

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

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

William Fonseca González^{1*}, Víctor Meza Picado², Orlando Chinchilla Mora³

*Autor para correspondencia

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 jóvenes de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Costa Rica. **[Metodología]:** Se realizó un muestreo destructivo de 49 árboles, abarcando un rango diamétrico de 4.9 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 modelos de regresión simple utilizando el diámetro normal como variable predictora, seleccionando 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 presentando 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 fue 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*, facilitando su aplicación en la gestión forestal.

Palabras clave: alometría, Costa Rica, factores expansión biomasa, modelos de biomasa, modelos de regresión, partición de biomasa, servicios ambientales.

¹ doctor, Ingeniero forestal, docente e investigador de la Escuela de Ciencias Ambientales e Instituto de Investigación y Servicios Ambientales, 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 Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. victor.meza.picado@una.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0002-8223-4761>.

³ Licenciado, docente e investigador del Instituto de Investigación y Servicios Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. orlando.070861.mora@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7336-3828>.

Abstract

[Introduction]: Forest plantations are important carbon sinks and reservoirs, contributing to society through various goods and environmental services. **[Objective]:** This study aimed to develop models to estimate tree and component biomass and carbon in young *Swietenia macrophylla* plantations in Costa Rica. **[Methodology]:** A destructive sampling of 49 trees was conducted, covering a diameter range from 4.9 to 42.9 cm. Trees were felled and separated into their components (leaves, branches, trunk, and roots). The fresh weight of each component was recorded, and samples were taken to determine dry matter in the laboratory. A database was created to test simple regression models using diameter at breast height as the independent variable. Models were selected based on the weighted sum of statistical indicators and graphical residual analysis. **[Results]:** The coefficient of determination (R^2) was 83.4 % with an estimation error or bias of 25 % for leaves, whereas for woody fractions and the entire tree, R^2 ranged from 94.5 % to 98.4 %, with errors below 7 %. The trunk accumulated 55.2 % of total tree biomass, branches 20.1 %, and roots 19.51 %. The biomass expansion factor for aboveground biomass was 1.54 (1.3 and 1.24 for branches and foliage, respectively), and 1.12 for roots. **[Conclusions]:** The allometric models accurately predict biomass and carbon, are easy to use.

Keywords: allometry, Costa Rica, biomass expansion factors, biomass models, regression models, biomass partitioning, environmental services.

Introducción

Las plantaciones forestales desempeñan un papel fundamental en la provisión de bienes y servicios ambientales esenciales para la sociedad, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica y la captura de carbono atmosférico (Chave et al., 2014; Avitabile et al., 2016). En un contexto de creciente preocupación por el cambio climático, el establecimiento de plantaciones con especies de alto valor maderable y capacidad de fijación de carbono (IPCC, 2006). Dentro de estos esfuerzos, la caoba (*Swietenia macrophylla* King) ha despertado gran interés debido a sus características silviculturales y a la calidad de su madera, lo que ha impulsado su establecimiento en sistemas agroforestales y plantaciones comerciales en diversas regiones tropicales (García et al., 2011; Martínez, 2015).

La biomasa de los árboles, y en consecuencia su contenido de carbono puede ser estimada mediante metodologías destructivas y no destructivas. Si bien, el análisis destructivo proporciona datos precisos, su aplicación a gran escala es inviable por su impacto ecológico y altos costos operativos (Chave et al., 2014; Cifuentes et al., 2015). En respuesta, los modelos alométricos han surgido como una herramienta eficaz para la estimación de biomasa y carbono, estableciendo relaciones matemáticas entre variables dasométricas de fácil medición, como el diámetro a la altura del pecho (Dap), la altura total y la densidad de la madera (Aquino et al., 2015; Cortés et al., 2019; Puc et al., 2020). El Dap es la variable más utilizada en estos modelos, debido a su alta correlación con la biomasa total del árbol; sin embargo, la inclusión de variables adicionales mejora la precisión de las estimaciones (Jiménez et al., 2018; Gutiérrez y Flores, 2019).

La caoba es nativa de los bosques tropicales de América y se distribuye desde México hasta Brasil, desarrollándose en una amplia gama de condiciones edafoclimáticas (Aoki, 1982; Gullison & Hubbell, 1992). No obstante, su establecimiento ha enfrentado desafíos significativos, principalmente por la susceptibilidad de la especie al ataque del barrenador *Hypsipyla grandella*, lo que ha limitado su productividad en sistemas convencionales (Lorenzi, 1998). Investigaciones recientes han sugerido que los sistemas agroforestales, donde la caoba se cultiva en asociación con cultivos como café y cacao, pueden mejorar su crecimiento y reducir la incidencia de plagas, al tiempo que optimizan la rentabilidad del sistema productivo (Martínez, 2015).

Existen estudios sobre la silvicultura de *S. macrophylla*, su desempeño en plantaciones comerciales y la respuesta a diferentes prácticas de manejo (Matos et al., 2012; Silva et al., 2015; Dunn et al., 2018), pero los trabajos enfocados en su potencial para la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono aún son limitados. Investigaciones recientes en diversas regiones han evaluado la acumulación de biomasa y carbono en esta especie, resaltando su importancia en la captura de carbono atmosférico y en la regulación del ciclo del carbono (Akhilraj & Inamati, 2023; Dinesha et al., 2024; Khan et al., 2018). No obstante, la disponibilidad de modelos alométricos específicos para plantaciones de caoba en Costa Rica no existe, lo que limita la precisión en la cuantificación de su biomasa y carbono almacenado.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la contribución en biomasa y carbono de los diferentes componentes de los árboles de *S. macrophylla* en plantaciones establecidas en Costa Rica. Para ello, se desarrollaron modelos alométricos que permitan estimar con precisión la biomasa total y por componente (fuste, ramas y follaje), así como la fracción de carbono y los factores de expansión de biomasa. Estos modelos contribuirán al diseño de estrategias de manejo forestal sostenible, facilitando la cuantificación del carbono almacenado en las plantaciones y su integración en esquemas de compensación de emisiones y mercados de carbono.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

Las plantaciones evaluadas están ubicadas 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 biofísicas de las plantaciones de *S. macrophylla* de donde se extrajeron árboles.

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

Sitio	Temperatura (°C)	Precipitación (mm*año)	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 edad 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 y 42.9 cm, el rango diamétrico con mayor tamaño de muestra fue el de 10 a 14.9 cm (18 árboles), seguido de 15 a 19.9 cm (9 individuos); en las restantes clases de diámetro la muestra varió de 1 a 6 árboles. La biomasa húmeda se estimó de forma destructiva pesando por separado la fracción del fuste, ramas, hojas y raíz. La raíz, extraída con una retroexcavadora y pulift (tipo tecla manual que funciona de forma 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). La materia seca se determinó a temperatura ambiente después de secarlas en un horno a 60 °C durante 72 horas. La biomasa seca de cada componente se trituró a 10 micras para determinar la materia orgánica (MO) con la metodología de Combustión seca Dumas (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019).

2.3 Ajuste de modelos alométricos

Los modelos se ajustaron usando el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa *Statgraphcs Centurion XVI*. Se ensayaron aproximadamente 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). El rango dimétrico de los árboles fue de 4.9 a 42.9 cm. Adicionalmente se probaron transformaciones de las variables para mejorar el ajuste y corregir la heterocedasticidad (Picard et al., 2012; Bueno et al., 2019).

La selección de la ecuación de mejor ajuste se realizó tomando en cuenta: a- la variabilidad del modelo, explicada por el coeficiente de determinación (R^2) (Puc et al., 2020), b- 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 et al., 2020) y c- 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: a- el método gráfico de dispersión entre los observados vs predichos (Puc et al., 2019), y b- el error absoluto

promedio porcentual o sesgo: $EAPP = 1/n * (\sum(P-O)/O) * 100$) (Chave et al., 2014; Forrester et al., 2017; Cortés et al., 2019; Puc et al., 2020), donde: P, la biomasa o carbono predicho o simulado; O, la biomasa o carbono observado y n, el total de datos.

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%) (Chave et al., 2014; Bueno et al., 2019; Cortés et al., 2019), error cuadrático medio (ECM) y la diferencia agregada (DA).

Finalmente, se graficaron los valores estimados contra los observados para determinar si los modelos sobreestiman o subestiman la variable respuesta. También utilizando el método gráfico se observó el comportamiento biológico de los modelos. Todos los estadígrafos calculados fueron ranqueados según su magnitud relativa tomando como referencia la metodología expuesta por 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. En todos los casos, la variabilidad (S) fue baja (0.01), lo que se reflejó en errores de muestreo (E %) inferiores a 1.05 % (**Cuadro 2**).

Este comportamiento sugiere que la fracción de carbono es relativamente estable entre los diferentes componentes del árbol, con una ligera tendencia a ser mayor en hojas y raíces. Estos valores son consistentes con estudios previos en especies tropicales, donde la fracción de carbono suele ubicarse entre 0.45 y 0.50 dependiendo del tipo de tejido y la edad del árbol.

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

*calculado a un 95% de confiabilidad

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 que indica estabilidad en la partición de biomasa entre los árboles evaluados.

El FEB mostró valores de 1.16 para el follaje, 1.38 para las ramas y 1.37 para las raíces. 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, posiblemente debido a diferencias en la fenología de los individuos muestreados (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Distribución de la biomasa por componente del árbol y factor de expansión de biomasa (FEB).

Table 3. Distribution of biomass by tree component and biomass expansion factor (BEF).

Estadístico	Biomasa (%)				FEB		
	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

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 a 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 98.4 %. En todas las ecuaciones, los parámetros de regresión fueron significativos ($\alpha = 0.05$), lo que confirma la fuerte correlación entre el Dap y la biomasa/carbono ($R > 83.4$ %). 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 que coincide con la mayor variabilidad observada en este componente.

La prueba de Durbin-Watson mostró valores óptimos, con el mejor resultado en el componente de ramas (1.67). Además, el análisis gráfico de residuos (**Figura 1b**) indicó la ausencia de autocorrelación, sugiriendo que los supuestos de normalidad e independencia de la regresión no fueron violados.

El índice de Fournival y el criterio de información de Akaike (AIC) confirmaron la robustez de los modelos, con valores bajos en la mayoría de los casos. La diferencia agregada (DA), utilizada como medida de sesgo, fue más alta en la biomasa leñosa (3.6), mientras que el error cuadrático medio (ECM) fue 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**).

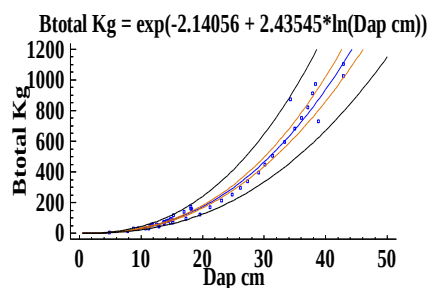
Cuadro 4. Modelos para estimar biomasa y carbono (Mg) para distintos componentes del árbol y para el árbol completo. El tamaño de la muestra fue de 49 y todos los modelos poseen una $P < 0.0001$.

Table 4. Models for estimating biomass and carbon (Mg) for different tree components and for the entire tree. The sample size was 49 and all models have a $P < 0.0001$.

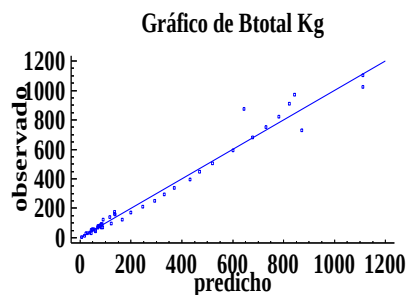
Modelo	R ²	RCME	EMA	DW	ECM	DA	IF	EAPP	AIC
Btotal = exp(-2.14056 + 2.43545*ln(Dap))	98.4	0.1606	0.1320	1.1420 (P=0.0005)	49.9	2.4	0.2	1.3	3.92
Ctotal = exp(-2.9002 + 2.43298*ln(Dap))	98.3	0.1613	0.1320	1.1543 (P=0.0006)	23.7	1.1	0.2	1.3	3.18
Bfuste = exp(-2.42506 + 2.31234*ln(Dap))	97.5	0.1891	0.1537	0.6054 (P=0.0000)	18.8	1.3	0.2	1.7	2.95
Cfuste = exp(-3.21158 + 2.31536*ln(Dap))	97.5	0.1897	0.1551	0.6090 (P=0.0000)	9.0	80.9	0.2	1.7	2.22
Bramas = exp(-5.36997 + 2.95843*ln(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*ln(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*ln(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*ln(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*ln(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*ln(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*ln(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*ln(Dap))	98.2	0.1671	0,1359	0.8032 (P=0.0000)	22.4	1.7	0.2	1.4	3.13

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

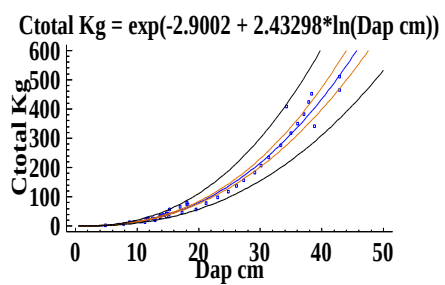
a



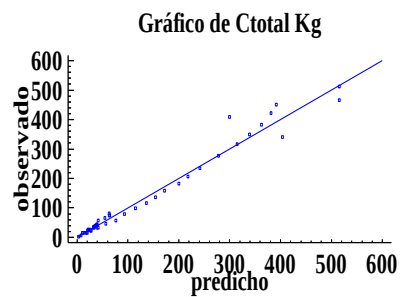
b



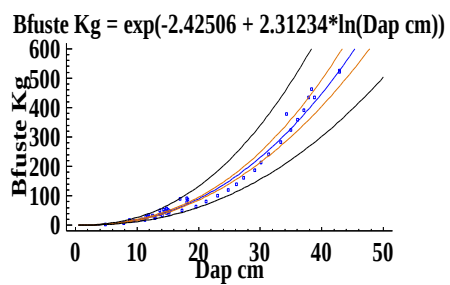
a



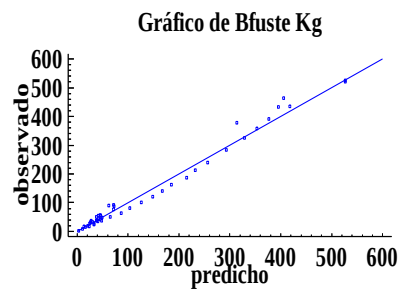
b



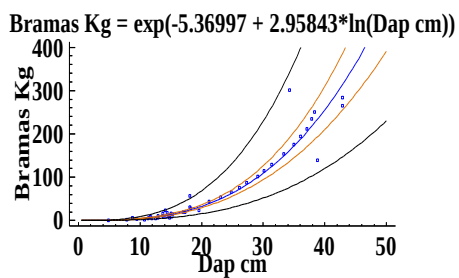
a



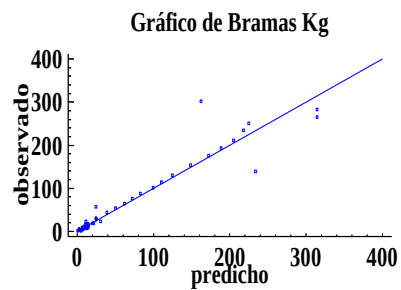
b



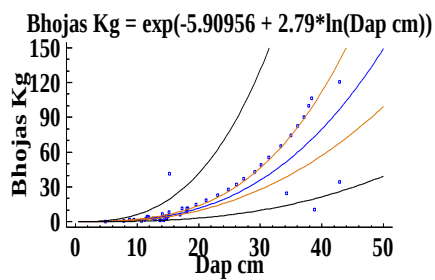
a



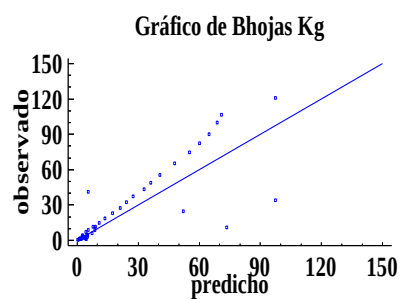
b



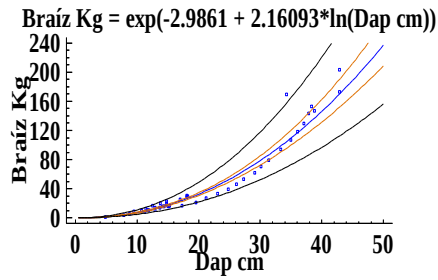
a



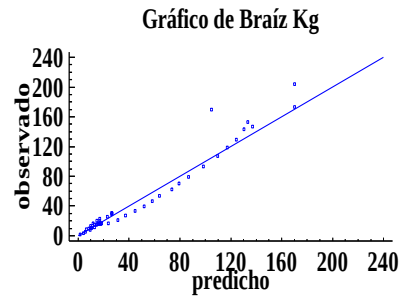
b



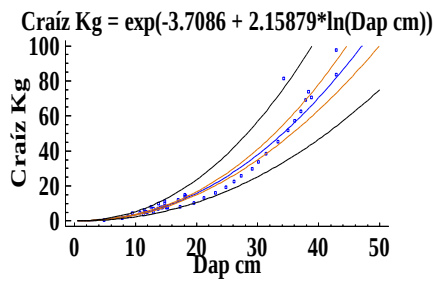
a



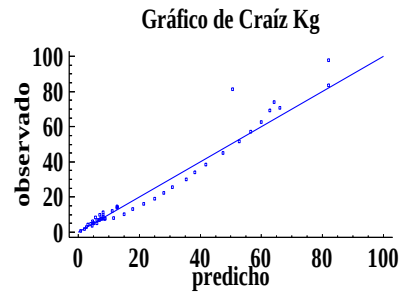
b



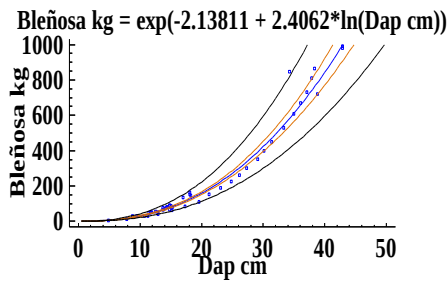
a



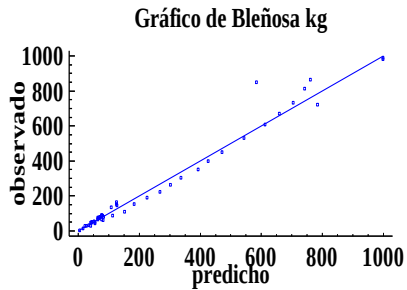
b



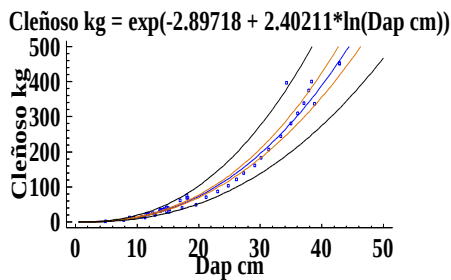
a



b



a



b

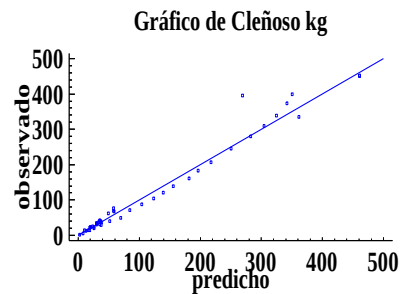


Figura 2. Modelos para estimar biomasa y carbono por componente de árbol y árbol completo: a) el gráfico para el modelo ajustado, b) el gráfico de valores predichos vs observados.

Figure 2. Models for estimating biomass and carbon by tree component and for the entire tree: a) the graph for the fitted model, b) the graph of predicted vs. observed values.

4. Discusión

4.1 Fracción de carbono por componente (FC)

Los resultados obtenidos indican que la fracción de carbono en *Swietenia macrophylla* varía entre 0.45 en ramas y 0.49 en hojas, con valores similares entre fuste (0.46) y ramas (0.45), así como entre raíz (0.48) y hojas (0.49). La baja variabilidad observada ($S=0.01$) sugiere una alta precisión en las mediciones y confirma que la FC se mantiene constante independientemente de la edad o tamaño del árbol. El follaje presenta la mayor FC (0.49), lo que contrasta con estudios previos en otras especies de plantación o en bosque natural. Por ejemplo, se han reportado valores de 0.407 en *Tectona grandis* (Fonseca et al., 2021a). Sin embargo, estudios en *Pinus montezumae* han registrado valores superiores, con 0.504, y en *Alnus jorullensis*, con 0.449 (Carrillos et al., 2014). Este hallazgo sugiere una posible particularidad de *S. macrophylla* en cuanto a su composición de carbono en hojas, que podría estar relacionada con factores fisiológicos o condiciones del sitio.

4.3 Distribución de la biomasa en el árbol y factor de expansión de biomasa (FEB)

El fuste representa el 55.2 % de la biomasa total del árbol, seguido de las ramas (20.1 %), la raíz (19.51 %) y las hojas (8.05 %). La escasa variabilidad en estos valores ($S < 9.3$) indica que los porcentajes se mantienen consistentes, al menos en árboles menores a 24 años.

Estos resultados coinciden con estudios previos en especies tanto en plantaciones como en bosques naturales, con diferencias atribuibles a la especie, edad, sitio y grado de manejo (Aquino et al., 2015; Forrester et al., 2017). Por ejemplo, en *Gmelina arborea* se han reportado proporciones de 65.6 % para el fuste, 10.9 % en ramas y 20.9 % en raíz (Fonseca et al., 2021b), mientras que en *Tectona grandis* los valores han sido de 57.5 %, 15.3 % y 22.2 %, respectivamente (Fonseca et al., 2021a). En especies de bosque natural, el fuste acumula entre 53.7 % y 55 %, las ramas entre 17 % y 22.5 % y la raíz entre 18 % y 24.1 % (Fonseca et al., 2020).

Las diferencias pueden deberse a la metodología utilizada, ya que algunos estudios consideran solo la biomasa aérea. Por ejemplo, se ha reportado un 92.01 % de biomasa en el fuste de *T. grandis* (López et al., 2018) y hasta un 96.2 % en *Pinus radiata* (Ramos et al., 2005). El FEB que se utiliza para incluir la biomasa de ramas, raíces y hojas, alcanzó cifras de 1.38 para ramas, 1.37 en raíz y 1.16 para follaje.

Khan et al. (2018) también analizaron ecuaciones alométricas para estimar el volumen del tallo y las reservas de carbono a nivel de rodal, encontrando que la densidad de plantación influye en la acumulación de carbono por área, pero no en las ecuaciones de volumen del tallo. En concordancia, nuestro estudio sugiere que la biomasa se distribuye principalmente en el fuste (55.22 %), seguido de ramas (20.10 %), raíces (19.51 %) y hojas (8.05 %), destacando la importancia del fuste en la modelación de biomasa y carbono.

4.4 Modelos para la cuantificación de la biomasa y el carbono

Para cuantificar la biomasa y el contenido de carbono, Das (2014) desarrolló modelos alométricos para estimar el área foliar (A_0) y la biomasa foliar (M_0) en plantaciones del noreste de Bangladesh. Seleccionó modelos logarítmicos corregidos para minimizar sesgos y mejorar la precisión de las estimaciones. De Dios Benavides et al. (2021) generaron ecuaciones alométricas para *Cedrela odorata* en México, destacando la relación entre el diámetro normal y la biomasa aérea con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.97,

lo que respalda el uso de estos modelos en estimaciones precisas de carbono en especies tropicales.

Los modelos seleccionados en este estudio, desarrollados a través de regresión lineal simple, utilizaron el diámetro normal como variable predictora, dado que muestra una alta correlación con la biomasa total y sus componentes (Jiménez et al., 2018; Gutiérrez y Flores, 2019). Esta metodología ha demostrado ser eficaz en diversos contextos, incluyendo especies gimnospermas (Gutiérrez y Flores, 2019), angiospermas en plantación (Jiménez et al., 2018; Montes de Oca, 2020; Fonseca et al., 2021a, b), sistemas silvopastoriles (Jiménez et al., 2019) y bosques naturales (Fonseca et al., 2019, 2020).

El coeficiente de determinación (R^2) indica que entre el 83.4 % (carbono en hojas) y el 98.4 % (biomasa y carbono total del árbol) de la variabilidad en biomasa se explica por el diámetro, reflejando un ajuste adecuado. La menor capacidad de ajuste se observó en la biomasa y carbono en follaje (83.4 %), en línea con estudios previos (Miguel et al., 2016; Fonseca et al., 2019). En especies europeas, Forrester et al. (2017) reportaron mayores dificultades para modelar ramas y follaje.

El ajuste del modelo para la biomasa total (98.4 %) es comparable con estudios en especies como *Pinus montezumae* ($R^2=0.99$; Carrillo et al., 2014) y *Alnus jorullensis* ($R^2>0.93$; Carrillos et al., 2014), y superior a valores reportados para *T. grandis* en Guatemala con un 77 % (López et al., 2018).

En la biomasa del fuste, ramas y raíz, el ajuste varió entre 94.5 % y 98.2 %, valores similares a los registrados en *Trichospermum mexicanum* ($R^2=0.96$ en fuste, 0.86 en ramas y 0.88 en raíz; (Montes de Oca, 2020) y *Pinus ayacahuite* (0.97 en fuste, 0.91 en hojas y ramas; Miguel et al., 2016).

La modelación de la biomasa en raíz ($R^2=96.6$ %) resalta la importancia de este estudio, ya que esta fracción suele ser poco considerada en evaluaciones de biomasa (Fonseca et al., 2021b). Todos los modelos cumplen el criterio de error establecido por Jiménez et al. (2018), con un sesgo inferior al 25 % (excepto el componente hojas) y un error cuadrático medio dentro de los límites recomendados por Husch (1963).

5. Conclusiones

La fracción de carbono en *Swietenia macrophylla* se mantiene relativamente constante entre los diferentes componentes del árbol, edad o tamaño del árbol, con valores entre 0.45 y 0.49. Destaca el follaje con la mayor fracción de carbono (0.49), lo que podría estar influenciado por factores fisiológicos o condiciones del sitio. Estos resultados son consistentes con estudios previos en otras especies, aunque algunas diferencias sugieren particularidades propias de *S. macrophylla*.

La mayor parte de la biomasa se concentra en el fuste (55.2 %), seguido por ramas (20.1 %), raíz (19.51 %) y hojas (8.05 %), con escasa variabilidad entre árboles. Esta distribución es consistente con estudios previos en bosques naturales y plantaciones. Los valores del factor de expansión de biomasa (1.38 para ramas, 1.37 para raíz y 1.16 para follaje) se encuentran dentro del rango reportado para otras especies, lo que valida su aplicación en estimaciones de biomasa total.

Los modelos ajustados con regresión lineal simple utilizando el diámetro normal como variable predictora mostraron altos coeficientes de determinación (R^2 entre 83.4 % y 98.4 %), lo que confirma su fiabilidad para estimar biomasa y carbono en *S. macrophylla*. El mejor ajuste en hojas es coherente con dificultades reportadas en otros estudios, pero el modelo

para la biomasa total alcanzó un ajuste del 98.4 %, comparable con especies ampliamente estudiadas.

Los resultados obtenidos permiten mejorar las estimaciones de biomasa y carbono en *S. macrophylla*, aportando información clave para estrategias de manejo forestal sostenible y planes de mitigación del cambio climático. La consideración de la biomasa en raíz, a menudo subestimada en estudios previos, resalta la importancia de incluir esta fracción en evaluaciones futuras.

6. Agradecimientos

7. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante 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 bibliográficas

- Aoki, H., (1982). Consideraciones sobre la preservación de cerrados. Anales del congreso nacional sobre especies nativas. Revista del Instituto Forestal, Sao Paulo, Brasil.
- Braun-Bianquet, J., 1979: Fitosociología, bases para el estudio de las comunidades vegetales. H. Blume Ediciones, Madrid, España.
- Akhilraj, T., & Inamati, S. (2023). Growth and carbon stock assessment of different aged mahogany plantations in hilly zone of Karnataka. *The Pharma Innovation*, 12(8).
- Aquino, M., Velázquez, A., Castellanos, J F., los Santos, D., 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., 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., 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>

- Carrillos, F., Acosta, M., Flores, E., Juárez, J. E. y Bonilla, E. (2014). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5 (5), 779-793.
- 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., 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., Návar, J., Ortiz, E., Pérez, J., Ramírez, C., Rangel, L., Rubilar, R., Saint, A L., Sanquetta, C., Scott, Ch., Westfal, J. (2015). Overcoming obstacles to sharing data on tree allometric equations. *Annals of Forest Science*. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0467-8>
- Cortés, B G., Ángeles,G., Santos, H M., Ramírez, H. (2019). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y Bosques*, 25(2),1-17. <http://doi:10.21829/myb.2019.2521799>.
- Das, N. (2014). Allometric Modeling for Leaf Area and Leaf Biomass Estimation of *Swietenia mahagoni* in the North-eastern Region of Bangladesh. *Journal of Forest and Environmental Science*, 30(4), 351–361. <https://doi.org/10.7747/jfes.2014.30.4.351>
- De Dios Benavides, J., García, O. T., Garnica, J. G. F., Mireles, M. A., & Sánchez, A. R. (2021). Allometric equations for estimating biomass and aerial carbon from *Cedrela odorata* L. in forest plantations. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.791>
- Dinesha, S., Panda, M. R., Pradhan, D., Rakesh, S., Dey, A. N., Bhat, J. A., & Pandey, R. (2024). Ecosystem carbon budgeting under *Swietenia macrophylla* King plantation in sub humid foothills of Eastern Himalayans of India. *Environment, Development and Sustainability*, 26(2), 4661–4677. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02902-6>
- Dunn, B., H. Singh and C. Goad. (2018). Relationship between chlorophyll meter readings and nitrogen in poinsettia leaves. *Journal of Plant Nutrition* 41(12):1566-1576. DOI:10.1080/01904167.2018.1459697
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). R E D G L O B A L D E L a B O R A t o R I O D E S U E L CARBONO TOTAL DEL SUELO Método de combustión seca Dumas. 12 pp.
- Fonseca, W., Alice, F., Villalobos, R. (2020). Modelos de biomasa y carbono en ecosistemas forestales naturales en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 19(2),84-128.
- Fonseca, W., Ávila, C., Murillo, R., Rojas, M. (2021a). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia Forestal*, 24 (1), 31-44.

- Fonseca, W., Murillo, R., Ávila, C., Rojas, M. Spinola, M. (2021b). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Revista Ciencias Ambientales*, 55(1),143-159.
- Fonseca, W., Villalobos, R., Rojas, M. (2019). Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2),111-131. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.6>
- Forrester, D I., Tachauer, H H., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz, R., Stark, H., Vacchiano, G., Zlatanov, T., 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: 10.1016/j.foreco.2017.04.011](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. *Rev. Mex. Cienc. For.* 2: 7–26.
- Gutiérrez, B., Flores, A. (2019). Captura de carbono y modelos alométricos para estimar biomasa en rodales naturales de *Pinus oocarpa* Schl. et Cham. en Chiapas, México. *Revista Forestal Veracruzana*, 20(2),21-28. https://www.researchgate.net/publication/333866308_CAPTURE_DE_CARBONO_Y_MODELOS_ALOMETRICOS_PARA_ESTIMAR_BIOMASA_EN_RODALES_NATURALES_DE_Pinus_oocarpa_Schl_et_Cham_EN_CHIAPAS_MEXICO
- Husch, B. (1963). *Forest mensuration and statistics*. Ronald press, New York. 474 p.
- 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
- Jiménez, E., Fonseca, W., Pazmiño, L. (2019). Sistemas silvopastoriles y cambio climático: Estimación y predicción de biomasa arbórea. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1),45-55. <http://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.04>
- Jiménez, L D., Valverde, J C., Arias, D. (2018). Determinación del mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea* Roxb. procedente de plantaciones con manejo de rebrotes. *Revista Forestal Kurú*, 15 (Supl. 01),53-60. DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3775
- López, H., Vaides., E. y Alvarado, A. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1),137-153.
- Khan, M. N. I., Shil, M. C., Azad, M. S., Sadath, M. N., Feroz, S. M., & 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(September), 639–648. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.002>

- Martínez, H. (2015). Especies para sistemas agroforestales: condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. 52 p.
- Matos V., I. de J., A. K. da Silva L., M. F. da Silva R., R. L. Morais da C., D. A. Capucho F., C. F. de Oliveira N., H. E. Oliveira da C., E. M. Silva G., G. A. Ruffeil A. and S. P. da Silva. (2012). Visual symptoms and growth parameters linked to deficiency of macronutrients in young *Swietenia macrophylla* plants. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(1):937-940. http://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/unesp_jaboticabal/omissao_mogno2.pdf
- Miguel, A., Rodríguez, G., Enríquez, J R., Pérez, M I., Castañeda, E., Santiago, W. (2016). Factores de expansión de biomasa aérea de *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7),1575-1584. https://www.researchgate.net/publication/322693994_Factores_de_expansion_de_biomasa_aerea_para_Pinus_ayacahuite_del_norte_de_Oaxaca
- Montes de Oca, E., Salvador, A., Nájera, J. A., Corral, S., Graciano, J. J., Méndez, J. (2020). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Trichospermum mexicanum* (DC.) Baill. *Colombia Forestal*, 23(2), 89-98.
- Picard, N., Saint, L., 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>
- Puc, R., Ángeles, G., Valdez, J R., Reyes, V J., Dupuy, J M., Schneider, L., Pérez, P., García, X. (2019). Species-specific biomass equations for small-size tree species in secondary tropical forests. *Trop Subtrop Agroecosystems*, 22(3),735-754. <https://www.researchgate.net/publication/337682547>
- Racelis, E. L., Racelis, D. A., & 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
- Ramos, J A., García, J J., Hernández, J., García, X., Velarde, J C., Muñoz, H., 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. <http://doi.org/10.29298/rmcf.v5i23.344>
- Segura, M., 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. and 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.
<http://www.itto.int/files/user/cites/brazil/Article%20published%20in%20April%202015.pdf>
- Silva, A. T. da S., Siqueira, R. S., Mariano, D. de C., Okumura, R. S., Silva, K. J. S. da, Kohler, S. V., & Ebling, Â. A. (2021). Carbon accumulation in the biomass of brazilian mahogany plants (*Swietenia macrophylla*) in reforestation area. *Brazilian Journal of Development*, 7(5), 51070–51082. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-483>