquí, la medición destructiva de raíces permite conectar la estimación de carbono arbóreo con una visión más completa del almacenamiento biológico. La comparación con Pitol y Mian (2023), quienes reportaron para *S. macrophylla* en Bangladesh biomasa aérea promedio de 166.5 Mg ha⁻¹, biomasa subterránea de 71.2 Mg ha⁻¹ y biomasa total de 237.7 Mg ha⁻¹, evidencia que la fracción radical puede variar sustancialmente entre sistemas. Esa diferencia probablemente refleja la densidad de plantación, edad, profundidad efectiva del suelo, disponibilidad hídrica, metodología de estimación y definición operativa de biomasa subterránea. Por ello, el valor generado en Costa Rica no debe verse como una simple proporción universal, sino como un parámetro local valioso para reducir incertidumbre en proyectos nacionales de mitigación.

4.3 Modelos alométricos: precisión, simplicidad y límites de transferencia

Los modelos desarrollados muestran un desempeño estadístico alto, con coeficientes de determinación de entre un 83.4 % y un 98.4 %. El diámetro normal explicó con particular fuerza la biomasa total, el carbono total y las fracciones leñosas, mientras que el follaje presentó el ajuste más bajo y el mayor error porcentual. Este patrón es consistente con la naturaleza biológica del follaje: las hojas responden con mayor sensibilidad a la fenología, la estacionalidad, el manejo silvícola, la competencia y el estado fisiológico del árbol. En consecuencia, el menor ajuste foliar no debe interpretarse como una debilidad general del sistema de modelación, sino como evidencia de que los componentes de vida corta tienen mayor variabilidad temporal que los tejidos leñosos permanentes.

La comparación con Rueda-Sánchez *et al.* (2014) fortalece la decisión metodológica de usar el diámetro normal como variable principal. En ese estudio, la altura no explicó adecuadamente la variación de biomasa y los modelos se trabajaron solo con diámetro normal, con valores de R^2 superiores a 0.8. El presente estudio amplía ese antecedente al cubrir un rango diamétrico mayor, incorporar biomasa subterránea y modelar biomasa y carbono por componente. De esta forma, confirma que el diámetro normal es una variable de alta utilidad operativa para caoba, en especial cuando se busca construir herramientas de campo aplicables en inventarios forestales, proyectos de carbono y monitoreos repetidos.



Khan *et al.* (2018), en Bangladesh, demostraron que las ecuaciones alométricas de volumen de fuste para *S. macrophylla* no estuvieron significativamente influenciadas por la densidad del rodal, aunque las reservas de carbono por unidad de área sí respondieron a la densidad, el área basal y la altura. Esa distinción se torna esencial para interpretar el alcance del presente estudio. Las ecuaciones aquí desarrolladas son modelos de árbol individual; por tanto, su aplicación a escala de hectárea dependerá de la estructura del rodal, la densidad, la distribución diamétrica y las prácticas de manejo. En otras palabras, una ecuación precisa a nivel de árbol no elimina la necesidad de un buen inventario a nivel de plantación. La precisión alométrica y el diseño de muestreo son componentes complementarios de la credibilidad del carbono forestal.

La comparación con enfoques recientes de aprendizaje automático también ayuda a ubicar el aporte del estudio. Paul *et al.* (2025) desarrollaron modelos de biomasa para *S. macrophylla* con datos de cientos de árboles en plantaciones en India, utilizando diámetro y altura como predictores y algoritmos como *Random Forest*, *XGBoost*, *SVR* y modelos ensamblados. Estos enfoques alcanzan altos niveles predictivos y abren oportunidades para integrar sensores remotos, LiDAR o imágenes de UAV. Sin embargo, los modelos empíricos simples como los desarrollados en este estudio conservan una ventaja decisiva: son transparentes, reproducibles, fáciles de auditar y directamente aplicables por técnicos de campo. Para mercados de carbono y reportes nacionales, esa trazabilidad puede ser tan importante como la ganancia marginal de precisión.

4.4 Coherencia de las estimaciones del modelo frente a datos publicados

Los estudios de *S. macrophylla* en Asia y América Latina muestran que el potencial de carbono de la caoba depende menos de una propiedad fija de la especie que de la interacción entre sitio, edad, densidad, manejo y horizonte de evaluación. Racelis *et al.* (2019), en el Monte Makiling, Filipinas, reportaron una acumulación excepcional en plantaciones de caoba, con 1120 Mg ha⁻¹ de biomasa total, equivalentes a 542 Mg ha⁻¹ de carbono y 1989 Mg ha⁻¹ de CO₂, además de una tasa de incremento de 43 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de biomasa durante una década. Estos valores no se pueden comparar de forma directa con los modelos de árbol individual desarrollados en Costa Rica, pero sí muestran el potencial de la especie bajo condiciones favorables de sitio, protección y manejo prolongado.

Pitol y Mian (2023), también en Bangladesh, reportaron amplios rangos de biomasa, carbono y CO₂ equivalente en parcelas boscosas de *S. macrophylla*, destacando el valor de la especie tanto para almacenamiento de carbono como para beneficios económicos asociados a madera y servicios ecosistémicos. Sin embargo, esos estudios trabajan a escala de rodal o unidad de área, mientras que el presente artículo genera ecuaciones de árbol y componente. La contribución costarricense, por tanto, se ubica en un nivel metodológico diferente: permite mejorar la base de cálculo sobre la cual luego pueden construirse estimaciones por ha, escenarios de manejo o evaluaciones de adicionalidad.

Con el propósito de evaluar la coherencia externa de los modelos desarrollados, se compararon sus estimaciones con datos publicados para plantaciones de *Swietenia macrophylla* en



México, Bangladesh y Filipinas. Esta comparación debe interpretarse con cautela, debido a que los estudios difieren en edad, densidad de plantación, escala de análisis, componentes incluidos, condiciones de sitio y método de estimación. No obstante, permite ubicar los valores calculados para Costa Rica dentro del rango documentado para la especie en sistemas tropicales.

Para realizar la comparación, se aplicaron los modelos de biomasa y carbono totales desarrollados en este estudio:

$$B_{\text{total}} = \exp(-2.14056 + 2.43545 \times \ln(DAP))$$

$$C_{\text{total}} = \exp(-2.9002 + 2.43298 \times \ln(DAP))$$

Donde B_{total} corresponde a la biomasa total estimada por árbol, C_{total} al carbono total estimado por árbol y DAP al diámetro normal en centímetros. Las estimaciones en Mg ha^{-1} se obtuvieron al multiplicar el valor por árbol por la densidad de árboles ha^{-1} y dividir entre 1000 para expresarlo en Mg ha^{-1} . El CO_2 equivalente se calculó al multiplicar el carbono por 44/12.

Cuadro 5. Comparación entre las estimaciones con los modelos del presente estudio y valores publicados para *Swietenia macrophylla*

Table 5. Comparison between estimates from the models developed in the present study and published values for *Swietenia macrophylla*

Fuente	País/escala	Datos publicados	Estimación con el modelo del presente estudio	Interpretación
Rueda Sánchez <i>et al.</i> (2014)	México; plantación de 12 años.	DN promedio: 10.2 cm; densidad: 1111 árboles ha^{-1} ; biomasa aérea: 28.89 Mg ha^{-1} ; carbono aéreo: 12.33 Mg C ha^{-1} .	Biomasa aérea estimada: 28.07 Mg ha^{-1} ; carbono aéreo estimado: 12.90 Mg C ha^{-1} .	Es la comparación más directa. El modelo costarricense reproduce de forma cercana los valores aéreos reportados para México.
Pitol y Mian (2023)	Bangladesh; woodlots.	DBH promedio: 18.9 cm; densidad: 1233 árboles ha^{-1} ; biomasa total: 237.7 Mg ha^{-1} ; carbono total: 118.89 Mg C ha^{-1} ; CO_2e : 436.3 Mg ha^{-1} .	Biomasa total estimada: 186.25 Mg ha^{-1} ; carbono total estimado: 86.50 Mg C ha^{-1} ; CO_2e estimado: 317.18 Mg ha^{-1} .	El modelo estima valores menores, pero dentro de un rango plausible. Las diferencias pueden deberse a escala, área basal, edad, densidad y método de estimación.
Khan <i>et al.</i> (2018)	Bangladesh; plantaciones bajo diferentes densidades.	Carbono total -aéreo + subterráneo- entre 34.4 y 351.9 Mg C ha^{-1} ; media: 120.2 Mg C ha^{-1} .	Con condiciones promedio similares a Bangladesh, el modelo estima 86.50 Mg C ha^{-1} .	La estimación se ubica dentro del rango publicado, aunque por debajo de la media, lo que refuerza la importancia de la estructura del rodal.
Racelis <i>et al.</i> (2019)	Filipinas; plantación protegida.	Biomasa total: 1120 Mg ha^{-1} ; carbono total: 542 Mg C ha^{-1} ; CO_2 : 1989 Mg ha^{-1} .	Las estimaciones del modelo costarricense son inferiores para diámetros y densidades comparables.	Representa un extremo superior de acumulación bajo condiciones favorables de sitio, edad y protección; no es directamente comparable con modelos de árbol individual.

Nota. Las estimaciones con el modelo del presente estudio se obtuvieron al aplicar las ecuaciones de biomasa total, carbono total y, cuando correspondió, biomasa aérea a los valores de diámetro y densidad reportados en cada fuente. El CO_2 equivalente se calculó mediante el factor 44/12. Las comparaciones deben interpretarse con cautela debido a diferencias en edad, densidad, sitio, escala de análisis, componentes incluidos y método de estimación. Para Rueda-Sánchez *et al.* (2014), la comparación se realizó con biomasa aérea estimada a partir de los componentes fuste, ramas y hojas, debido a que ese estudio no incluyó biomasa radical.



En conjunto, la comparación con estudios publicados (**Cuadro 5**) indica que los modelos desarrollados para Costa Rica generan estimaciones coherentes dentro del rango documentado para *S. macrophylla* en plantaciones tropicales. La cercanía con los valores que reportaron Rueda Sánchez *et al.* (2014) para plantaciones mexicanas de edad y diámetro relativamente similares respalda la capacidad del modelo para reproducir estimaciones aéreas comparables. En contraste, las diferencias frente a los valores reportados en Bangladesh y Filipinas reflejan el efecto de la escala de análisis, la densidad, la edad, el área basal, el sitio y el manejo del rodal. Por tanto, el modelo no debe interpretarse como una ecuación universal para la especie, sino como una herramienta local, transparente y verificable que puede mejorar la estimación de biomasa, carbono y CO₂ equivalente cuando se integra con inventarios de campo representativos.

4.5 Implicaciones para Costa Rica, inventarios de GEI y mercados de carbono

Para Costa Rica, donde las plantaciones forestales forman parte de la agenda de restauración productiva, bioeconomía y mitigación climática, disponer de modelos específicos para *S. macrophylla* tiene implicaciones prácticas. Primero, permite reducir la incertidumbre en estimaciones de biomasa y carbono de plantaciones comerciales, al evitar la transferencia acrítica de ecuaciones desarrolladas para otras especies, regiones o condiciones de manejo. Segundo, fortalece la posibilidad de incorporar plantaciones de caoba en sistemas de monitoreo, reporte y verificación, en especial cuando se requiere demostrar consistencia metodológica. Tercero, ofrece herramientas para valorar no solo el volumen maderable, sino también el carbono acumulado en componentes no comerciales, como ramas y raíces.

El estudio también plantea una advertencia para los proyectos de carbono: la precisión estadística de una ecuación no equivale automáticamente a integridad climática. Para que estos modelos sean utilizados en esquemas de carbono, deben integrarse con información adicional sobre línea base, adicionalidad, permanencia, fugas, riesgo de reversión y trazabilidad del manejo.

En este contexto, las ecuaciones alométricas son una condición necesaria, pero no suficiente. Su valor radica en proveer una base biofísica sólida para que las decisiones de política, inversión y certificación no descansen sobre factores genéricos, sino sobre mediciones locales verificables.

Las ecuaciones son apropiadas para árboles dentro del intervalo diamétrico y las condiciones de sitio representadas en el muestreo; su extrapolación a árboles de mayor diámetro, plantaciones de mayor edad, sistemas agroforestales mixtos o regiones climáticas distintas requerirá validación adicional. La fortaleza de un modelo no radica en pretender universalidad, sino en declarar con claridad el dominio ecológico y estadístico dentro del cual produce estimaciones confiables.

5. Conclusiones

Este estudio aporta modelos alométricos específicos para estimar biomasa y carbono en árboles plantados de *Swietenia macrophylla* en Costa Rica, aplicables dentro del rango diamétrico evaluado. El uso del diámetro normal como variable predictora permite generar estimaciones



operativas y reproducibles para inventarios forestales, al reducir la dependencia de ecuaciones genéricas desarrolladas para otras especies o regiones.

La inclusión de fuste, ramas, hojas y raíces permitió caracterizar la partición de biomasa del árbol completo. Los resultados confirman el predominio del fuste como principal reservorio estructural, pero también evidencian la importancia de la biomasa radical en la estimación total. Esta aproximación amplía la interpretación del carbono almacenado en plantaciones de caoba, al incorporar componentes que suelen ser omitidos o estimados mediante factores generales.

La determinación de la fracción de carbono por componente fortalece la trazabilidad de la conversión de biomasa a carbono. Al evitar la dependencia exclusiva de un factor único de conversión, los modelos desarrollados ofrecen una base más precisa para estimaciones de carbono en plantaciones tropicales y para su eventual integración en sistemas de monitoreo, reporte y verificación.

La comparación con datos publicados para *S. macrophylla* en México, Bangladesh y Filipinas confirma que las estimaciones generadas para Costa Rica se ubican dentro del rango documentado para la especie en plantaciones tropicales. La mayor concordancia con plantaciones mexicanas de edad y diámetro relativamente similares respalda la coherencia externa del modelo, mientras que las diferencias con estudios a escala de rodal en Asia evidencian que la acumulación de carbono por hectárea depende de la interacción entre densidad, área basal, edad, sitio y manejo.

En conjunto, el estudio proporciona una referencia regional para mejorar la contabilidad de carbono en plantaciones de caoba en Costa Rica. Su aplicación debe circunscribirse al rango diamétrico y a las condiciones evaluadas, mientras que futuras validaciones en otros sitios, edades y arreglos productivos permitirán ampliar su uso en estrategias nacionales de mitigación climática y manejo forestal sostenible.

6. Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento al Dr. rer. nat. Tobias Biechele, CEO de Novelteak Costa Rica S.A., por el valioso apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación, así como por la donación de los árboles que hicieron posible la ejecución de las actividades de campo y el cumplimiento de los objetivos planteados. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a las personas propietarias de las plantaciones forestales que, de manera generosa y desinteresada, facilitaron árboles para la realización de este estudio. Su colaboración fue fundamental para contar con el material necesario y avanzar en la generación de conocimiento científico aplicado al sector forestal. Finalmente, a las personas revisoras externas y el equipo editorial que permitieron mejorar la versión final del artículo.



7. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto en el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo, que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos.

8. Referencias

- Akhilraj, T. y Inamati, S. (2023). Growth and carbon stock assessment of different aged mahogany plantations in hilly zone of Karnataka. *The Pharma Innovation*, 12(8), 232-233. DOI:10.22271/tpi.2023.v12.i8c.21914
- Aquino, M., Velázquez, A., Castellanos, J. F., los Santos, D. y Etchevers, J. D. (2015). Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia*, 49(3), 299-314. <https://www.researchgate.net/publication/317440442>
- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G., Lewis, S., Phillips, O., Asner, G., Armston, J., Ashton, P., Banin, L., Bayol, N., Berry, N., Boeckx, P., de Jong, B., Devries, B., Girardin, C., Kearsley, E., Lindsell, J., Lopez, G., Lucas, R., Malhi, Y., Morel, A., Mitchard, E., Nagy, L., Qie, L., Quinones, M., Ryan, C., Ferry, S., Sunderland, T., Vaglio, G., Cazzolla, R., Valentini, R., Verbeeck, H., Wijaya, A. y Willcock, S. (2016). An Integrated Pan-Tropical Biomass Map Using Multiple Reference Datasets. *Global Change Biology*, 22(4), 1406-20. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.13139>
- Bueno, S. W., García, E. y Caraballo, L. R. (2019). Allometric equations for total aboveground dry biomass and carbon content of *Pinus occidentalis* trees. *Madera Bosques*, 25(3), 1-16. <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v25n3/2448-7597-mb-25-03-e2531868.pdf>
- Chave, J., Réjou, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P., Goodman, R., Henry, M., Martínez, A., Mugasha, W., Muller, H., Mencuccini, M., Nelson, B., Ngomanda, A., Nogueira, E., Ortiz, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C., Saldarriaga, J. G. y 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>
- Cifuentes, M., Henry, M., Méchain, M., López, O., Wayson, C., Michel, J. M., Castellanos, E., Zapata, M., Piotto, D., Alice, F., Castañeda, H., Cuenca, R., Cueva, K., del Águila, J., Duque, A., Fernández, J., Jiménez, A., Gunnar, L., Milla, F., Nívar, J., Ortiz, E., Pérez, J., Ramírez, C., Rangel, L., Rubilar, R., Saint, A. L., Sanquetta, C., Scott, Ch. y Westfal, J. (2015). Overcoming obstacles to sharing data on tree allometric equations. *Annals of Forest Science*, 72, 789-794. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0467-8>



- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2019). Red Global de Laboratorios de Suelos: carbono total del suelo. Método de combustión seca Dumas. 12 pp.
- Forrester, D. I., Tachauer, H. H., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz, R., Stark, H., Vacchiano, G., Zlatanov, T. y Chakraborty, T. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *For. Ecol. Manage.*, 396, 160-175. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>
- García C., X., S. Rodríguez B. y J. Islas G. (2011). Evaluación financiera de plantaciones forestales de caoba en Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2, 7-26. DOI:[10.29298/rmcf.v2i7.562](https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.562)
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Volumen 4, Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf
- Khan, M. N. I., Shil, M. C., Azad, M. S., Sadath, M. N., Feroz, S. M. y Mollick, A. S. (2018). Allometric relationships of stem volume and stand level carbon stocks at varying stand density in *Swietenia macrophylla* King plantations, Bangladesh. *Forest Ecology and Management*, 430, 639-648. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.002>
- Krisnawati, H., Kallio, M. H. y Kanninen, M. (2011). *Swietenia macrophylla* King: Ecology, silviculture and productivity. CIFOR, Bogor, Indonesia. <https://doi.org/10.17528/cifor/003395>
- Paul, N. C., Chavan, S., Gurav, S., Ponnaganti, N., Morade, A., Kakade, V., Jorvekar, N., Kumar, K. R., Salunkhe, V. S., Uthappa, A. y Reddy, K. S. (2025). Biomass Estimation of Mahogany (*Swietenia macrophylla*): An Optimized Weighted Ensemble-based Machine Learning Approach. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101616. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101616>
- Picard, N., Saint, L. y Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement [CIRAD]. <http://www.fao.org/3/i3058s/i3058s.pdf>
- Pitol, M. N. S., Khan, M. Z. y Khatun, R. (2019). Assessment of total carbon stock in *Swietenia macrophylla* woodlot at Jhenaidah District in Bangladesh. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 2(3), 1-10. <https://doi.org/10.9734/AJRAF/2018/46922>
- Pitol, M. N. S. y Mian, M. B. (2023). High carbon storage and oxygen (O₂) release potential of Mahogany (*Swietenia macrophylla*) woodlot plantation in Bangladesh. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(1), 103498. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103498>



- Puc-Kauil, R., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R., Reyes-Hernández, V. J., Dupuy-Rada, J. M., Schneider, L., Pérez- Rodríguez, P. y García-Cuevas, X. (2020). Allometric equations to estimate aboveground biomass of small-diameter mixed tree species in secondary tropical forests. *iForest*, 13, 165-174. <https://doi.org/10.3832/ifor3167-013>
- Racelis, E. L., Racelis, D. A. y Luna, A. C. (2019). Carbon sequestration by large leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) plantation in mount makiling forest reserve, Philippines: A decade after. *Journal of Environmental Science and Management*, 22(1), 67-76. https://doi.org/10.47125/jesam/2019_1/08
- Rueda-Sánchez, A., Gallegos Rodríguez, A., González Eguiarte, D., Ruiz Corral, J. A., Benavides Solorio, J. D. D., López Alcocer, E. y Acosta Mireles, M. (2014). Estimación de biomasa aérea en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 8-17. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i25.300>
- Ramos, J. A., García, J. J., Hernández, J., García, X., Velarde, J. C., Muñoz, H. y Guadalupe, G. (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 93-109. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/344>
- Segura, M. y Andrade, H. (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*, 46, 89-96. http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6935/Como_construir_modelos_alometricos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Silva, P., A. J., M. de L. Pinheiro R., M. Lopes da S., O. Shigueo O., V. Silva de M., E. R. de Oliveira, M. Barroso E., S. Mohamad B., G. A. Ruffeil A. y A. K. da Silva L. (2015). Nutrient levels and incidence of *Hypsipyla grandella* (Zeller) (Lepidoptera: Pyralidae) attack in young *Swietenia macrophylla* King (Meliaceae) plants exposed to lime and boron levels. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 13(2), 283-290.

