

Determinación del mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea* Roxb. procedente de plantaciones con manejo de rebrotes

Determination of the best allometric model for the biomass estimation of *Gmelina arborea* Roxb. from plantations with sprouts management

Luis Diego Jiménez¹ • Juan Carlos Valverde²  • Dagoberto Arias² 

Abstract

The development of bioenergy projects based on forest plantations with sprout management allows the life of the crop to be extended, gives an added value to plantation, and reduces costs of establishment and management. The present study proposes an estimation of biomass production for the generation and development of allometric equations for decision making in plantations with sprout management of *Gmelina arborea* in Turrialba, Cartago, Costa Rica. As a case study, a plantation of *G. arborea* of 2.0 ha with sprout management of a third rotation was taken. The production of biomass area was determined in three years, representing an average of 214.85 Mg/ha with an increase of 71.61 Mg/ha/year. The plantation showed a density stand index (DSI) of 635 that corresponds to the area of self-thinning, with an average diameter of 7.90 cm; under these conditions the plantation presented an average of 4.90 axes per stump or strain and a density of 6,190 axes/ha, which approaches the densities proposed for the management of dendroenergetic plantations in Costa Rica. It was determined that the best allometric equation for the estimation of green biomass was $\text{LnBT} = -1,7440 + 2,4221 \text{ Ln}(d)$ and it can be applied in similar plantations to the one evaluated.

Key words: Dendroenergetic, forest plantation, allometric equations, Costa Rica.

1. Banco de Semillas Forestales, CATIE; Turrialba, Costa Rica; djimenez@catie.ac.cr

2. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; jcvalverde@tec.ac.cr; darias@tec.ac.cr

Recibido: 10/05/2018

Aceptado: 11/08/2018

Publicado: 19/09/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3775

Resumen

El desarrollo de proyectos bioenergéticos basados en plantaciones forestales con manejo de rebrotes, permiten ampliar el tiempo de vida del cultivo, dar un valor agregado a la plantación y disminuir los costos de establecimiento y manejo. El presente estudio plantea la estimación de la producción de biomasa para la generación y el desarrollo de ecuaciones alométricas para la toma de decisiones en plantaciones con manejo de rebrotes de *Gmelina arborea* en Turrialba, Cartago, Costa Rica. Se tomó como caso de estudio, una plantación de *G. arborea* de 2,0 ha con manejo de rebrotes de una tercera rotación. Se determinó la producción de biomasa área a tres años que representa en promedio 214,85 Mg/ha con un incremento de 71,61 Mg/ha/año. La plantación mostró un índice de densidad del rodal (IDR) de 635 que corresponde a la zona de autoraleo, con un diámetro promedio de 7,90 cm, bajo estas condiciones la plantación presentó un promedio de 4,90 ejes por tocón o cepa y una densidad de 6 190 ejes/ha, la cual se aproxima a las densidades propuestas para el manejo de plantaciones dendroenergéticas en Costa Rica. Se determinó que la mejor ecuación alométrica de estimación de biomasa verde fue $\ln BT = -1,7440 + 2,4221 \cdot \ln(dap)$ y puede ser aplicada en plantaciones similares a la evaluada.

Palabras clave: Dendroenergía, plantación forestal ecuaciones alométricas, cultivos energéticos, Costa Rica.

Introducción

La biomasa procedente de plantaciones forestales se ha convertido en una materia prima energética de un alto valor económico para las industrias que consumen grandes cantidades de energía (IPCC, 2011). Es particularmente atractiva debido a su aporte en la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, simplicidad de almacenamiento y transporte y por las propiedades calóricas que posibilitan que sea implementada en procesos de combustión directa o gasificación (Rudnick et al., 2011). En Costa Rica, la actual política de diversificación de la matriz energética ha considerado a la biomasa forestal como una de las mejores alternativas energéticas para disminuir la dependencia de la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles y gas natural (DSE, 2011). Se abren nuevas oportunidades en el manejo de los residuos forestales y el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas, que implementen especies de rápido crecimiento, a una alta densidad de siembra y con ciclos de cosecha menores a tres años (Muñoz, 2009).

Es fundamental que, en los proyectos dendroenergéticos se disponga de información del potencial de la biomasa

a extraer de las plantaciones, con el fin de calcular el abastecimiento potencial al mercado demandante (Brown et al., 1989); las estimaciones se pueden desarrollar con métodos directos e indirectos. El método directo se caracteriza por ser destructivo, en él se corta una muestra de la plantación y a cada árbol se le pesan sus partes por separado y se determina el contenido de humedad, con ello se estima de forma precisa la biomasa disponible (Simangunsong et al., 2016); sin embargo, es un procedimiento costoso, complicado de realizar en campo y con imposibilidad de dar continuidad de mediciones a los individuos cosechados (Brown et al., 1989; Acosta et al., 2002). En cambio, la metodología indirecta se basa en la implementación de modelos alométricos que usan variables como el diámetro y la altura para la estimación de la biomasa total (Acosta et al., 2002); dicho método es de bajo costo, de simple implementación en el campo y con una flexibilidad en cuanto a la selección de variables a medir como son: el diámetro a la altura del pecho (dap), diámetro a la altura del tocón (dat), altura comercial (hc), altura total (ht) y combinaciones de ellas (Gayoso et al., 2002). En la mayoría de los trabajos realizados en zonas tropicales se ha encontrado que las variables de diámetro y altura permiten estimar en forma precisa la biomasa de un individuo (Overman et al., 1994; Regina, 2000).

En el caso específico de la especie *Gmelina arborea*, se ha considerado como un árbol con alto potencial de uso en proyectos dendroenergéticos debido a su rápido crecimiento en el trópico, adaptabilidad para ser sembrada a alta densidad (mayor a 5000 árb/ha) y posterior a su cosecha con la capacidad de desarrollar rebrotes (González-Salazar et al., 2016). A nivel de la madera, se caracteriza por tener un poder calórico de 16 134,96 a 15 840 kJ/kg siendo la especie una excelente opción para el mercado energético (Salazar-Zeledón, 2015). Herbert y Krishnan (2016) mencionan que el éxito de las plantaciones dendroenergéticas es la cantidad de biomasa que es posible de obtener posterior a la primera cosecha. Conforme sea mayor la capacidad de rebrotar, mejor será la especie para fines energéticos ya que garantiza la generación de biomasa en el tiempo. FAO (2008) destaca que *G. arborea* tiene cualidades óptimas para el desarrollo de ciclos productivos a 10 años en biomasa, adaptando un manejo de rebrotes en conjunto a un plan de fertilización anual. Por su parte Pancel (2016) destaca que las plantaciones de *G. arborea* posterior a un ciclo de cosecha pueden duplicar la producción de biomasa a través de manejo silvicultural de rebrotes con ciclos de cosecha de 3 años o menos.

En el caso de Costa Rica, *G. arborea* es una de las especies que más se ha implementado en la reforestación comercial con fines madereros (de Camino y Morales,

2013) y recientemente se ha utilizado en proyectos bioenergéticos con diferentes condiciones de densidad de siembra, condiciones de suelo y potencialidad calórico (Barboza, 2016). Sin embargo, los aspectos del manejo de rebrotes con fines energéticos han sido poco estudiados, generando con ello una ausencia de información para la estimación del potencial biomasa a obtener de este tipo de plantaciones y por consiguiente la formulación de proyectos biomásicos.

El presente estudio plantea la estimación de la producción de biomasa para la generación de energía y el desarrollo de ecuaciones alométricas para la toma de decisiones en plantaciones con manejo de rebrotes de *Gmelina arborea* en Turrialba, Cartago, Costa Rica.

Materiales y métodos

Sitio y especie de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Finca Comercial del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), ubicada en Turrialba, Cartago (09°53'44" N y 83°40'07" O). A una altitud de 600 m, con una temperatura media anual de 21,8 °C y una precipitación anual de 2 600 mm; calificando en la zona de vida de Bosque Tropical Húmedo (Vásquez, 2014). El sitio se caracterizó por tener una topografía plana, con un suelo bien drenado y de textura arcillosa.

En el año de 1991 se sembraron 2,0 ha con la especie *Gmelina arborea*, procedente de un huerto semillero. La plantación se estableció con una densidad de siembra de 1 333 árb/ha (con un distanciamiento de 3,0 x 2,5 m), la plantación se cosechó en su totalidad en el año 2001, posteriormente se aplicó un manejo de rebrotes con turnos de cosecha de 6 años para la producción de postes con fines agrícolas, posterior al 2016 la plantación se destinó a fines bioenergéticos, lo cual incidió en que no se realizaron manejos silviculturales al cultivo.

Muestreo de la plantación

Se realizó un muestreo para determinar la variabilidad en características dasométricas de la plantación, para lo cual se establecieron seis parcelas de muestreo rectangulares de 144 m² (conformada por 16 tocones tanto vivos como muertos), distribuidos sistemáticamente con un arranque aleatorio. Para cada tocón vivo, se contó la cantidad de rebrotes y se midió el diámetro a 1,3 m sobre el nivel del suelo. En aquellas situaciones donde los rebrotes estaban muertos, se consideraron para la evaluación de la mortalidad de la plantación. Posterior a la evaluación de la plantación, se analizó la distribución diamétrica de la población utilizando categorías cada 5 cm. Además, se realizó la determinación del índice de

Densidad del Rodal (IDR) según la metodología de Arias y Campos (1988), el índice de esbeltez, definido como la división del diámetro entre la altura total.

Cosecha y cuantificación de la biomasa

Posterior a la medición de los rebrotes de cada parcela se procedió con la corta a 0,3 m sobre el nivel del suelo y se midió su altura total, a su vez que se separaron las distintas partes del árbol en: fuste (con un diámetro mínimo de 2,5 cm) y follaje (conformado por hojas, ramas y las secciones de fuste con diámetros inferiores a 2,5 cm), dicha clasificación se basó en la metodología de Schlegel et al. (2000).

Posterior a la separación de la biomasa, se midió el peso en condición verde de cada grupo, para lo cual se utilizó en el campo una balanza electrónica marca Ocony de pesaje máximo de 50 kg. La balanza se llevó directamente al sitio y se utilizó para el peso inmediato de cada individuo posterior a su segmentación.

Estimación de la biomasa seca

De los rebrotes cosechados, se seleccionó una muestra de 25 individuos representativos a partir la distribución diamétrica identificada previamente en la plantación. De cada individuo se obtuvo una muestra de 250 g que se pesó en condición húmeda (verde) y posteriormente se secó a una temperatura de 60 °C durante 72 horas para posteriormente obtener el peso en condición seca y con ello se obtuvo el porcentaje de peso seco de la biomasa el cual se utilizó en la ecuación 1, siguiendo la metodología de Lerma y Orjuela (2014) y Schlegel et al., (2000).

$$B = \frac{P_f \times M_s}{100} \quad (1)$$

Donde: *B* es la biomasa en kg; *P_f* es el peso fresco en kg y *M_s* es el porcentaje de materia seca.

Desarrollo y selección de modelos a alométricos para la estimación de biomasa

Los modelos se desarrollaron siguiendo la metodología de Segura et al. (2008). Las variables independientes que se utilizaron fueron: diámetro a 1,3 m sobre suelo (*dap*) y altura total (*ht*), como variable dependiente se utilizó la biomasa (*BT*), en total se utilizaron ocho ecuaciones alométricas (cuadro 1). La selección de las ecuaciones se basó en estudios previos realizados por Segura et al. (2008) con especies forestales cultivadas en plantaciones tropicales, la prueba de comparación múltiple de Tukey. Todos análisis se desarrollaron con una significancia del 95 %.

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas propuestas para la estimación de biomasa a partir de diámetro y altura total en una plantación con manejo de rebrotes de *Gmelina arborea* en Turrialba, Costa Rica.

Table 1. Proposed allometric equations for the estimation of biomass from diameter and total height in a plantation with sprout management of *Gmelina arborea* in Turrialba, Costa Rica.

No.	Modelo
1	$BT = \beta_0 + \beta_1 *dap$
2	$BT = \beta_0 + \beta_1 *dap^2$
3	$BT = \beta_0 + \beta_1 *dap + \beta_2 *dap^2$
4	$\ln BT = \beta_0 + \beta_1 * \ln(dap)$
5	$BT = \beta_0 + \beta_1 * dap^2 * h$
6	$BT = \beta_0 + \beta_1 *dap^2 + \beta_2 * dap^2 * h + \beta_3 * h$
7	$BT = \beta_0 + \beta_1 *dap^2 + \beta_2 * dap^2 * h + \beta_3 * dap^2 * h$
8	$\ln BT = \beta_0 + \beta_1 * \ln(dap) + \beta_2 * \ln h$

BT : volumen de biomasa; dap: diámetro a la 1,3 m sobre suelo (cm); h: altura total total (m); β_0, β_1, \dots : parametros estimados

BT: biomass volume; dap: diameter at 1.3 m above ground (cm); h: total total height (m); β_0, β_1, \dots : estimated parameters

En caso del análisis financiero, se desarrolló con las fórmulas financieras del programa MS Excel versión 2013.

La selección de la mejor ecuación alométrica se desarrolló en dos fases, en la primera etapa se consideró un análisis de correlación mediante el coeficiente de correlación Pearson y la verificación de coeficientes de correlación no significativos que justificaran la no inclusión de una variable en el modelo. En la segunda etapa se seleccionó el modelo que cumpliera los valores óptimos de los siguientes criterios estadísticos: el coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP), el Criterio de Información Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC). Las tres ecuaciones que presentaron los mejores resultados se validaron con datos de individuos que no fueron considerados en la formulación de cada ecuación y finalmente se seleccionó la ecuación que mostró el menor error.

En todas las pruebas se utilizó el programa INFOSTAT versión 2016 con una significancia de 0,05.

Resultados y discusión

Caracterización inicial de la plantación

La plantación presentó una densidad de rebrotes por hectárea de 6 190 tallos, con un promedio de 4,94 rebrotes por tocón (cuadro 2), con una altura promedio

total de 11,40 m y un peso en condición verde de 35,19 kg/rebote; cuya biomasa se encuentra distribuida en un 87,7 % concentrada en el fuste y 12,3 % en el follaje y ramillas. Las condiciones de densidad de la plantación la califican con un uso bioenergético según la CNOS (2014) que establece que las plantaciones dendroenergéticas cuentan con densidades de establecimiento mínimas de 5 000 individuos/ha. En cuanto a la relación altura - diámetro (esbeltez) se obtuvo un valor de 1,4; valor que según Arias (2005) indica que es una plantación con presencia de árboles de gran altura, pero delgado, lo cual es muy típico en plantaciones dendroenergéticas (donde la esbeltez va de 1,2 a 1,7). Gayoso et al. (2002) mencionan que dicho comportamiento se debe a la alta densidad de siembra donde los individuos compiten por espacio para optimizar su desarrollo fotosintético, para lo cual deben competir por alcanzar la altura necesaria para disponer de la mayor cantidad de luz como estrategia de sobrevivencia, reduciendo la disponibilidad energética para el desarrollo diamétrico.

Al analizar el estado de la competencia dentro de la plantación, se determinó un área basal promedio de 35,01 m²/ha con un error del 8,35 % y un Índice de densidad de rodal de 635,04 (con un error del 7,9 %). Las condiciones que se obtuvieron en este estudio contrastan con los resultados de Lerma y Orjuela (2014), calificando como una plantación en condición de autoraleo en el que la competencia es intensa, se pueden dar niveles elevados de mortalidad debido a que los individuos no cuentan con el espacio necesario para el desarrollo de una copa que permita sintetizar la energía necesaria para acumular más biomasa. Por su parte, Galloway et al. (2001) y Rojas et al. (2004) mencionan que para *G. arborea* en condiciones de estrés máximo y con una edad de 3 años, el porcentaje de copa viva es inferior al 20 % y con una disminución del área de cada hoja en un 40 %, esto debido a que la falta de espacio por competencia genera que los individuos centren su desarrollo en la copa superior que es la única sección que recibe luz directamente; por su parte Pancel (2016) menciona que en dichas condiciones los árboles entran en un estrés intenso que incide en la reducción del crecimiento diamétrico de hasta un 80 %, producto de la escasa síntesis de azúcares necesarios para el crecimiento, a su vez la sobrevivencia de los individuos decae en un 50 %.

En cuanto a la biomasa acumulada de la plantación (figura 1), se obtuvo una acumulación en 3 años de 214,85 ton/ha de biomasa verde, con una captura anual de 71,61 ton/año, la biomasa se acumuló en un 89,6 % en el fuste y apenas el 10,4 % en el follaje y ramillas. La acumulación de biomasa obtenida según Rojas et al. (2004) es óptima para cultivos energéticos (debe ser entre 49 y 85 ton/ha), debido a que la biomasa acumulada debe ser la mayor en el menor tiempo posible, concentrarse en su mayoría en el fuste y debe ser capaz de ser realizada

Cuadro 2. Caracterización de la plantación *Gmelina arborea* con manejo de rebrotes en Turrialba, Costa Rica.

Table 2. Characterization of *Gmelina arborea* plantation with sprout management in Turrialba, Costa Rica.

Variable	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Diámetro (cm)	7,90	0,83	10,56
Altura total (m)	11,04	0,85	7,70
Rebrotos (n/ha)	6190	523,74	8,46
Peso fresco fuste (kg)	30,87	5,48	17,76
Peso fresco follaje (kg)	4,31	1,24	28,82
Peso fresco total (kg)	35,19	6,40	18,20
Índice de esbeltez	1,40	0,06	4,39

por especies arbóreas que soporten el cultivo en altas densidades, capacidad de rebrotar y con un manejo silvicultural mínimo. Con estas características queda demostrado que la plantación de *G. arborea* con manejo de rebrotes es viable para fines bioenergéticos.

En la valoración de la biomasa seca (cuadro 3), se obtuvo un 42,1 % de materia seca en el fuste, 50,1 % en el follaje y 37,6 % en la corteza (siendo esta parte la que mayor humedad acumuló). Rojas et al. (2004) mencionan que la acumulación significativa de humedad a nivel de corteza y fuste se debe a que el agua acumulada se reserva para ser utilizada en procesos fisiológicos e hidráulicos del árbol que, al estar en condiciones de estrés por la alta densidad, tiende a acumular agua como mecanismo biomecánico de sobrevivencia. Con el conocimiento de los porcentajes de humedad y biomasa presentes en la plantación, se determinó una biomasa seca de 92,35 ton/ha, parámetro aceptable según Segura y Andrade (2008) para plantaciones dendroenergéticas en el trópico, que oscilan en el rango de 60 a 120 ton/ha (con ciclos de cosecha de 3 años).

Modelos alométricos

Inicialmente se determinó que las dos variables medidas en el campo (diámetro y altura) mostraron relaciones distintas con respecto a la biomasa. Se encontró una alta correlación entre el diámetro y la biomasa ($r^2 = 0,98$); mientras que la relación altura-biomasa fue menor ($r^2 = 0,71$). Estos resultados indican que el peso verde de la biomasa fue explicado mejor por la variable independiente diámetro. Dicho comportamiento es similar al reportado por Brown et al. (1989), Brown y Lugo (1992), Pérez y Kanninen (2002) y Segura y Kanninen (2005) en estudios desarrollados en bosque natural en regiones tropicales, la alta correlación de ambas variables se debe a que el diámetro tiene un impacto directo en la estimación de la biomasa, ya que su medición es más precisa y muy simple de realizar en comparación con la altura; además que se pueden desarrollar coeficientes de corrección en

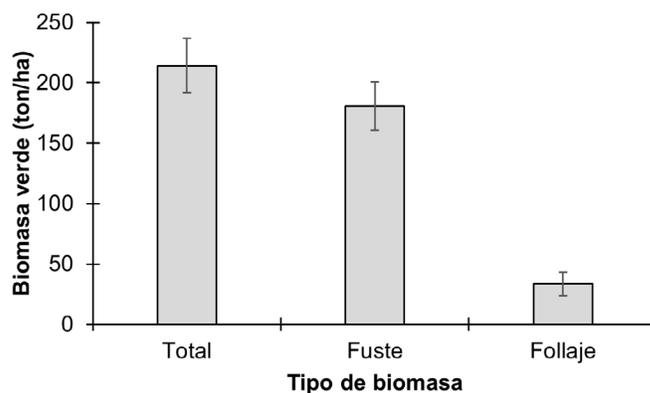


Figura 1. Distribución de la biomasa verde acumulada por árboles de *Gmelina arborea* bajo manejo de rebrotes con fines bioenergéticos.

Figure 1. Distribution of green biomass accumulated by trees of *Gmelina arborea* under regrowth management for bioenergetic purposes.

ecuaciones que aumenten la precisión de la estimación de la biomasa en comparación al uso de la altura.

A partir de la evaluación previa para determinar la variable independiente de mayor peso, se determinó que de los 10 modelos inicialmente considerados (cuadro 1), se eliminaron 7 modelos por presentar valores R^2 y R^2 -ajustado inferiores al 0,6; con errores superiores al 22 % (considerado como modelos poco precisos) y en muchos casos mostrando factores de corrección con alto sesgo. Por lo que se seleccionaron preliminarmente tres modelos (cuadro 4). Inicialmente estos modelos calificaron por tener valores R^2 y R^2 -ajustado superiores a 0,95, con estimadores estadísticamente significativos ($P < 0,05$) y cumpliendo con la distribución normal de los residuos ($P < 0,05$).

Al analizar los tres modelos preseleccionados se determinó que el modelo $\ln BT = \beta_0 + \beta_1 \ln^*(dap)$ mostró los

Cuadro 3. Determinación de la materia seca y contenido de humedad de muestras tomadas en una plantación de *Gmelina arborea* bajo manejo de rebrotes.

Table 3. Determination of dry matter and moisture content of samples taken from a plantation of *Gmelina arborea* under sprout management.

Componente del árbol	Contenido de agua (%)	Materia seca (%)
Fuste	57,90 (1,96) a	42,10 (0,90) a
Follaje	49,90 (0,78) b	50,10 (0,08) b
Corteza	62,40 (1,33) c	37,60 (1,58) c

Valores entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación y letras diferentes para cada parámetro significan diferencias estadísticas a un 95 %.

Values in parentheses correspond to coefficient of variation and different letters for each parameter mean statistical differences to 95 %.

valores más altos de R^2 y R^2 -ajustado y el CME menor, siendo el modelo con mejor ajuste, en comparación a los otros dos modelos que presentaron errores superiores a 55,93. Al realizar una validación de los tres modelos nuevamente el modelo $\ln BT = \beta + \beta_1 \ln^*(dap)$ mostró un error de predicción del 9,67 % significativamente menor a los otros dos modelos que fueron de 33,50 %. [Henry et al. \(2010\)](#) encontraron que, para estimaciones de biomasa en plantaciones forestales, los errores de predicción deben ser menores al 20 %, valores superiores muestran modelos con poca precisión que pueden sobre o subestimar la biomasa disponible, por lo que modelos con alto error no son funcionales para plantaciones comerciales. Se obtuvo como resultado que el modelo $\ln BT = \beta + \beta_1 \ln^*(dap)$ es el óptimo para las condiciones de estudio (cuadro 5).

El modelo que presentó el mejor ajuste presentó la ventaja de que es de una sola entrada (diámetro), y esto simplifica el cálculo, entendiéndose que es una variable fácil de obtener en campo y que la mayoría de los inventarios forestales implementa su medición,

además no requiere de equipos especializados ni de un conocimiento complejo ([Herbert y Krishnan, 2016](#)).

[Segura \(1999\)](#) indica que, para ecuaciones de una sola variable independiente como el diámetro, son recomendadas para la estimación de biomasa en bosque o plantación que cuenten con una representatividad significativa del sitio, con errores de muestro inferiores al 20 % y representatividad de las distintas clases diamétricas dentro del modelo.

Modelos con un mayor número de parámetros tienden a ajustar mejor una base de datos; no obstante, tienden a ser más inestables y a modelar la variabilidad de esos datos más que su tendencia ([Posada, Zoot y Rosero 2007](#)). Adicionalmente, el mayor número de parámetros implicará mediciones adicionales de una de las variables adicionadas al modelo para el cálculo del modelo, aumentando los costos y fuentes posibles de error ([Álvarez, 2008](#)).

Conclusiones

La plantación presentó una densidad de 6 190 ejes/ha, con un promedio de 4,9 ejes por tocón, presentando un IDR de 635 que lo ubica en la zona de autoraleo. Se estimó la biomasa verde total en 214,85 ton/ha, con un incremento medio anual de 71,61 ton/año, dispuestas en un 89,4 % en el fuste y 10,6 % en follaje y ramillas. La estimación de biomasa seca por hectárea fue de 92 ton/ha después de tres años de acumulación, valor aceptable para fines bioenergéticos.

El modelo alométrico que presentó el mejor ajuste para predecir la biomasa aérea fue $\ln BT = -1,7440 + 2,4221 \ln(dap)$, mostrando altos coeficientes de determinación ajustada (R^2 -ajustado) de 0,99 y un CME de 0,07 significativamente menor a los otros modelos estudiados. La implementación de modelos de una sola vía es útil para sitios con muestreos significativamente representativos del sitio y con presencia de mediciones en todas las posibles clases diamétricas.

Cuadro 4. Modelos para la determinación de la biomasa aérea total en estado verde en función del diámetro a la altura del pecho y altura total, para la plantación de *Gmelina arborea* con manejo de rebrotes.

Table 4. Models for determination of total aerial biomass in green state according to the diameter and total height, for the plantation of *Gmelina arborea* with sprout management.

Modelo	β_0	β_1	β_2	CME	R^2	R^2 Ajustado
$BT = \beta_0 + \beta_1 *dap + \beta_2 *dap^2$	20,85	-6,88	0,94	74,78	0,97	0,98
$\ln BT = \beta_0 + \beta_1 * \ln(dap)$	-1,74	2,42	-	0,07	0,98	0,99
$BT = \beta_0 + \beta_1 * dap^2 * h$	2,93	0,03	-	55,93	0,05	0,96

Cuadro 5. Modelo óptimo para estimar la biomasa aérea total en estado verde para la plantación de *Gmelina arborea* bajo manejo de rebrotes.

Table 5. Optimum model for estimating the total aerial biomass in the green state for the plantation of *Gmelina arborea* under sprout management.

Parametro	
Ecuación	$\ln BT = -1,74 + 2,42 \ln^*(dap)$
Variables	BT es la biomasa en condición verde (kg).
	D es el diámetro a 1,3 m sobre suelo (cm)
Condición de uso	<i>Gmelina arborea</i> bajo manejo de rebrotes
Número de observaciones	129
Rango de mediciones diamétricas consideradas	Diámetros entre 3,2 a 15,7 cm
Estadísticos de exactitud de la ecuación	
Media aritmética de la variable dependiente	41,1 kg
Coefficiente de determinación	0,99
Cuadrado medio del error	0,07

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica, al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) por todo el apoyo logístico, técnico y financiero brindado durante la ejecución del presente estudio que formó parte del proyecto “Impulso tecnológico para la producción, transformación y uso de la biomasa para energía y biomateriales a partir de los residuos lignocelulósicos” (Contrato FI084-13). También, se agradece al CATIE por la asistencia técnica y operativa en el desarrollo de la investigación.

Referencias

Álvarez, G. (2008). Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Biomasa forestal. (Tesis de Maestría). Escuela de posgrado: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza, Turrialba.

Arias, D. & Campos, N. (1988). Planificación de aclareos en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* basado en la metodología del índice de densidad del rodal (IDR). Nota Técnica N°2, ITCR, 9 p.

Barboza, J. (2016). Análisis de factibilidad financiera de un proyecto de gasificación de biomasa forestal para la generación de 2 MW de potencia en Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica. 57 p.

Brown, S.; Gillespe, A & Lugo, A.E (1989). Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. Revista Forest Science, 35(4), 881 – 902

Brown, S. & Lugo, A. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. Revista Interciencia, 17(1), 8-27.

Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134). Food & Agriculture Org. Consultado en: <http://www.fao.org/docrep/w4095e/w4095e00.HTM>

Brown, S. (1999). Guidelines for inventorying and monitoring carbon offsets in forest-based projects. Winrock International, Arlington, Virginia. USA. 11 p.

DSE (Dirección Sectorial de Energía), (2011). Diagnóstico del VI Plan Nacional de Energía 2012-2030. Consultado en: http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/Diagnostico_VI_PNE_2012-2030_julio2012.pdf

De Camino, R., Morales, J. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Turrialba, Costa Rica, 410 p.

Galloway, G., Ugalde, L. and Vásquez, W. (2001). Importance of density reductions in tropical plantations: Experiences en Central America. Forests, Trees and Livelihoods Vol. 11, p217-232.

Gayoso, J., J. Guerra, y D. Alarcón D. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157 p.

Gonzalez-Salazar, M., Venturini, M., Poganietz, W., Finkenrath, M., Ruggero, P. (2016). Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation, Biomass and Bioenergy, 88: 43-58.

Herbert, G., Krishnan, A. (2016). Quantifying environmental performance of biomass energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59: 292-308.

IPCC, 2011. Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Consultado en: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf

Lerma, M; Orjuela, E. (2014). Modelos alométricos para la

- estimación de la biomasa aérea total en el Páramo de Anaime, Departamento del Tolima, Producción de leña. Tesis Bach. Universidad del Tolima, Ibagué. Colombia 79 p
- Morales, JP, Salazar, K. 2015. Buscan producir energía a base de madera en Costa Rica. Consultado en: <http://www.catie.ac.cr/es/catie-noticias/855-buscan-producir-energia-a-base-de-madera-en-costa-rica>
- Muñoz Sáenz, F. (2009). Introducción y evaluación del cultivo de *Miscanthus* sp y *Paulownia* sp como fuente de biomasa lignocelulósica para la generación de energía renovable en la zona centro sur de Chile. Proyecto de Investigación. Universidad de Concepción, Chile.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2008). La contribución de la dendroenergía a la demanda energética futura. Consultado en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0139s/i0139s05.pdf>
- Ortiz, E. (1993). Técnicas para la estimación del crecimiento y rendimiento de árboles individuales y bosques. Instituto tecnológico de Costa Rica. Revista Instituto tecnológico de Costa Rica. Departamento de Ingeniería Forestal. Serie de apoyo académico, 16, 71- 85.
- Overman, J; Witte, H; Saldarriaga, J. 1994. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*. 10: 218 – 297
- Pancel, L. (2016). Basic outline of tree plantations in the tropics. Amsterdam, Netherlands: Springer. 356p.
- Pérez, LD. & Kanninen, M. (2003). Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Revista Journal of Tropical Forest Science*, 15 (1), 199-213
- Posada, S.L.; Zoot, M.S. & Rosero, R. (2007). Comparación de modelos matemáticos: una aplicación en la evaluación de alimentos para animales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20, 141 – 148.
- Regina, S. 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata, Salamanca, Spain. *Forest Ecology Management*. 132: 127 – 141.
- Rojas et al, 2004. Manual para productores de melina *Gmelina arborea* en Costa Rica. En Línea: consultado el 12 de mayo, 2005. Consultado en: <http://www.fonafifo.com>
- Salazar-Zeledon, E. (2016). Influencia de altas densidades de plantación en el poder calorífico y propiedades físicas de la madera para la especie *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. 13 (30): 51-56.
- Schlegel, B., J. Gayoso, y J. Guerra. (2000). Manual de procedimientos y muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. FONDEF- UACH-INFOR. 20 p.
- Segura, M. (1997). Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en bosques de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica, (Tesis Licenciatura Ciencias Forestales). Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar: Universidad Nacional, Heredia.
- Segura, M. & Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Revista Biotropica*, 37(1), 2-8
- Segura, M. & Andrade, H. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Revista Agroforestería de las Américas*, 46, 89-96.
- Simangunsong, B., Sitanggang, V., Manurung, E., Rahmadi, A., Moore, G., Aye, L., Tambunan, A. (2016). Potential forest biomass resource as feedstock for bioenergy and its economic value in Indonesia. *Forest Policy and Economics*, 81: 10-17.
- Varela, D. (2013). Análisis de la situación actual del aprovechamiento de la biomasa para producción de electricidad en España. Consultado en: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17764/PFC_Daniel_Varela_Anton.pdf?sequence=1

Este artículo debe citarse como:

Jiménez, LD; Valverde, JC; 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 Mesoamericana Kurú*, 15 (Suppl. 01): 53-60. doi. 10.18845/rfmk.v15i1.3775