



MODELOS PARA ESTIMAR LA BIOMASA AÉREA VERDE DE *DYCHROSTACHYS CINEREA* VAR. *AFRICANA* BRENAN & BRUMMITT

MODELS TO ESTIMATE THE AIR GREEN BIOMASS OF *DYCHROSTACHYS CINEREA* VAR. *AFRICANA* BRENAN & BRUMMITT

ALBERTO M. VIDAL CORONA^{1*}, JOSÉ ANTONIO BRAVO IGLESIAS², WILMER TOIRAC ARGUELLE²,
ANDRÉS HERNÁNDEZ RIQUENE³, ROLANDO PADRÓN PÉREZ²

¹Unidad Científico Tecnológica de Base Estación Experimental Agro-Forestal Camagüey, Camagüey, Cuba.

²Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, La Habana, Cuba.

E-mail: wilmer@foresteles.co.cu, bravo@foresteles.co.cu, rpadron@foresteles.co.cu

³Unidad Científico Tecnológica de Base Estación Experimental Agro-Forestal Placetas, Villa Clara, Cuba. E-mail: andres@foresteles.co.cu

*Autor para correspondencia: vidal56@nauta.cu

RESUMEN

La estimación precisa de la biomasa forestal es crucial para su aprovechamiento energético y sostenible. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar modelos matemáticos para estimar la biomasa aérea verde de *Dychrostachys cinerea* var. *africana* (marabú) en Cuba, con el fin de facilitar su uso en inventarios nacionales y promover su empleo como fuente de energía. Se seleccionaron tres localidades en Camagüey, donde se establecieron 98 parcelas temporales de 25 m² para medir la biomasa aérea total verde. Se utilizaron ecuaciones lineales, polinómicas y logarítmicas para modelar la biomasa de ramas, fuste y total, ajustadas mediante el programa InfoStat. Los modelos mostraron coeficientes de determinación ajustados superiores al 85%, excepto para la biomasa del fuste (57.3%), y fueron altamente significativos. Los resultados indicaron que los modelos logarítmicos, basados en el diámetro de la base, son eficientes y prácticos para estimar la biomasa. Estos modelos difirieron de estudios previos en otras especies, destacando su aplicabilidad específica para el marabú. Se concluyó que los modelos desarrollados son herramientas valiosas para la gestión de biomasa con fines energéticos, tanto a nivel nacional como internacional, en regiones donde esta especie es utilizada para la producción de energía.

Palabras clave: biomasa forestal, modelos matemáticos, marabú, energía renovable, inventario forestal

INTRODUCCIÓN

Históricamente, la biomasa forestal y los residuos de los cultivos agrícolas han sido ampliamente utilizados como fuentes de energía para la producción de calor. Este uso incluye su empleo como combustible en hogares

ABSTRACT

Accurate estimation of forest biomass is crucial for its sustainable energy use. This study aimed to develop mathematical models to estimate the green aboveground biomass of *Dychrostachys cinerea* var. *africana* (marabou) in Cuba, to facilitate their use in national inventories and promote their use as an energy source. Three locations in Camagüey were selected, where 98 temporary plots of 25 m² each were established to measure total green aboveground biomass. Linear, polynomial, and logarithmic equations were used to model branch, stem, and total biomass, adjusted using InfoStat software. The models showed adjusted coefficients of determination above 85%, except for stem biomass (57.3%), and were highly significant. The results indicated that logarithmic models, based on base diameter, are efficient and practical for biomass estimation. These models differed from previous studies on other species, highlighting their specific applicability to marabou. It was concluded that the models developed are valuable tools for biomass management for energy purposes, both nationally and internationally, in regions where this species is used for energy production.

Keywords: forest biomass, mathematical models, marabou, renewable energy, forest inventory

residenciales, panaderías y herrerías. Durante el siglo XX, la biomasa también se consolidó como materia prima para la industria química, principalmente a través de la destilación de la madera. Además, su relevancia se extiende al sector de la construcción y a la industria del mueble, donde representa un material de alto interés económico (Martínez, 2009).

Recibido: 23/9/2022

Aceptado: 23/10/2022



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



En Cuba, los estudios sobre la estimación de la biomasa forestal con fines energéticos e industriales han sido destacados. Vidal (1995) desarrolló el Método Multipropósito de Estimación de Biomasa de Copa, el cual permite evaluar la biomasa de especies como *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari, y *Pinus tropicales* Morelet. Por su parte, Rodríguez (1999) creó modelos para estimar la biomasa verde de copa de *Eucalyptus saligna* Smith y *Eucalyptus pellita* F. Muell. Benítez (2007) realizó contribuciones similares para plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst, mientras que Toirac (2014) lo hizo para *Pinus maestrensis* Bisse. Estos autores coinciden en que los estudios se han limitado a un reducido grupo de especies y, en algunos casos, no se han cuantificado todos los componentes de la biomasa, lo que evidencia la necesidad de continuar investigando esta temática.

Además de las formaciones boscosas presentes en el territorio nacional, existen extensas áreas invadidas por *Dychrostachys cinerea* var. *Africana* Brenan & Brummitt (marabú), según la clasificación de Greuter & Rankin (2017). Esta especie se ha propagado principalmente en zonas agrícolas, cañeras, ganaderas y forestales. En la última década, su aprovechamiento ha aumentado significativamente, especialmente para la producción de carbón vegetal destinado al consumo nacional y la exportación.

Actualmente, se dispone de un censo de las áreas infestadas de marabú y algunos reportes preliminares sobre la cuantificación de su biomasa en Cuba. Estos datos han permitido realizar estimaciones iniciales, pero es necesario llevar a cabo un inventario más preciso para determinar la biomasa existente de esta especie. Asimismo, se conoce la composición de esta biomasa, la cual, una vez cosechada y procesada, podría utilizarse como combustible alternativo en centrales azucareros, complementando así la biomasa cañera (SODePAZ, 2012).

El objetivo principal de esta investigación fue definir modelos matemáticos para estimar la biomasa aérea verde de *Dychrostachys cinerea* var. *Africana* Brenan & Brummitt. Estos modelos están destinados a ser utilizados en los

inventarios nacionales de esta especie, con el fin de promover su aprovechamiento energético.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en las localidades de “La Lola”, “Nazareno Norte” y “Rincón Hondo”, ubicadas en el municipio Carlos Manuel de Céspedes, provincia de Camagüey, Cuba. Estas áreas fueron seleccionadas por su cobertura de marabú en diferentes etapas de crecimiento, lo que permitió analizar la biomasa aérea en condiciones variadas. La investigación se enfocó en medir la biomasa aérea total verde con corteza, utilizando un enfoque metodológico riguroso.

Para la medición de la biomasa, se implementó un muestreo aleatorio simple en el que se establecieron 98 parcelas temporales de 25 m². En cada parcela, se midió el diámetro de la base de todos los individuos y se calculó el diámetro medio de la base mediante la fórmula:

$$\bar{d}_{base} = \sum_{i=1}^n \frac{d_{base}}{n}$$

Donde:

$\bar{d}_{base}$: diámetro medio de la base

d base: diámetro de la base de cada individuo

n: número de observaciones

Posteriormente, los árboles fueron derribados, desfoliados y desramados para proceder al pesaje de las ramas y el fuste. En el proceso de recopilación de datos en campo, se utilizaron diversos instrumentos y medios de trabajo, como motosierra, cinta diamétrica, cinta métrica de 30 m, mantas de 4 x 2 m, sogas de 8 m, machetes y una balanza de brazo con capacidad de 100 kg.

Ajuste y selección de modelos

En la fase de ajuste y selección de modelos, se emplearon 62 muestras para el ajuste y 36 para la validación, utilizando un nivel de significación del 5 %. Para la modelación matemática de la biomasa de rama verde (Br), fuste verde (Bf) y biomasa aérea total verde (Bt), se seleccionaron cuatro ecuaciones, las cuales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones para modelar la biomasa total y sus componentes

Modelo	Expresión matemática del modelo
Lineal	$Y = a + b X$
Polinomio de 2 ^{do} Grado	$Y = a + bX + cX^2$
Polinomio de 3 ^{er} Grado	$Y = a + b X + cX^2 + dX^3$
Logarítmico	$L_n Y = a + b \ln X$

La construcción de los modelos se realizó mediante el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2014). Para evaluar la bondad de ajuste de los modelos, se consideraron criterios estadísticos básicos establecidos en la literatura internacional, como el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajust), el sesgo o diferencia agregada (DA), el error medio cuadrático (CME), el error medio en valor absoluto (EMA), la significación estadística del modelo y de los parámetros, el error estándar del modelo (EEE), el error estándar de los estimadores de los parámetros, el estadístico Durbin-Watson (D-W) y el índice de Furnival (IF). Estos criterios fueron reportados por autores como Furnival (1961), Alder & Cailliez (1980), Prodan et al. (1997), Kiviste et al. (2002), Guerra et al. (2003), Torres & Ortiz (2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los modelos de biomasa seleccionados para los componentes de rama verde (Br), fuste verde (Bf) y biomasa aérea total verde (Bt) se presentan en la tabla 2. Estos modelos mostraron coeficientes de determinación ajustados superiores al 85 %, excepto en el caso de la biomasa de fuste, que alcanzó un 57,3 %. Todos los modelos resultaron altamente significativos, y en cada caso, el estadístico de Durbin Watson no mostró significancia. Además, los modelos alcanzaron los valores más bajos del índice de Furnival.

Los modelos propuestos demostraron un buen ajuste para todos los componentes de la biomasa. Utilizaron como variable predictora el diámetro en la base, lo que facilita su aplicación práctica en los inventarios forestales. Esta característica los convierte en herramientas eficientes y de manejo sencillo para la estimación de la biomasa aérea verde de marabú.

Los valores de la estimación de la biomasa de rama verde difieren de los obtenidos por Toirac (2014), con $\ln Br = -2.6285 + 2.1685 * \ln d_{normal}$ en plantaciones de *Pinus maestrensis*; Benítez (2007), con el modelo $\ln Bm = -1.39506 + 0.12428 * d_{1.3}^2 + 0.01791 * h^2$, en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* y Vidal (2002), con el modelo $\log P.M = -1.9292 + 2.6177 * \log d$ para bosques naturales de *Pinus tropicalis*. También difieren con los obtenidos por Montero & Kanninen (2002), con el modelo $Br = \exp(-5.526 + 3.026 * \ln(dap))$, para *Teminalia amazonia*, en la zona sur de Costa Rica y Fonseca et al. (2009),

con los modelos $\log(Br) = -4.28411 + 2.59073 * \log(d)$, en bosque secundario en la zona del Caribe de Costa Rica.

La estimación de la biomasa del fuste verde difiere de los resultados obtenidos por Méndez-González et al. (2011), con el modelo $Bfs = \exp(5.5910 + (-19.6455/E))$, para *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus*.

La estimación de la biomasa aérea total verde difiere de los resultados obtenidos por; Dauber et al. (2008), con el modelo $B_t = e^{(-2.4090 + 0.955 * \ln(h^2 * h * \delta))}$, para bosques naturales en Bolivia y con los de Domínguez-Cabrera et al. (2009), con el modelo $Bat = 4371.395 * (E)$, para *Quercus spp.*

Los modelos seleccionados expresan la biomasa como una función del logaritmo natural ($\ln$) del diámetro en la base (d_{base}). Las figuras 1, 2 y 3 muestran el comportamiento de los modelos logarítmicos ajustados en cada uno de los componentes del árbol, destacándose el agrupamiento de los valores observados a diferentes diámetros en la base.

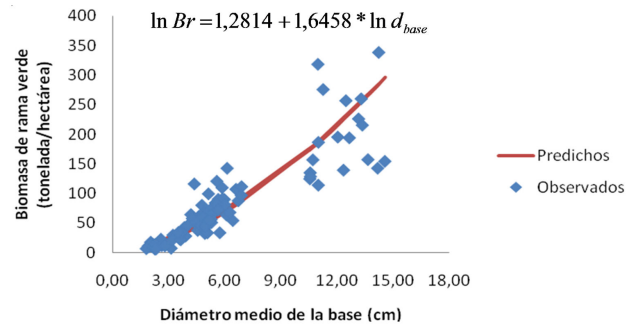


Figura 1. Modelo logarítmico de Biomasa Verde de Rama.

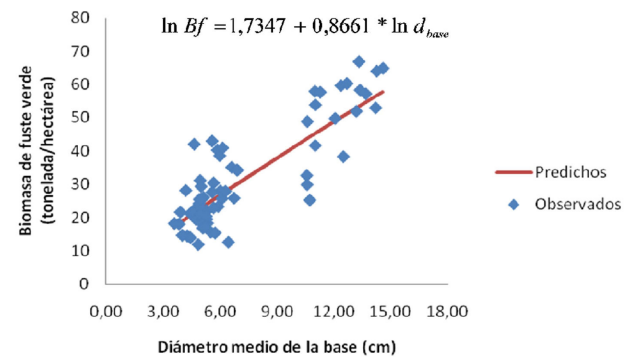


Figura 2. Modelo logarítmico de la Biomasa Verde de Fuste

Tabla 2. Modelos seleccionados para la estimación de la biomasa de rama verde (Br), fuste verde (Bf) y biomasa aérea total verde (Bt).

Modelo seleccionado	R^2 ajustado (%)	IF	P. valor	D - W
$\ln Br = 1.2814 + 1.6458 * \ln d_{base}$	86,3	0.8559	***	1,74 (NS)
$\ln Bf = 1.7347 + 0.8661 * \ln d_{base}$	57,3	2,2711	***	1,95 (NS)
$\ln Bt = 1.5522 + 1.6667 * \ln d_{base}$	85,1	1,1754	***	1,74 (NS)

*** 0,001 ** 0,01 * 0,05 NS- no significativo

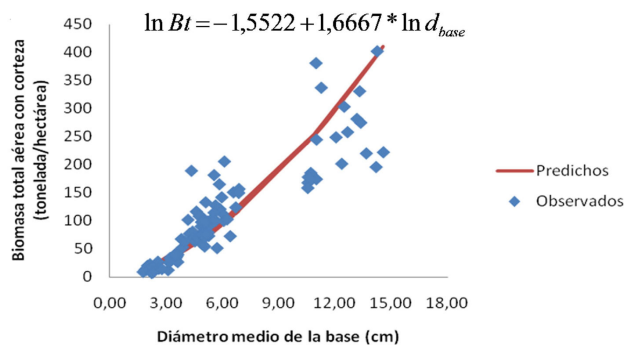


Figura 3. Modelo logarítmico de la Biomasa Verde Total

CONCLUSIONES

1. Todos los modelos seleccionados expresan la biomasa como una función del logaritmo natural (ln) del diámetro en la base (d_{base}), con coeficientes de determinación ajustados y altamente significativos y resultaron de fácil manejo práctico en su proceso de validación en el inventario de la biomasa de marabú desarrollado en el área objeto de estudio, con fines energéticos y actualmente se extiende su empleo a nivel nacional, en los municipios que se proyectan o construyen bioeléctricas sobre la base de empleo de esta especie.
2. En la literatura consultada a nivel nacional e internacional para el desarrollo de la presente investigación, no se encontraron resultados similares a los brindados, siendo posible su extensión a otros países que emplean esta especie para la producción de energía eléctrica, con vista a usarlos en los inventarios a corto, mediano y largo plazos de las disponibilidades de esta materia prima energética.

BIBLIOGRAFÍA

- Alder, D., & Cailliez, F. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. V. 1: Estimación del volumen. V. 2: Predicción del rendimiento. Estudios FAO Montes. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/5336>
- Benítez, J. Y. (2007). Estimación de la biomasa total en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst, de la provincia Camagüey, Cuba [PhD Thesis, Universidad de Pinar del Río]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=114209>
- Dauber, E., Terán, J., & Guzmán, R. (2008). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 1-10.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2014). InfoStat versión 2014. InfoStat Group, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Domínguez-Cabrera, G., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Rodríguez-Laguna, R., & Díaz-Balderas, J. A. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(1), 59-64.
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 36-47.
- Furnival, G. M. (1961). An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science*, 7, 33-34.
- Greuter, W., & Rankin, R. (2017). Plantas vasculares de Cuba. Inventario preliminar. Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin. Berlín, Alemania. Jardín Botánico Nacional, Universidad de La Habana, Cuba, 78.
- Guerra, C. W., Menéndez, E., Barrero, R., & Egaña, E. (2003). Estadística (Segunda reimpresión). Félix Varela.
- Kiviste, A., Álvarez González, A., Rojo Alboreca, A., & Ruiz González, A. D. (2002). Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Instituto de Investigaciones y Tecnología Agraria y Alimentaria. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/21328>
- Martínez, S. (2009). Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña [Tesis Doctoral, Universitat de Girona]. <https://dugi-doc.udg.edu/handle/10256/4849>
- Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S. L., Capó-Arteaga, M. Á., & Nájera-Luna, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. Y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*, 45(4), 479-491.
- Montero, M., & Kanninen, M. (2002). Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 39, 50-55.
- Prodan, M., Rolan, P., Cox, F., & Real, P. (1997). Mensura forestal. Serie de investigación y educación en desarrollo sostenible. IICA.
- Rodríguez, J. (1999). La estimación de la biomasa verde de copa de *Eucalyptus saligna* Smith y *Eucalyptus Pellita* F. Muell [Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Master en Ciencias]. Universidad de Pinar del Río.
- SODEPAZ. (2012). Aprovechamiento de la biomasa de marabú y otras especies energéticas como combustible en la generación de electricidad y recuperación ambiental en Camagüey. EUROPEAID.
- Toirac, W. (2014). Estimación de la biomasa aérea total, carbono y nitrógeno retenido en plantaciones de *Pinus maestrensis* Bisse en la provincia Granma [PhD Thesis]. Tesis presentada (en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias

- Torres, V., & Ortiz, J. (2005). Aplicaciones de la modelación y simulación a la producción y alimentación de animales de granjas. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 39, 397-406.
- Vidal, A. (1995). Estudio de las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa de copa de coníferas de la provincia Pinar del Río [Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales)]. Universidad de Pinar del Río.
- Vidal, A. (2002). Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus tropicalis* Morelet en la Empresa Forestal Integral Macurije de la provincia de Pinar del Río. *REVISTA FLORESTA*, 32(2), 261-265.