

MODELOS ALOMÉTRICOS DE BIOMASA AÉREA PARA *Leucaena esculenta* EN UN SISTEMA AGROFORESTAL¹

[ALOMETRIC MODELS FOR *Leucaena esculenta* ABOVEGROUND BIOMASS IN AN AGROFORESTRY SYSTEM]

Yesenia José-Hernández[§], Gerardo Rodríguez-Ortiz, José Raymundo Enríquez-del Valle, Gisela Virginia Campos-Angeles, Vicente Arturo Velasco-Velasco, Judith Ruiz-Luna

División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C. P. 71230. Tel. 01(951) 5170788.

[§]Autor para correspondencia: (joseyesenia93@gmail.com).

RESUMEN

Leucaena esculenta Benth es una leguminosa arbórea de uso múltiple utilizada en sistemas agroforestales (SA), de la que no hay información de su crecimiento en condiciones de ladera. El objetivo fue estimar la biomasa arbórea aérea y área foliar de *L. esculenta* establecida en un SA de ladera en Oaxaca, México. Durante 2016 se realizó muestreo del sistema, tomando información de inventario y muestreo destructivo de 40 árboles para integrar la biomasa estructural aérea. Los datos se analizaron mediante pruebas de bondad de ajuste (χ^2 , 0.05) y ajuste de modelos de regresión en biomasa y área foliar. El SA se caracteriza por una estructura irregular, conteniendo entre 643 y 793 árboles ha⁻¹ de la especie de interés. La biomasa de los componentes aéreos se estimó con coeficientes de determinación de 0.91, 0.82, 0.80, 0.87 y 0.40, para total aéreo, tallo, ramas, hojas y flor, respectivamente. Los modelos alométricos utilizan variables de fácil obtención como diámetro normal (DN), diámetro de pie y altura de árbol (AT) en funciones no lineales. Utilizando los modelos generados se estima que el SA genera 7.27 t ha⁻¹ de biomasa total aérea, distribuida en 3.37, 1.46, 2.1 y 0.34 t ha⁻¹ en tallo, ramas, hojas y flores, respectivamente. El área foliar de los árboles se estima confiablemente ($R^2_{adj} = 0.83$) utilizando DN y AT de los árboles. Transcurridos 10 años de establecido el SA, tiene una tasa de incorporación de biomasa aérea de 727 kg ha⁻¹/año (tallo, hoja, rama, flor).

Palabras clave: Área foliar, compartimentos de biomasa, ladera, leguminosa forrajera, modelo de regresión.

ABSTRACT

Leucaena esculenta Benth is a multipurpose tree legume used in agroforestry systems (AS) of which there is no information on its growth in hillside conditions. The objective was to estimate the aboveground biomass and leaf area of *L. esculenta* established in a hillside AS in Oaxaca, Mexico. During 2016, the system was sampled, taking inventory information and destructive sampling of 40 trees in order to obtain aboveground structural biomass. Data were analyzed using test of goodness of fit (χ^2 , 0.05) and regression models to fit biomass and leaf area. The AS has

¹ Recibido: 21-diciembre-2019

Aceptado: 2-mayo-2020

an irregular structure, containing between 643 and 793 trees ha⁻¹ of species of interest. Aboveground biomass compartments were estimated with determination coefficients of 0.91, 0.82, 0.80, 0.87 and 0.40, for total aboveground, stem, branches, leaves and flowers, respectively. The allometric models use easily obtained variables such as diameter at breast height (DBH), diameter at the bottom (DB) and tree height (TH) in non-linear functions. Using the generated models, the AS contents 7.27 t ha⁻¹ of total aboveground biomass, distributed in 3.37, 1.46, 2.1 and 0.34 t ha⁻¹ in stem, branches, leaves and flowers, respectively. The leaf area of the trees is estimated with precision ($R^2_{adj} = 0.83$) using DBH and TH of the trees. After 10 years of establishing the AS, it has an incorporation rate of aboveground biomass of 727 kg ha⁻¹ year (stem, leaf, branch and flower).

Index words: Foliar area, biomass compartments, hillside, forage legume, regression model.

INTRODUCCIÓN

Las leguminosas arbóreas son las especies con mayor potencialidad dentro de los diversos sistemas agroforestales (SA) en virtud de que mejoran y enriquecen las condiciones del suelo por su capacidad de fijación simbiótica del nitrógeno. La importancia de estas especies es en la restauración y mantenimiento de la fertilidad del suelo (Hernández, 2013).

Leucaena esculenta Benth (guaje) es una leguminosa arbórea que crece principalmente en suelos derivados de roca madre calcárea, regosoles, sin estratificar, superficial y suelos rocosos con buen drenaje (Orwa *et al.*, 2009). Es una especie de uso múltiple utilizada en restauración de suelos degradados, cerco vivo, franjas agroforestales, plantaciones para forraje, control de la erosión y mejoramiento del suelo; éste último por su asociación con bacterias fijadoras de nitrógeno y porque su hojarasca aporta una excelente relación carbono-nitrógeno (Cervantes *et al.*, 1998).

Las ecuaciones alométricas de biomasa son herramientas matemático-estadísticas que permiten conocer de forma simple, la cantidad de biomasa de un árbol por medio de la medición de otras variables de fácil obtención. Las ecuaciones son generadas a partir de los análisis de regresión, donde se establecen las relaciones cuantitativas entre la masa de los árboles y sus datos dimensionales (Rügnitz *et al.*, 2009). Para integrar las ecuaciones se requiere de muestreo destructivo de n número de árboles para relacionar alguna de las variables, tales como diámetro normal (DN), altura comercial (AC) y total (AT), y la densidad específica de la madera (Fonseca *et al.*, 2009). Además, los valores promedios de biomasa son usados en la mayoría de los cálculos de flujos de carbono. La distribución de biomasa entre órganos del árbol permite la medición de estos cambios en intervalos de tiempo (Houghton, 2005). Al establecer un SA en terrenos con pendiente con marcada situación de erosión interesa evaluar y presentar datos sobre el establecimiento de la especie, su acumulación de biomasa y la evolución del sitio transcurridos algunos años de establecida la plantación. Según Kanani *et al.* (2006) la producción y distribución de biomasa y follaje de *Leucaena* es palatable para el ganado y de alto rendimiento en la producción de forrajes. Es factible que la especie constituya la materia prima de los alimentos, fibras combustibles, y es preponderante para el manejo de agua y suelo.

El establecimiento de árboles de uso múltiple (como el género *Leucaena*) puede lograr la captura de biomasa, especialmente si se hace en altas densidades (Hernández *et al.*, 2008;

Anguiano *et al.*, 2012). En este contexto, los SA constituyen una importante estrategia para la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, el secuestro, el almacenamiento y el ciclo de carbono (IPCC, 2000; Ibrahim *et al.*, 2007) y para acceder a los programas para obtener un pago por servicios ambientales (Sepúlveda e Ibrahim, 2009).

La necesidad de la estimación racional e integral de toda la biomasa forestal aprovechable, así como la predicción de los incrementos potenciales de la misma, se ha convertido en un importante aspecto a tener en cuenta; es importante la enorme cantidad de alternativas de su uso, tanto dentro de la planificación productiva como de sus posibilidades de desarrollo científico técnico. Las estimaciones de la biomasa aérea son fundamentales para la estimación de la cantidad de bio-energía, como alternativa parcial a los combustibles fósiles en la producción limpia y sostenible de la energía (McKendry, 2002).

Los SA ofrecen múltiples servicios ecológicos y sociales, ya que representan una importante alternativa para obtener alta producción de biomasa, pero también la restauración del suelo y la conservación de la biodiversidad, son algunos importantes servicios ambientales que se han considerado en diversos programas (Alonso, 2011). Gómez-Castro *et al.* (2010) en el centro de Chiapas, México estimaron la biomasa (BA) y carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (Lam.) y *Leucaena leucocephala* (Jacq.), utilizando como variable predictora el diámetro normal de los árboles en función exponencial y logarítmica, respectivamente. En los Valles Centrales de Oaxaca se tiene numerosos terrenos de lomerío desprovistos de vegetación arbórea, con condiciones notorias de erosión en los que se dejó de practicar la agricultura de temporal y cuya presencia de vegetación de gramíneas es aprovechada para pastoreo extensivo de ganado menor. En tales condiciones interesa evaluar la alternativa de SA, que ayuden a recuperar gradualmente la capacidad productiva de los terrenos.

Por lo antes descrito, el objetivo de esta investigación fue describir la estructura y estimar mediante ecuaciones de predicción la biomasa arbórea aérea y área foliar de *Leucaena esculenta* de 10 años, establecida en un sistema agroforestal de ladera en el centro de Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en un SA ubicado en terrenos del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), en Valles Centrales de Oaxaca, ubicado entre las coordenadas N 17° 01' 07.9" y L 096° 45' 56.9", altitud de 1566 m. El clima en la zona es templado con lluvias en verano con temperatura promedio de 20.4°C y 669 mm de precipitación anual. Durante el año 2006 se estableció la plantación en terreno de lomerío, con pendiente promedio de 20 % y exposición norte. Los árboles tenían 50±10 cm de altura y se establecieron en bordos siguiendo curvas a nivel. La distancia entre líneas fue entre 6 y 8 m y la distancia entre árboles dentro de líneas fue de 0.5 m en sistema "tresbolillo" sobre el bordo. Las especies que se establecieron fueron *Adenostoma fasciculatum* (chamiso), *Bursera glabrifolia* (copal), *Leucaena esculenta* Benth (guaje), *Pithecellobium dulce* Benth (huamuchil), *Melia azedarach* L. (paraíso) y *Schinus molle* L. (pirul).

Estructura vertical y horizontal

Durante el 2016 y transcurridos 10 años de la plantación se realizó el inventario del arbolado del SA, tomando información dendrométrica: diámetro al pie (Dpie, cm), diámetro a la altura del pecho (DAP, a 130 cm), diámetro de tocón (DT, cm) y altura a la primera bifurcación con cinta diamétrica; altura total (AT, m) medida con clinómetro Suunto (PM-5/360PC, REF SS011096010 Made in Finland) y diámetro de copa (DC, m) obtenido con cinta métrica. Utilizando el Dpie y AT se conformaron intervalos de clase para integrar la estructura horizontal y vertical, respectivamente.

Muestreo destructivo

Cuarenta árboles fueron seleccionados aleatoriamente, para derribarlos y cuantificar las dimensiones y biomasa de tallo y hojas. La muestra se distribuyó en forma proporcional a la frecuencia relativa de la estructura horizontal. En cada árbol se midió además, diámetro de copa (DC, m) en dos ejes (N-S, E-O) y se calculó área de copa (AC, m²), $AC = 0.7854(DC^2)$; el volumen total (VT, m³) se determinó utilizando la longitud y área de las trozas por cada árbol con la fórmula de Newton (Diéguez *et al.*, 2003). En los árboles derribados en ramas, hojas y flores, se tomaron submuestras que se pesaron en una báscula digital (Modelo H-2716, Alemania) para registrar su peso fresco (g), y posteriormente se metieron separadamente en bolsas de papel y se colocaron en estufa de secado Memmer (modelo 100-800, Alemania) a 72 °C hasta obtener peso constante; posteriormente se pesaron en balanza digital y obtuvo el peso seco (g). La relación peso seco/peso fresco generó un factor de conversión de biomasa (FCB) para cada compartimento, que sirvió para estimar la biomasa de todo el compartimento (FCB×peso fresco total) (Fonseca *et al.*, 2009).

De cada árbol se obtuvo una rodaja del tallo que se llevó a laboratorio, en donde se les cuantificó su diámetro (D, cm), grosor, peso fresco (PV, g) en campo y volumen fresco por desplazamiento de agua (VV, cm³); luego de ser secada en estufa a 80 °C hasta peso constante, se pesó en seco (PS, g) en balanza analítica SartoriusR con capacidad de 1620 g. Con estos datos se determinó la densidad relativa básica (DE = PS/VV) de cada rodaja. El producto DE×VT generó la biomasa del compartimento tallo de cada árbol. Aleatoriamente se seleccionaron 20 árboles a los cuales se tomó una muestra de tres ramas en la sección baja, media y alta de la copa; se tomaron los diámetros basal de cada rama de todo el árbol y muestra de las hojas para poder medir directamente el área foliar (AF, cm²) en integrador de AF (Leaf Area Meter, CI-202). Utilizando el diámetro basal de rama (DBR, cm) se estimó el AF por rama, mediante el modelo:

$$AF_{rama} = 1626.8e^{(-0.6878(1/ABR))}$$

Donde: AF = área foliar de rama (cm²), e = logaritmo Neperiano, ABR = $\pi/4 \times DBR$, DBR = diámetro basal de rama (cm). $R^2_{aju} = 0.67$, CME = 370.3. Dicho modelo se usó para estimar el AF de todas las ramas de cada árbol e integrar AF a nivel árbol.

Para evaluar la caída de follaje en el suelo del SA se establecieron 12 trampas circulares (0.38 m²), elaboradas con alambazón y malla mosquitera. Se colocaron tres por cada nivel de densidad arbórea y mensualmente se colectó el follaje durante 4 meses (febrero a mayo). El peso seco

generado en las trampas, después del secado proporcionó la biomasa incorporada al piso, misma que se infirió por unidad de superficie.

Análisis estadístico de datos

Los datos de biomasa en compartimentos aéreos, AF y volumen se ajustaron mediante modelos de regresión no lineales utilizando como variables de estimación diámetro al pie, diámetro normal y altura de los árboles (Velasco *et al.*, 2012). Pruebas de bondad de ajuste (χ^2 , 0.05) fueron realizadas para evaluar la estructura horizontal y vertical del sistema agroforestal. La incorporación del follaje se evaluó mediante diseño experimental DCA con arreglo factorial 3×4 (niveles de densidad arbórea, mes de colecta); se realizó análisis de varianza y prueba de separación de medias (Duncan $\alpha=0.05$). Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS (Sistema de Análisis Estadístico) (SAS Institute Inc., 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura del sistema agroforestal

A 10 años de establecido el SA presenta una estructura horizontal tendiente a la regularidad, teniendo el 70 % de árboles con diámetros que variaron en el rango de 7.5 a 17.5 cm. La frecuencia de individuos fue significativamente diferente ($p \leq 0.0001$) entre las categorías evaluadas, conteniendo 643 árboles ha⁻¹ las categorías 10 y 15 cm. Para la estructura vertical, el 86 % de árboles tienen alturas que variaron en el rango de 9 a 12 m. con una frecuencia de 793 árboles ha⁻¹ dentro de las categorías 6 y 10 cm, siendo la especie de interés la de mayor frecuencia (675 árboles ha⁻¹); esta especie resulta relevante para la conservación de biomasa (Asner *et al.*, 2003; Clement *et al.*, 2010). Al inicio de la plantación la pendiente del terreno era de 20 % y transcurridos 10 años se habían formado terrazas cuya pendiente es de 5 %, lo cual es importante para reducir la velocidad de escurrimiento de agua y su fuerza erosiva, así como permitir su infiltración. También se crean condiciones para la formación de suelo y la productividad del sitio con acumulación de materia orgánica.

La riqueza de leguminosas utilizadas como especies de sombra encuentra razón en su función multipropósito (forraje, fijación de nitrógeno, madera, frutos) de muchas de estas especies, características que han sido utilizadas como una ventaja competitiva para sistemas agroforestales alrededor del mundo (Shelton, 2000; Salgado-Mora *et al.*, 2007; Nair, *et al.*, 2009). En el sistema evaluado la especie principal *L. esculenta* se localiza en dos estratos, esta especie se encuentra en un 100 % del estrato superior, 86 % en el estrato medio, Sin embargo, en el caso de SA prácticamente ha sido desconocido y poco documentado, en diferentes regiones (Beer *et al.*, 2003; Idol *et al.*, 2011). Contrario a lo que ha ocurrido con el agroecosistema de café bajo sombra (Villavicencio, 2009). Aún más notable que la abundancia es la dominancia de la especie de interés, lo que demuestra la eficiencia ecológica de estos sistemas de producción (Gliessman, 2007).

La prueba de χ^2 mostró diferencias significativamente diferentes ($p < 0.0001$) entre las frecuencias de especies arbóreas encontradas en el SA, que está constituido por: *L. esculenta* (Benth) 73.9 %, *Phitecellobium dulce* Benth 10.4 %, *Melia azedarach* L. 5.2 % y *Bursera glabrifolia* Benth 2.3 % (Figura 1). Los árboles de *L. esculenta* se caracterizan por tener un

diámetro al pie del árbol de 13.4 ± 4.2 cm, bifurcados con dos o tres tallos y una altura de 9.9 ± 1.9 m. El área de crecimiento es en promedio de 9.4 ± 5.7 m². Sin embargo, y tomando en cuenta los hallazgos de Arroyo-Rodríguez & Mandujano (2006), así como lo expresado por Ochoa-Gaona *et al.* (2007), los SA pueden actuar como reservas de especies propias.

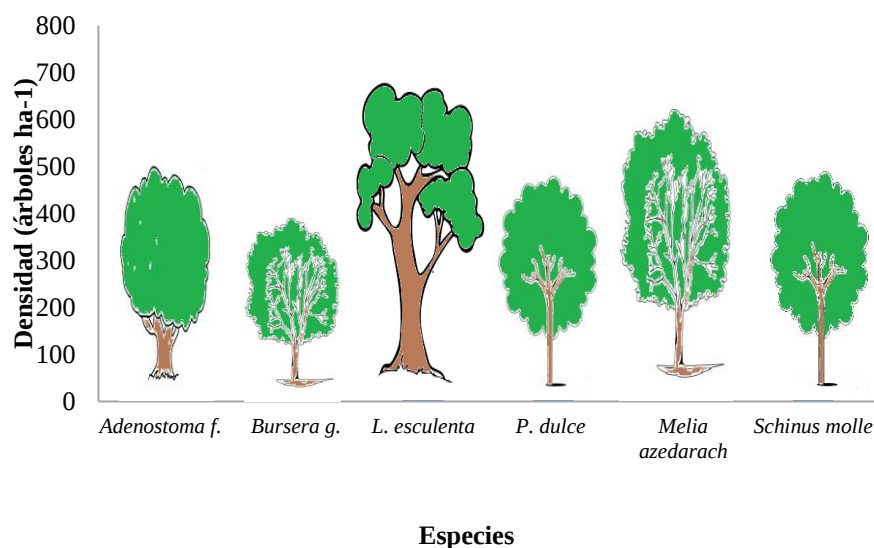


Figura 1. Densidad y distribución de especies del sistema agroforestal de ladera en Oaxaca, México. *Adenostoma fasciculatum*, *Bursera glabrifolia*, *Leucaena esculenta*, *Pithecellobium dulce*.

Biomasa aérea y área foliar

De los modelos alométricos probados para la estimación de biomasa en los compartimentos aéreos de *L. esculenta*, el de mejor ajuste ($R^2_{Adj} = 0.91$) es el que estima biomasa del árbol completo, con menor error estándar; se incluye diámetro al pie y altura de árbol en una función no lineal, obteniendo un total 7.27 t ha⁻¹ (Cuadro 1). Utilizando el modelo con un ajuste de $R^2_{Adj} = 0.87$, el SA genera 1.46 t ha⁻¹ de follaje, que representa una tasa de 146.6 kg ha⁻¹ año; del diámetro al pie es la mejor variable para estimar biomasa en follaje (Figura 2), sin embargo en el modelo se incluye además la altura de árbol que mejora la estimación.

El órgano que mayor captura biomasa es el tallo con 3.37 t ha⁻¹ utilizando las dos variables DN y AT ($R^2_{Adj} = 0.82$). Los diámetros son los mejores predictores de biomasa, lo que coincide con otros estudios (Fonseca *et al.*, 2009; Djomo *et al.*, 2010; Youkhana e Idol, 2011). Las ramas generan 2.104 t ha⁻¹, lo que representa una tasa de 210.4 kg ha⁻¹/año con $R^2_{Adj} = 0.80$ (Cuadro 1).

Este resultado es consistente con modelos de biomasa ajustados para especies como *Acacia harpophylla* F. Muell, los cuales mostraron $R^2 = 0.96$ (Eamus *et al.*, 2000). También concuerdan con los encontrados por Ávila *et al.* (2000) en sistemas agroforestales de café-*Eucalyptus deglupt* Blume, de acuerdo con el análisis de residuales, el modelo de biomasa en ramas (B_{ramas}) brinda una estimación apropiada y no presenta problemas de sesgo.

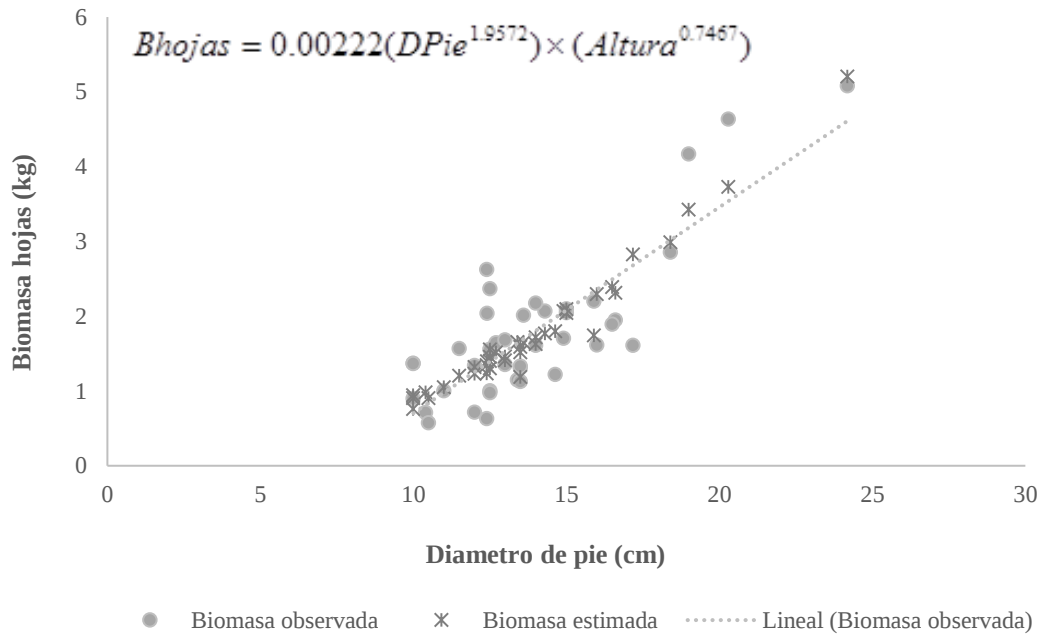


Figura 2. Estimación de biomasa de hojas (B_{hojas}), a partir del variables de inventario en *Leucaena esculenta*.

Cuadro 1. Parámetros, errores estándar y bondades de ajuste (R^2_{adj}) para la biomasa (B, kg) aérea, volumen (m^3) y área foliar (m^2) de *Leucaena esculenta*.

Variable	β_0	Error estándar	β_1	Error estándar	β_2	Error estándar	R^2_{Adj}
$B_{hoja}^{¶}$	0.002	0.002	1.95	0.18	0.74	0.50	0.87
$B_{rama}^{¶}$	0.0009	0.001	2.53	0.24	0.57	0.68	0.80
$B_{flor}^{¶}$	0.0029	0.006	1.45	0.48	0.60	1.18	0.40
$B_{tallo}^{¶¶}$	0.0227	0.029	1.79	0.17	0.71	0.68	0.82
$B_{árbol}^{¶}$	0.0039	0.003	2.21	0.15	1.01	0.45	0.91
Volumen ¶¶¶	0.000002	0.000002	2.52	0.18			0.85
Área foliar ¶¶	0.004	0.007	2.24	0.17	1.44	0.81	0.83

¶ La ecuación ajustada fue de la forma $B_{hoja} = \beta_0 \times (DPiE^{\beta_1}) \times (ALTURA^{\beta_2})$. ¶¶ Ecuación ajustada $B_{tallo} = \beta_0 \times (DN^{\beta_1}) \times (ALTURA^{\beta_2})$. ¶¶¶ Ecuación ajustada $Volumen = \beta_0 \times (DPiE \times ALTURA)^{\beta_1}$. DPiE: diámetro al pie del árbol (cm), DN: diámetro normal (cm).

Este tipo de ecuaciones para estimar la biomasa ha proporcionado buenos ajustes en otras especies. Por ejemplo, Deans *et al.* (1996) obtuvieron $R^2 > 0.97$ en muestras de 14 árboles de cinco especies tropicales. Muchos estudios sobre modelos predictivos de estimación de biomasa por especie indican la superioridad de la función potencial (Ketterings *et al.* 2001; Acosta-Mireles *et al.* 2002; Sampaio & Silva 2005), la cual se mejora al incluir la altura total del árbol.

Entre estos se destaca el modelo de biomasa foliar obtenido, cuyo coeficiente de ajuste es superior a otras especies de selva baja caducifolia y que ha sido ajustado con éxito también para especies arbóreas latifoliadas como *Carpinus caroliniana* Thomas Walter, *Carya ovata* (Mill.) K.Koch, *Clethra pringleii* Wats. y *Quercus xalapensis* Bonpl. con coeficientes de determinación entre 0.97 y 0.99 (Rodríguez *et al.*, 2006). El área foliar se estima confiablemente ($R^2_{adj} = 0.83$) utilizando diámetro a la altura del pecho (DN) y AT, lo cual indica un buen nivel de precisión en la medición de los datos (Cuadro 1). Esta respuesta coincide con lo encontrado, en cerezas (Torri *et al.*, 2009), en guayaba (Singh, 2007) y manzano (Nautival *et al.*, 1990).

La incorporación de biomasa al suelo dentro del SA fue la misma ($p \leq 0.23$) durante los meses evaluados, incluyendo la interacción densidad×mes (Figura 3). Densidades de plantación de 907 árboles ha^{-1} generan la mayor incorporación al suelo ($p \leq 0.0183$) con 76.38 ± 23.52 $kg\ ha^{-1}$; lo cual concuerda con lo aportado por Moran *et al.* (2000) y Herrera *et al.* (2001), que indican que altas densidades de plantación incorporan mayor cantidad de follaje al suelo, que en el caso de la presente durante el periodo de febrero a mayo, el promedio mensual de incorporación de follaje fue de $61.44\ kg\ ha^{-1}$.

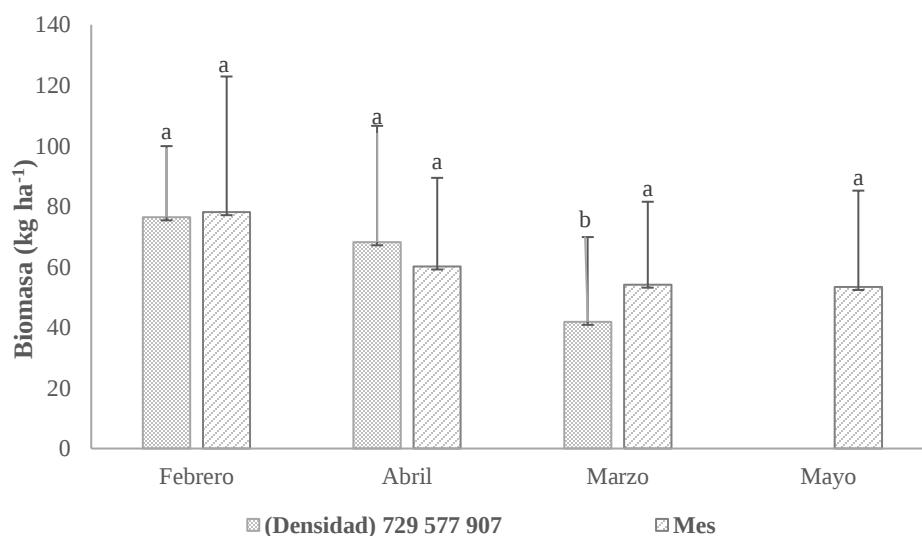


Figura 3. Incorporación de biomasa al piso del sistema agroforestal de manera mensual de acuerdo a la densidad de leñosas (árboles ha^{-1}). Letras distintas en cada variable indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar.

CONCLUSIONES

A 10 años de establecido el sistema agroforestal (SA) de ladera de *Leucaena esculenta* Benth (guaje), en los Valles Centrales de Oaxaca, México, se tiene una tasa de incorporación de biomasa aérea total de 727 kg ha⁻¹/año (tallo, hoja, rama, flor), estimada con un coeficiente de determinación de 0.91 y utilizando variables de fácil medición (diámetro al pie y altura de árbol). El SA se caracteriza por tener una diversidad de seis especies: *Leucaena esculenta* Benth, *Adenostoma fasciculatum* Hook. & Arn., *Bursera glabrifolia* Engl, *Pithecellobium dulce* Benth, *Melia azedarach* L. y *Schinus molle* L. Su estructura vertical y horizontal tiende a la regularidad, cuya frecuencia de individuos es distinta entre las categorías evaluadas, conteniendo 643 árboles ha⁻¹ las categorías 10 y 15 cm de diámetro. Este estudio permite concluir que el diámetro (al pie y a la altura del pecho) y altura de los árboles influyen directamente en la cantidad de biomasa aérea aportada para cada árbol; y por su fácil medición en campo son las variables que deben utilizarse para estimar producción de biomasa, volumen maderable y área foliar en el SA de ladera. Estos modelos pueden contribuir notablemente en el monitoreo del carbono aéreo de la especie.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., A. Vargas-Hernández, A. Velásquez-Martínez y J. D. Echevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36:725–736.
- Alonso, J. 2011. Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 45:107–115.
- Anguiano, J. M., J. Aguirre y J. M. Palma. 2012. Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocos nucifera*). *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 46:103–107.
- Arroyo-Rodríguez, V. and S. Mandujano. 2006. The importance of tropical rain forest fragments to the conservation of plant species diversity in los Tuxtlas, México. *Biodiversity and Conservation* 15:4159–4179. doi:10.1007/s10531-005-3374-8
- Asner, G. P., C. E. Borghi and R. Ojeda. 2003. Desertification in central Argentina: changes in ecosystem carbon and nitrogen from imaging spectroscopy. *Ecological Applications* 13:629–648.
- Ávila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis. Magister. Scientiae. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza 99 p.
- Beer, J., C. Harvey, M. Ibrahim, J. M. Harmand, E. Somarriba y F. Jiménez. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10:80–87.
- Cervantes, V., V. Arriaga, J. Meave and J. Carabias. 1998. Growth analysis of nine multipurpose woody legumes native from southern México. *Forest Ecology and Management* 110:329–341.
- Clement, Ch. R., M. Cristo-Araujo, C. G. d'Eeckenbrugge, A. A. Pereira and D. Picanco-Rodríguez. 2010. Origin and domestication of native Amazonian crops. *Diversity* 2:72–106. doi:10.3390/d2010072
- Deans, J. D., J. Mora and J. Grace. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameeroon. *For. Ecol. Manag.* 88: 215–225.
- Diéguez, U., M. Barrio and F. Castedo. 2003. Dendrometría. Editorial Mundi Prensa. (Unidad didáctica de Dendrometría). Madrid. 327 p.

- Djomo, A. N., A. Ibrahima, J. Saborowski, and G. Gravenhorst. 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *For. Ecol. Manag.* 260:1873–1885. doi: 10.1016/j.foreco.2010.08.034
- Eamus, D., K. McGuinness and W. Burrows. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and Western Australia. Queensland, Australia, Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System. Technical Report N° 5A. <http://www.fullcam.com/FullCAMServer/Help/rep/5A.pdf> (Enero 2019).
- Fonseca, G. W., F. G. Alice y J. M. B. Rey. 2009. Modelos para estimar biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30:36–47.
- Gliessman, S. R. 2007. *Agroecology the ecology of sustainable food systems*. Second Edition. CRC Press. United States of America. 384 p.
- Gómez-Castro, H., R. Pinto-Ruiz, F. Guevara-Hernández y A. Gonzalez-Reyna. 2010. Estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (lam). y *Leucaena leucocephala* (jacq.) y su aplicación en sistemas silvopastoriles. *Revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA)* 4:256–270.
- Hernández, A., F. L. Marentes, D. Vargas, H. Ríos y F. Padrón. 2008. Características de los suelos y sus reservas de carbono en la finca la colmena de la Universidad de Cienfuegos, Cuba. *Cultivos Tropicales*. 29:27–34.
- Hernández, C. E. 2013. Evaluación de los sistemas agroforestales con leguminosas nativas en la restauración del suelo en la montaña de Guerrero, México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 2–4.
- Herrera, A., M. A. I. J. Del valle, and O. S. Alonso. 2001. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. *In*. Memorias del simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. pp. 18.
- Houghton, R. A. 2005. Aboveground biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology* 11: 945–958. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x
- Ibrahim, M., M. Chacón, C. Cuarta, J. Naranjo, G. Ponce, P. Vega, F. Casasola y J. Rojas. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45:27–36.
- Idol, T., J. Haggard and L. Cox. 2011. Ecosystem services from smallholder forestry and agroforestry in the tropics. W. B. Campbell y S. López-Ortíz (Eds.). *Integrating Agriculture, Conservation and Ecotourism: Examples from the Field, Issues in Agroecology – Present Status and Future Prospectus* 1. pp. 209–270.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. IPCC Special Report: Land use, land use change and forestry. *S. N. T.* <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf> (Febrero 2019).
- Kanani, J., S. D. Lukefahr and R. L. Stanko. 2006. Evaluation of tropical forage legumes (*Medicago sativa*, *Dolichos lablab*, *Leucaena leucocephala* and *Desmanthus bicornutus*) for growing goats. *Small Ruminant Research* 65(1-2): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.04.028>
- Ketterings, Q. M., R. Coe, M. Noordwijk, V. Y. Ambagau and C. A. Palm. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting aboveground tree biomass in mixed secondary forest. *Forest Ecology and Management* 146:199–209.
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83: 37–46. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3

- Moran, J. A., M. G. Barker, A. J. Moran, P. Barker and S. M. Ross. 2000. A comparison of the soil water, nutrient status, and litterfall characteristics of tropical heath and mixed-dipterocarp forest sites in Brunei. *Biotropica* 32:2–13.
- Nair, P. K. R., K. B. Mohan and V. D. Nair. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172:10–23. doi: 10.1002/jpln.200800030
- Nautival, B. M., P. K. Singh, R. N. Sukla, S. Prakash and A. Kumar. 1990. Correcting leaf area measurement by conventional methods: a new approach for apple (*Malus domestica* Borkh). *Journal of Horticultural Science* 65:15–18.
- Ochoa-Gaona, S., F. Hernández—Vázquez, B. H. J. De Jong y F. D. Gurri-García. 2007. Pérdida de diversidad florística ante un gradiente de intensificación del sistema agrícola de roza—tumba—quema: un estudio de caso en la Selva Lacandona, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 81:65–80.
- Orwa, C., A. Mutua, R. Kindt, R. Jamnadas and A. simons. 2009. Agroforestry Database: A tree referent and selection guide versión 4.0. World Agroforestry Centre, Kenya. <https://www.worldagroforestry.org/publication> (Consultado: Agosto 2019).
- Rodríguez, R., J. Jiménez, O. Aguirre and E. Treviño. 2006. Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. México, Universidad autónoma de Nuevo León. *Ciencia* 9:179–187. <http://www.redalyc.org/pdf/402/40290212.pdf>.
- Rosales, A. J. J., V. Cruz y E. Cevallos. 2009. Manejo del agroecosistema de piña cultivada bajo sombra en Villa Purificación, Jalisco, México. *Revista Brasileña de Agroecología* 4:3931–3935.
- Rügnitz, M., M. Chacón y R. Porro. 2009. Guía para la determinación de carbono en pequeñas granjas: Agroforestal Mundial (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). Lima, Perú 79 p.
- Salgado-Mora, M. G., J. E. Ibarra-Núñez, G. Macías-Sámano and O. López-Báez. 2007. Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México. *Interciencia* 32:763–768.
- Sampaio, E. V. S. B. and G. C. Silva. 2005. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. *Acta Botanica Brasilica* 19:935–943. doi.org/10.1590/S0102-33062005000400028
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT® 9.4 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. 1024 p.
- Sepúlveda, L. C. y M. Ibrahim. 2009. Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central. Serie técnica. Informe técnico No. 377. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 270 p.
- Shelton, H. M. 2000. Leguminosas forrajeras tropicales en los sistemas agroforestales. *Unasylva* 51:25–32.
- Singh, A. 2007. Approximation of leaf area by using leaf dimensions in guava. I International Guava Symposium. *Acta Horticulturae* 735:321–324.
- Spurgeon, D. 1981. Agroforestry: a promising system of improved land management for Latin America. *Interciencia* 5:176:178.
- Torri, S. I., C. Descalzi and E. Frusso. 2009. Estimation of leaf area in pecan cultivars (*Carya illinoensis*). *Ciencia e Investigación Agraria* 36:53–58. doi.org/10.4067/S0718-16202009000100004
- Velasco, B. E., E. R. Sánchez, A. G. Hernández, F. M. Sánchez y R. P. Miranda. 2012. Funciones de biomasa y carbono aéreo aplicables a árboles de *Pinus pseudostrobus* lindl. En México. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 34:315–319.
- Villavicencio, A. A. 2009. Propuesta metodológica para un sistema de pago por servicios ambientales en el Estado de México. *Cuadernos Geográficos* 44:29–49.

Youkhana, A. and T. Idol. 2011. Allometric models for predicting above- and belowground biomass of *Leucaena* -KX2 in a shaded coffee agroecosystem in Hawaii. *Agrofor. Syst.* 83:331–345.