






SISTEMAS SILVOPASTORILES Y CAMBIO CLIMÁTICO: ESTIMACIÓN Y PREDICCIÓN DE BIOMASA ARBÓREA

SILVOPASTURE SYSTEMS AND CLIMATE CHANGE: ESTIMATE AND PREDICTION OF ARBOREAL BIOMASS

Edwin Rolando Jiménez Ruíz*¹ , William Fonseca González²  y Leticia
Pazmiño Pesantez¹ 

¹ Facultad Ciencias de la Vida, Escuela Superior Politécnica del Litoral Campus Gustavo Galindo, Guayaquil, Ecuador.

² Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional Autónoma de Costa Rica, Heredia, Costa Rica.

*Autor para correspondencia: ejimenez@espol.edu.ec

Manuscrito recibido el 4 de febrero de 2018. Aceptado, tras revisión, el 27 de febrero de 2019. Publicado el 1 de marzo de 2019.

Resumen

En este trabajo se cuantificó la biomasa y el carbono almacenado en la cobertura vegetal de un sistema silvopastoril compuesto por pasto (*Hyparrhenia rufa*) y guasmo (*Guazuma ulmifolia*) establecido en forma natural en el cantón Balzar de la provincia Guayas en Ecuador. A través del método destructivo y con un muestreo aleatorio por medio de parcelas anidadas, se evaluó la cantidad de biomasa arbórea y subterránea de árboles de diámetro promedio, la necromasa y la vegetación herbácea. Se desarrollaron modelos para estimar la biomasa del árbol completo, sus componentes (tronco, raíz, ramas y hojas) y el volumen. La biomasa arbórea es de $16,45 \text{ Mgha}^{-1}$ ($8,23 \text{ MgC ha}^{-1}$) y el aporte de la vegetación herbácea y la necromasa de $1,4$ y $1,9 \text{ Mgha}^{-1}$ ($0,7$ y $0,95 \text{ MgC ha}^{-1}$), respectivamente. Los modelos predicen la biomasa y el volumen en función del diámetro con errores de estimación o sesgos menores al 3% y mostraron ajustes (R^2) mayores a 96%. Adicionalmente, se generó información sobre factores de expansión de biomasa.

Palabras clave: Biomasa, carbono, Guazuma, mitigación, alometría.

Abstract

In this work both the biomass and carbon present in a vegetative cover from a silvopastoral system were quantified. The system, composed of *Hyparrhenia rufa* and *Guazuma ulmifolia*, was established naturally in Balzar, Guayas province of Ecuador. By using a destructive method and a random sampling in nested plots both the arboreous and underground biomass of average-sized trees were measured as well as the necromass and herbaceous vegetation. Models were developed in order to estimate the volume and the biomass of the whole tree and its components (trunk, roots, branches and leaves). The arboreous biomass was estimated in $16,45 \text{ Mg/ha}$ ($8,23 \text{ MgC/ha}$), whereas the herbaceous vegetation and the necromass were $1,4$ and $1,9 \text{ Mg/ha}$ ($0,7$ and $0,95 \text{ MgC/ha}$), respectively. The models predict

the biomass and the volume in dependence of the diameter with less than 3% of error and R^2 values higher than 96%. In addition, information regarding factors that influence the expansion of biomass were generated.

Keywords: Biomass, carbon, Guazuma, mitigation, allometric.

Forma sugerida de citar: Jiménez Ruíz, E. R., Fonseca González, W. y Pazmiño Pesantez, L. (2019). Sistemas silvopastoriles y cambio climático: Estimación y predicción de biomasa arbórea. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 29(1):45-55. <http://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.04>.

IDs Orcid:

Edwin Rolando Jiménez Ruíz: <http://orcid.org/0000-0001-7930-1081>

William Fonseca González: <http://orcid.org/0000-0002-4546-9035>

Leticia Pazmiño Pesantez: <http://orcid.org/0000-0001-7045-8445>

1 Introducción

El cambio climático de origen antrópico ha sido un tema muy discutido en foros a nivel mundial y los estudios que hacen referencia a este problema son abundantes (IPCC, 2013; Herrán, 2012). Las categorías de emisión más contaminantes son energía, procesos industriales y usos de subproductos (MINAE-IMN, 2014), sin dejar de lado el sector agropecuario, se conoce que la deforestación y la degradación de bosques tropicales genera entre el 15 y 35% de las emisiones globales (Houghton, 2005). El sector agropecuario es altamente emisor por el consumo de fertilizantes, por la descomposición anaeróbica y la liberación de metano (CH_4) como el caso del arroz (MINAE-IMN, 2014) o la liberación de CH_4 generada por la ganadería (Agarwal y col., 2008). El metano es un gas de efecto invernadero con alto valor de forzamiento radiactivo 23 veces mayor al del CO_2 (Agarwal y col., 2008). Las praderas, asociadas a la ganadería ocupan el 41% de la superficie terrestre y contribuyen en un 18% al cambio climático (9% de las emisiones de CO_2 , 37% de las emisiones de metano y 65% de óxido nitroso (Steinfeld y col., 2006).

A nivel mundial se estima que existen unos 3442 millones de hectáreas con pastos (FAO, 2007), de ellas 516 millones pueden estar cubiertas de sistemas agroforestales (Nair, Mohan y Nair, 2009). La ganadería vacuna es uno de los principales usos de la tierra en América Latina, y en general, en las regiones tropicales se caracteriza por bajos niveles de productividad y rentabilidad. Y es responsable de incrementos significativos en las tasas de deforestación, acompañados de procesos de degradación de suelos, fragmentación de paisajes, pérdidas de biodiversidad, escasez del agua y reducción del nivel de ingresos (Quero Carrillo, Enríquez Quiroz y Miranda Jiménez, 2007). El sector agropecuario y especialmente los sistemas silvopastoriles son reconocidos a nivel mundial por sus múltiples beneficios, como por sus productos de carne y leche para el consumo humano, los productos de madera (madera para aserrío y leña), sus árboles que proporcionan abrigo y alimento para la fauna silvestre (Alonso, 2011); ya que contribuyen a revertir los procesos de degradación de los pastizales porque protegen el suelo, contribuyen en la recuperación de la fertilidad (Nair, Mohan y Nair, 2009), son fijadores de dióxido de carbono (CO_2) en la biomasa (Ibrahim y col., 2007; Bacab y col., 2013) y mejoran la calidad y

cantidad del recurso hídrico (Nair, Mohan y Nair, 2009).

Desde el punto de vista del cambio climático son una amenaza por la liberación del metano producto de las excretas de los animales domésticos (Steinfeld y col., 2006; Agarwal y col., 2008). En América Central y alrededor del mundo, existen extensas áreas de pasturas con un alto potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático si son manejadas bajo sistemas silvopastoriles (Nair, Mohan y Nair, 2009; FAO, 2010). Actualmente existe información científica que reconoce el potencial de mitigación de los sistemas agrícolas y ganaderos (FAO, 2010) y el tema se discute bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Murphy y Boyle, 2012).

En las zonas semi secas de la provincia del Guayas en Ecuador sobresalen los sistemas silvopastoriles de *Hyparrhenia rufa* con *Guazuma ulmifolia* y *Samanea saman*. A *G. ulmifolia* se le atribuyen gran variedad de usos: producción de forraje y frutos para ganado bovino, frutos para fauna silvestre, tiene un néctar valioso para la producción de miel de alta calidad, leña de buena calidad, el fruto, hoja, corteza, raíz y la flor poseen propiedades medicinales, tienen múltiples efectos restauradores del medio ambiente y presta muchos servicios ambientales (Villa Herrera y col., 2009).

Con estos antecedentes, se inició un estudio cuyo objetivo fue cuantificar la capacidad de mitigación del cambio climático de sistemas silvopastoriles con *G. ulmifolia*, evaluando la cantidad de biomasa arbórea y bajo el suelo para desarrollar modelos de biomasa. Adicionalmente, se generó información sobre factores de expansión de biomasa e incrementos en biomasa que son elementos básicos para el monitoreo del carbono.

2 Materiales y métodos

2.1 Zona de estudio

El trabajo de campo se desarrolló en la Hacienda El Diamante, ubicada en el cantón Balzar, provincia Guayas, Ecuador, a 52 msnm, con 26°C de media anual y una precipitación media de 834,7 a 1183,7mm (INAMHI, 2014). El predio registra un área de 265 hectáreas, destinadas en su gran mayoría a la ganadería. La cobertura del suelo está compuesta por la combinación de samán (*Samanea saman*) + pasto puntero (*Hyparrhenia rufa*) y guas-

mo (*Guazuma ulmifolia*) + (*H. rufa*). *Guazuma ulmifolia* forma parte del sistema silvopastoril desde el año 2000, cuando el propietario de la hacienda decidió proteger la regeneración de esta especie para ser usada como forraje. El área con samán, también es el resultado de una regeneración natural, luego de un incendio forestal en 1996. En ambas especies el distanciamiento entre individuos es irregular.

2.2 Evaluación de la biomasa de *G. ulmifolia* y de *Hyparrhenia rufa*

En cada uno de los sitios se instalaron tres unidades de muestreo circulares de 1000 m² (17,84 m de ra-

dio), de forma aleatoria y se midió el diámetro a 1,3 m sobre el nivel del suelo (Diámetro a la Altura de Pecho -DAP-) de cada uno de los árboles y la altura del fuste comercial y total con un hipsómetro Haga (50 árboles en promedio). La parcela se dividió en cuadrantes para muestrear distintos tamaños de árboles: en la unidad completa se midieron los que tenían un DAP > 4,8cm, en 250 m² los individuos entre 1,6 y 4,7 cm y en una subparcela de 25 m² los arbustos entre 0,6 y 1,5 cm. El pasto puntero y la necromasa se evaluaron en unidades de 0,5 m². La ubicación de cada unidad de muestreo se presenta en la Tabla 1. Para calcular el volumen se usó la fórmula de Smalian (Prodan y col., 1997).

Tabla 1. Ubicación de las unidades de muestreo dentro el área de estudio.

| GRID | UTM | |
|-----------------------|-----------------|---------|
| DATUM | WGS 84 | |
| Descripción | Posición | |
| UPM 4 guasmo- H. rufa | 17 M 615376 | 9849155 |
| UPM 5 guasmo- H. rufa | 17 M 615280 | 9848718 |
| UPM 6 guasmo- H. rufa | 17 M 615695 | 9848589 |

Con el fin de calcular la biomasa de hojas, ramas y raíces, se extrajo el árbol promedio por parcela (MacDicken, 1997) y se determinó en el campo el peso (kg) de cada componente. Las raíces, principalmente la de anclaje, se extrajeron con una retroexcavadora. Seguidamente se colectaron muestras húmedas de aproximadamente 1,0kg. Para el tronco se tomaron tres muestras (de la parte basal, central y apical) y se mezclaron para obtener una compuesta. Este material fue llevado al laboratorio y secado en un horno a 75°C hasta obtener un peso constante. La biomasa seca de cada componente se obtuvo del cociente "peso seco/peso húmedo".

Con la biomasa seca de cada componente se calculó el factor de expansión de biomasa para hojas, ramas y raíz. Con el fin de aumentar el tamaño de la muestra para este cálculo se utilizó información de la misma especie, generada bajo la misma metodología, por el proyecto "Manejo del cambio climático a través del sector forestal en Costa Rica" desarrollado por la Universidad Nacional de Costa Rica. Este factor relaciona la biomasa de cada componente con respecto a la del fuste y fue usado para calcular la biomasa total de los árboles medidos en pie. La biomasa seca se pasó a carbono usando el factor

de conversión de 0,5 (IPCC, 2013).

2.3 Ajuste de modelos alométricos

Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgraphics Centurion XV. Se ensayaron aproximadamente 20 modelos para estimar la biomasa de cada componente del árbol (hojas, ramas, fuste, raíz), para el individuo completo y para el volumen. El rango diamétrico usado comprendió individuos desde 3,8 a 30,2 cm.

En todos los modelos la variable dependiente fue la biomasa o el volumen y la independiente el diámetro. En la selección de la ecuación de mejor ajuste se procedió según la metodología expuesta por Salas, (2002) y por Segura y Andrade Castañeda, (2008). Los supuestos de normalidad y homocedasticidad se probaron por medio del análisis gráfico de los residuales del modelo. Adicionalmente se graficaron los valores estimados contra los observados para ver si los modelos sobreestiman o subestiman el cálculo de la biomasa o del volumen. También por método gráfico se observó el comportamiento biológico de los modelos. La validación de las ecuaciones

se realizó según lo descrito por Moret y Ruiz, (1998) y Barrales, Peña y Reguera, (2004).

3 Resultados y Discusión

3.1 Acumulación de biomasa y carbono

La cantidad de biomasa acumulada (C fijado) en sistemas agrosilvopastoriles depende de múltiples interacciones entre los componentes árbol, pasto, suelo y animal (Shibu, 2009). En los sistemas forestales el carbono se acumula en cuatro componentes (biomasa arriba del suelo, necromasa, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo) y la biomasa leñosa representa el carbono con mayor permanencia (Snowdon y col., 2001) y el mayor almacén a nivel de árbol.

En el presente estudio la biomasa total fue de $19,75 \text{ Mg ha}^{-1}$ ($9,8 \text{ Mg C}$), los árboles de guasmo según el muestreo acumularon el 83% ($16,45 \text{ Mg ha}^{-1}$; $8,23 \text{ Mg Cha}^{-1}$), mientras que el aporte de la necromasa y el pasto fue de $1,4$ y $1,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ ($0,7$ y $0,95 \text{ Mg Cha}^{-1}$), con incrementos medios de $1,08 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ao}^{-1}$ y $0,55 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ao}^{-1}$, respectivamente. El componente arbóreo se compone de un promedio de 497 árboles ha^{-1} , distribuidos en una amplitud diamétrica de 3,8 a 30,2 cm.

Estas reservas de biomasa y/o carbono son comparables a los existentes en otras latitudes en bosques caducifolios, por ejemplo, en el trópico seco de Costa Rica, en sistemas silvopastoriles las especies maderables nativas *Dalbergia retusa*, *Dyphisa robinoides* y *Pithecellobium saman* en la biomasa arbórea aérea fijaron anualmente $0,2$; $1,25$ y $0,26 \text{ Mg Cha}^{-1}$, respectivamente (Rojas, Ibrahim y Andrade, 2009). En zonas de clima seco en México se han reportado valores promedios de biomasa de árboles en potrero de 13 Mg ha^{-1} (Hughes Flint, Kauffman Boone y Jaramillo, 2000) y de $5,9$ a $7,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ («Biomass, carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes»). Torres Rivera y col., (2011) reportan para un sistema silvopastoril con baja densidad del componente arbóreo (120 árboles ha^{-1}) una acumulación de $2,86 \text{ Mg Cha}^{-1}$ a los tres años. En Colombia, con la implementación de sistemas silvopastoriles Chará y col., (2009) citan incrementos en C almacenado de $0,51 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ao}^{-1}$ y en Costa Rica a los cuatro años y tres meses $12,5 \text{ Mg Cha}^{-1}$ (Andrade, Brook e Ibrahim, 2008). También en potreros arbolados sin una edad definida (Chacón León y Alice Harvey, 2013) para Costa Rica (Esparza) y

Nicaragua (Mitiguás) indican un promedio de biomasa de $10,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ con variaciones entre $5,3$ y $13,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, para estos mismos sitios Ibrahim y col., (2007) cita cifras de $3,2$ a $14,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ en árboles dispersos en potreros en Esparza y de 9 a $17,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ en Matiguás.

En Nicaragua, Ruiz, (2002) encontró contenidos de carbono de $8,2 \pm 3,0 \text{ Mg Cha}^{-1}$ en pasturas nativas con árboles (100 árboles ha^{-1}) y en pasturas mejoradas con árboles (110 árboles ha^{-1}) de $12,5 \pm 3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$. Mientras que en los Andes Colombianos la biomasa aérea de *Acacia decurrens* en sistema silvopastoril con abundancias de 1111 y 407 árboles ha^{-1} , mostró un incremento un anual de $9,9$ y $11,2 \text{ Mg Cha}^{-1}$ (Giraldo, Zapata y Montoya, 2008).

En el componente arbóreo la raíz acumuló el 18% de la biomasa total ($2,96 \text{ Mg ha}^{-1}$) y los componentes leñosos -raíz, fuste y ramas- el 95% ($15,63 \text{ Mg ha}^{-1}$), similar a lo citado por Anguiano, Aguirre y Palma, (2013) quienes reportan cifras entre 85 y 98% incluyendo las hojas. La biomasa aérea de los árboles fue de $13,49 \text{ Mg ha}^{-1}$. El tronco representa el 47,4% de la biomasa del árbol y el 57,7% de la biomasa aérea, valor que concuerda con lo encontrado por Gómez y col., (2010) para *Gliricidia sepium* (60,9%) y *Leucaena leuccephala* (58,3%).

La biomasa (C) determinada en este estudio también es similar a la reportada en sistemas agroforestales en Changuinola Panamá, en cacao plantado a $3 \times 3 \text{ m}$ más laurel a $6 \times 6 \text{ m}$ y $12 \times 12 \text{ m}$; el carbono almacenado en 25 años varió entre 43 – 62 Mg Cha^{-1} , cuyo incremento anual fue de $1,7$ y $2,5 \text{ Mg Cha}^{-1}$ (Ortiz, Riascos y Somarriba, 2008). Según Umaña y Conde, (2013), en Tolima, Colombia, en sistemas agroforestales de aguacate + plátano, cacao + aguacate y cacao + plátano, la fijación anual de carbono fue $2,23$; $4,14$ y $0,52 \text{ Mg}$, respectivamente.

En el componente arbóreo, la raíz a pesar de representar un carbono de mayor permanencia, ha sido poca estudiada porque se le atribuye un alto grado de dificultad (Dixon, 1995; Schlegel, 2001), a pesar de representar entre el 10 y 40% de la biomasa total (Cairns y col., 1997; MacDicken, 1997; Andrade e Ibrahim, 2003), en este estudio la raíz acumula el 18% de la biomasa del árbol. Cuantificar la biomasa radical es un esfuerzo que debe reconocerse en este estudio por la poca disponibilidad de información existente para la diversidad de especies. Usar valores generales en vez de información local y específica por especie puede generar cálculos con mucha

imprecisión.

Debe tenerse presente que, aunque la cantidad de biomasa o carbono determinada en este estudio sea similar o esté dentro del rango de lo reportado en la literatura, siempre existirán diferencias influen-

ciadas por la diversidad de arreglos espaciales de los sistemas silvopastoriles, diversidad de especies y variaciones metodológicas para cuantificar la biomasa.

Tabla 2. Modelos para estimar biomasa y volumen del fuste. El tamaño de la muestra fue 148 en todos los casos. Todos los modelos poseen una confianza $P < 0,0001$.

| Modelo | R^2 (%) | EEE | EMA | DW | ECM | DA | E (%) | AIC |
|---|--------------|--------|--------|---------------------------|-------|-------|----------|--------|
| $Btotal = (-0,180763 + 58,812 * DAP)^2$ | 96,21 | 0,6038 | 0,4438 | 0,656768 ($P = 0,0000$) | 9,971 | 0,351 | 2,909 | 2,308 |
| $Bfuste = (-0,124328 + 40,4522 * DAP)^2$ | 96,22 | 0,4152 | 0,3053 | 0,656758 ($P = 0,0000$) | 4,717 | 0,166 | 2,909 | 1,564 |
| $Bramas = (-0,0984273 + 32,0264 * DAP)^2$ | 96,22 | 0,3287 | 0,2417 | 0,656857 ($P = 0,0000$) | 2,957 | 0,104 | 2,909 | 1,1 |
| $Braz = (-0,0770575 + 25,0645 * DAP)^2$ | 96,22 | 0,2573 | 0,1892 | 0,656732 ($P = 0,0000$) | 1,81 | 0,06 | 2,909 | 0,614 |
| $Bhojas = (-0,0399297 + 12,983 * DAP)^2$ | 96,22 | 0,1333 | 0,098 | 0,656575 ($P = 0,0000$) | 0,486 | 0,017 | 2,907 | -0,683 |
| $Vol = (-0,00532694 + 1,80282 * DAP)^2$ | 96,24 | 0,0184 | 0,0134 | 0,682172 ($P = 0,0000$) | 0,009 | 0 | 3,107 | -4,408 |

Btotal: biomasa total del árbol (kg); *Bfuste*: biomasa del fuste (kg); *Bramas*: biomasa de ramas (kg); *Braz*: biomasa de raíz (kg); *Bhojas*: biomasa de hojas (kg); *DAP*: diámetro normal (m); *Vol*: volumen (m^3); R^2 : coeficiente de determinación; *EEE*: error estándar de la estimación; *EMA*: error medio absoluto; *ECM*: error cuadrático medio; *DA*: diferencia agregada; *E* (%): error de predicción del modelo; *AIC*: índice de Akaike.

3.2 Modelos de biomasa, volumen y factores de expansión

Los modelos para estimar la biomasa de los distintos componentes del árbol y para la biomasa total presentaron muy buenos ajustes ($R^2 > 0,96$, con $P < 0,0001$) y valores muy bajos para los otros estadísticos. Es importante resaltar que el error de predicción no supera el 3,1% (Tabla 2, Figura 1 y 2). Además, son modelos muy sencillos y prácticos que presentan poco grado de dificultad para el cálculo de la biomasa por usar solo el diámetro como variable regresiva. Se han logrado características similares de ajuste (predicción) con modelos para árboles en sistemas silvopastoriles cuya arquitectura es diferente a la de árboles en plantación pura y de bosque natural, por ejemplo, para árboles dispersos de motilón silvestre *Freziera canescens* Cabrera y col., (2007) logró un ajuste de $R^2 = 89,61$ para estimar la biomasa aérea en función del DAP, y ajuste más bajo 71,81; 87,60; 87,57, cuando usaron como variable independiente la altura, el volumen y el área basal, respectivamente. Gómez y col., (2010) lograron ajustes inferiores lograron para *Gliricidia sepium* (R^2 entre 75 y 86) y de 61 a 87% en *Leucaena leucocephala*. Es sorprendente el buen ajuste para ramas y hojas,

componentes que en otras investigaciones presentan un ajuste inferior como el reportado por Fonseca, Alice y Rey, (2009) para especies en bosque secundario (83,04% en hojas, 88,25% en raíz), para *Vochysia guatemalensis* (89,05% en hojas) e *Hieronyma alchorneoides* (89,69% en raíz), o R^2 superiores al 70%, con errores de estimación superiores al 25% (Fonseca y col., 2016). Correlaciones bajas entre la biomasa de hojas y ramas con el diámetro también fueron reportadas por Montero y Kanninen, (2002), Nívar, González y Graciano, (2011) y Pérez y Kanninen, (2003).

El modelo elegido para estimar el volumen total del fuste presenta las mismas características de los modelos para biomasa (Tabla 2, Figura 1 y 2). La bondad de ajuste lograda ($R^2 = 96,2\%$) es igual o superior al obtenido para otras especies (Da Cunha y Guimarães Finger, 2009; Barrios, López y Nieto, 2014; Ramos y col., 2014).

El factor de expansión de biomasa para hojas fue de 0,1 ($S = 0,03$), 0,66 ($S = 0,15$) para ramas y de 0,39 ($S = 0,10$) en raíz, valores que se encuentran dentro del rango reportado en diferentes estudios, con diferentes especies y para otras latitudes (Fonseca, Alice y Rey, 2009; Schlegel, 2001; Segura y col., 2000).

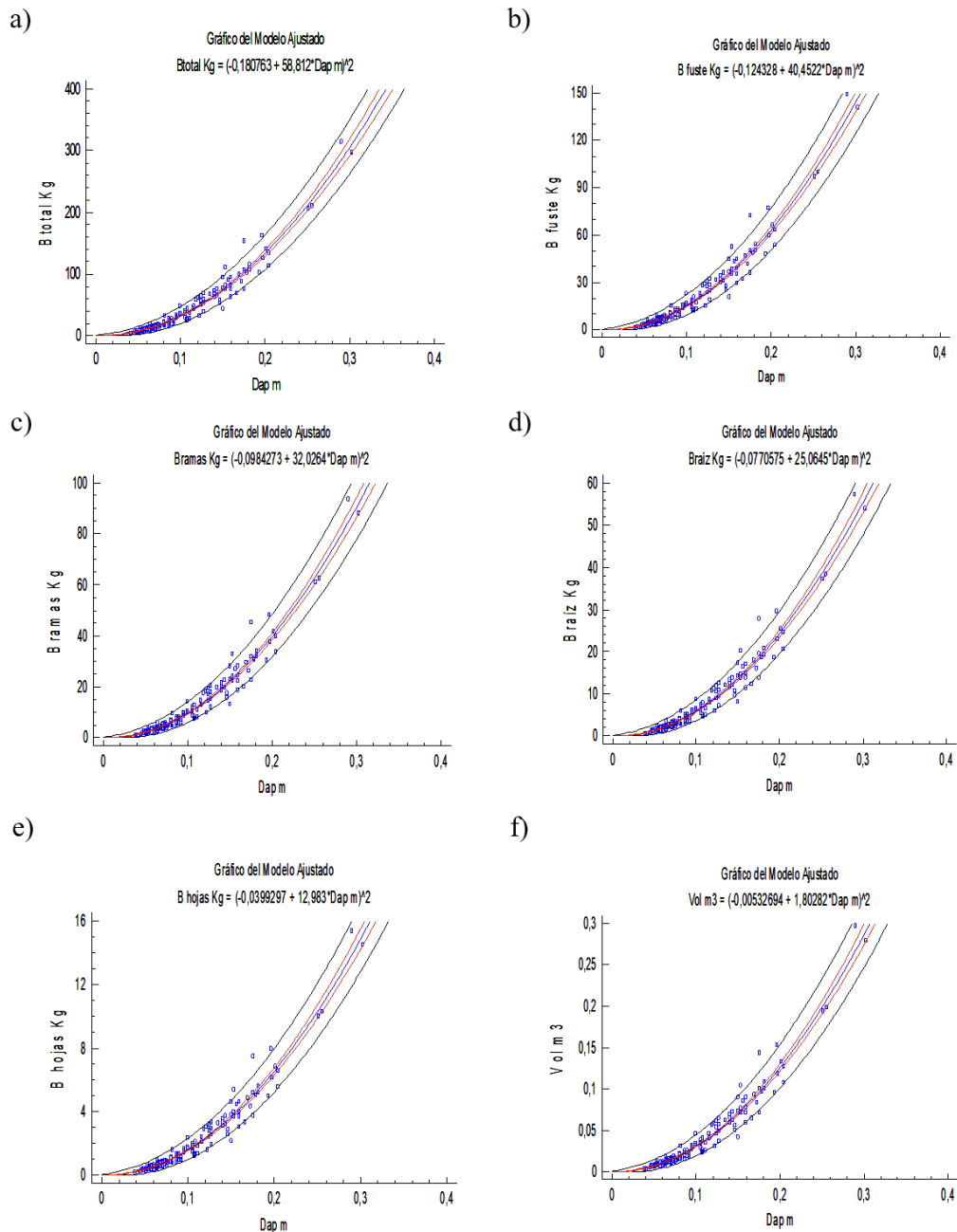


Figura 1. Modelos para estimar biomasa y volumen. a) biomasa total, b) biomasa del fuste, c) biomasa de ramas, d) biomasa de raíz, e) biomasa de hojas, f) volumen del fuste.

4 Conclusiones

Los sistemas silvopastoriles representan un aporte significativo a la mitigación del cambio climático, beneficio que puede incrementarse si se introducen técnicas de manejo.

Las ecuaciones para estimar la biomasa y el volumen de los árboles ayudan a reducir el costo de los inventarios de carbono para aquellas organizaciones que están en proceso de buscar la neutralidad del carbono o para la definición de políticas a nivel nacional. El uso del diámetro como variable predic-

tora el diámetro facilita su aplicación y reduce los errores de estimación, además, la capacidad de predicción de estos modelos ($R^2 > 96\%$) y el bajo error de estimación ($E < 3\%$) aportan mucha confiabilidad en las estimaciones.

Cuantificar la biomasa radical es un esfuerzo que

debe reconocerse en este estudio por la poca disponibilidad de información existente para la diversidad de especies. El uso de valores generales en vez de información local y específica por especie puede generar cálculos con mucha imprecisión.

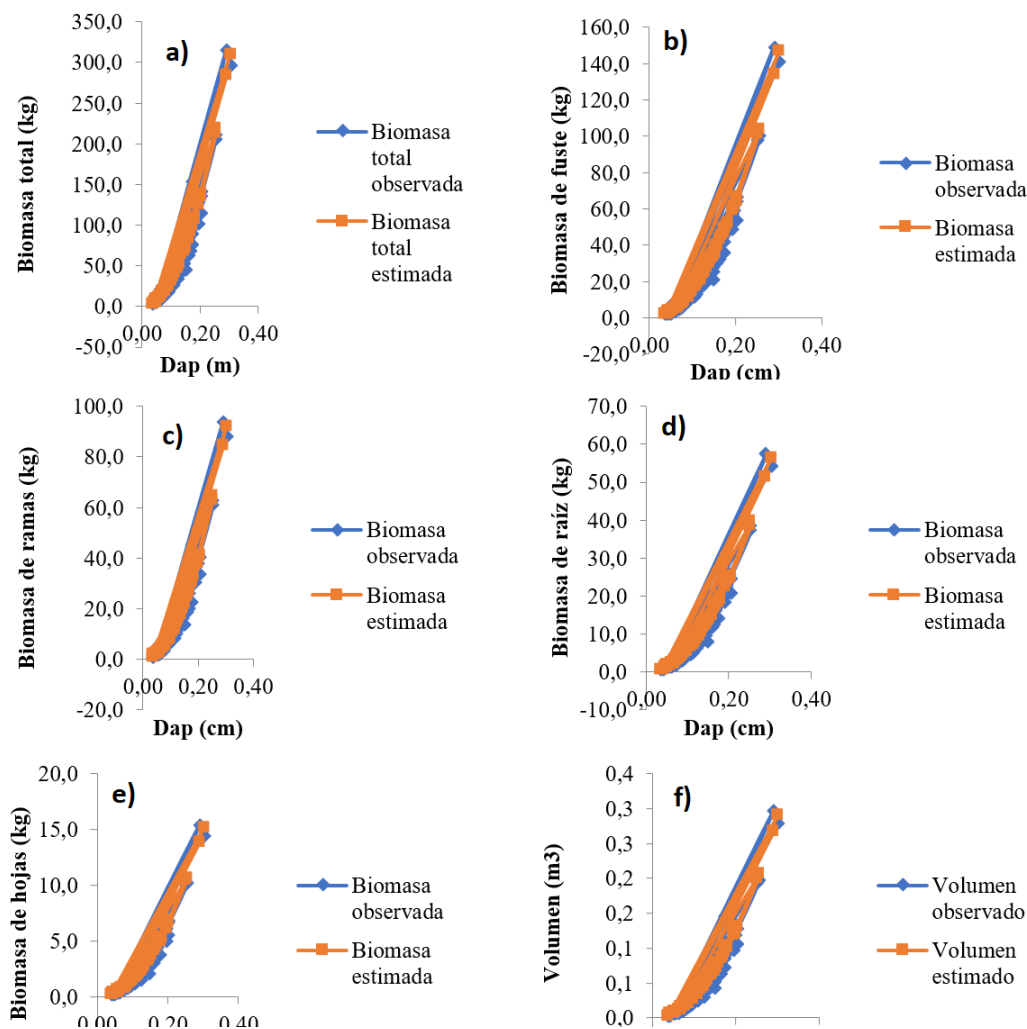


Figura 2. Estimación de biomasa y volumen a partir del diámetro: a) biomasa total [$B_{total} = (-0,180763 + 58,812 * DAP)^2$], b) biomasa del fuste [$B_{fuste} = (-0,124328 + 40,4522 * DAP)^2$], c) biomasa de ramas [$B_{ramas} = (-0,0984273 + 32,0264 * DAP)^2$], d) biomasa de raíz [$B_{raiz} = (-0,0770575 + 25,0645 * DAP)^2$], e) biomasa de hojas [$B_{hojas} = (-0,0399297 + 12,983 * DAP)^2$], f) volumen del fuste [$Vol = (-0,00532694 + 1,80282 * DAP)^2$].


Referencias

Agarwal, Neeta y col. (2008). «In vitro methanogenesis, microbial profile and fermentation of green forages with buffalo rumen liquor as in-

fluenced by 2-bromoethanesulphonic acid». En: *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 21,6, 818-823. Online: <https://bit.ly/2tDmkEU>.

Alonso, J. (2011). «Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente». En: *Revista*

- Cubana de Ciencia Agrícola 45.2, 107-115. Online: <https://bit.ly/2T4G8jF>.
- Andrade, Hernán J., Robert Brook y Muhammad Ibrahim (2008). «Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica». En: *Plant and Soil* 308.1-2, 11-22. Online: <https://bit.ly/2GTKQdN>.
- Andrade, Hernán y Muhammad Ibrahim (2003). «¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?» En: *Agroforestería en las Américas* 10.39-40, 109-116. Online: <https://bit.ly/2XBIWoi>.
- Anguiano, J. M., J. Aguirre y J. M. Palma (2013). «Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de Cocos nucifera, Leucaena leucocephala Var. Cunningham y Penisetum purpureum. Cuba CT-115». En: 17.1, 149-160. Online: <https://bit.ly/2SzC71K>.
- Bacab, H. M. y col. (2013). «Los sistemas silvopastoriles intensivos con Leucaena leucocephala: una opción para la ganadería tropical». En: *Avances en Investigación Agropecuaria* 17.3, 67-81. Online: <https://bit.ly/2Nydtjx>.
- Barrales, V., R. Peña y Pedro Fernández de la Reguera (2004). «Validación de modelos: un enfoque aplicado». En: *Agricultura técnica* 64.1, 66-73. Online: <https://bit.ly/2UcqCPo>.
- Barrios, Alonso, Ana M. López y Víctor Nieto (2014). «Predicción de volúmenes comerciales de Eucalyptus grandis a través de modelos de volumen total y de razón». En: *Colombia forestal* 17.2, 137-149. Online: <https://bit.ly/2H68aUT>.
- Cabrera, G. y col. (2007). «Estimación de la biomasa aérea y captura de carbono en árboles dispersos en potreros con motilon silvestre (*Freziera canescens*) en el Municipio de Pasto Nariño – Colombia». En: *Revista de Ciencias Agrícolas* 24.12, 46-55. Online: <https://bit.ly/2NAtO4S>.
- Cairns, Michael A. y col. (1997). «Root biomass allocation in the world's upland forests». En: *Oecologia* 111.1, 1-11. Online: <https://bit.ly/2EAKpm6>.
- Chacón León, Mario y Celia Alice Harvey (2013). «Reservas de biomasa de árboles dispersos en potreros y mitigación al cambio climático». En: *Agronomía Mesoamericana* 24.1, 17-26. Online: <https://bit.ly/2BPXXsb>.
- Chará, J. y col. (2009). *Evaluación ambiental del proyecto de ganadería colombiana sostenible*.
- Da Cunha, Thiago Augusto y César Augusto Guimarães Finger (2009). «Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de Pinus taeda L. en el sur de Brasil». En: *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 6.16, 1-15. Online: <https://bit.ly/2XBpbMu>.
- Dixon, Robert K. (1995). «Sistemas agroforestales y gases invernadero». En: 2.7, 22-26. Online: <https://bit.ly/2GPFY99>.
- FAO (2010). *Challenges and opportunities for carbon sequestration in grassland systems. A technical report on grassland management and climate change mitigation. Integrated Crop Management* 9. Roma, Italia. Online: <https://bit.ly/1ElclQJ>: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007). *State of the world's forests 2007*. FAO.
- Fonseca, W. y col. (2016). *Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centro América (Informe final)*. Inf. téc. Online: <https://bit.ly/2VnJcE7>: Cooperación Internacional entre la Universidad Nacional y la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ), 1-30. Online: <https://bit.ly/2VnJcE7>.
- Fonseca, William, Federico Alice y José María Rey (2009). «Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica». En: *Bosque (Valdivia)* 30.1, 36-47. Online: <https://bit.ly/2H6zGRW>.
- Giraldo, A., M. Zapata y E. Montoya (2008). «Captura y flujo de carbono en un sistema silvopastoril de la zona Andina Colombiana». En: *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 16.4, 241-245. Online: <https://bit.ly/2Nvregc>.
- Gómez, H. y col. (2010). «Estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (lam.) y *Leucaena leucocephala* (jacq.) y su aplicación en sistemas silvopastoriles.» En: *Información Técnica Económica Agraria* 106.4, 256-270. Online: <https://bit.ly/2H7CLBg>.
- Herrán, Claudia (2012). *El cambio climático y sus consecuencias para América Latina*. Online: <https://bit.ly/1zLUkwX>: Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Houghton, Richard A. (2005). «Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emissions». En: *Tropical deforestation and climate change* 13, 13-20. Online: <https://bit.ly/2T1TeOG>.
- Hughes Flint, R., J. Kauffman Boone y Víctor J. Jaramillo (2000). «Ecosystem-scale impacts of de-

- forestation and land use in a humid tropical region of Mexico». En: *Ecological Applications* 10.2, 515-527. Online: <https://bit.ly/2H5wENV>.
- INAMHI (2014). *Anuario Meteorológico. Nro. 51-2011*. Inf. téc. Quito, Ecuador. Online: <https://bit.ly/2EjXfE1>: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología,
- IPCC (2013). *Cambio climático 2013: bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Resumen para responsables de políticas. públicas. Online: <https://bit.ly/2q1RltV>: Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.
- Ibrahim, M. y col. (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». En: *Agroforestería en las Américas* 45, 27-36. Online: <https://bit.ly/2T7wo8q>.
- Jaramillo, Víctor J. y col. «Biomass, carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes». En: 
- MINAE-IMN (2014). *Tercera comunicación nacional-Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*. Inf. téc. San José, Costa Rica. Online: <https://unfccc.int/resource/docs/natc/crinc3.pdf>: Ministerio del Ambiente y Energía-Instituto Meteorológico Nacional.
- MacDicken, Kenneth G. (1997). «A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects». En: *Forest Carbon Monitoring Program*, 87. Online: <https://bit.ly/2SuBoP9>.
- Montero, Marcelino y Markku Kanninen (2002). «Biomasa y Carbono en plantaciones de Terminalia amazonia en la zona sur de Costa Rica.» En: *Recursos Naturales y Ambiente* 39-40. Online: <https://bit.ly/2VpNATb>.
- Moret, A. Y. y P. Ruiz (1998). «Determinación de ecuaciones de volumen para Mureillo (*Erisma uncinatum*) en la Unidad C4 de la Reserva Forestal Imataca, Bolívar-Venezuela.» En: *Revista Forestal Venezolana* 42.2, 187-197. Online: <https://bit.ly/2H68G54>.
- Murphy, D. y J. Boyle (2012). *Agriculture and Climate Change: post-Durban issues for negotiators. IISD Food Security and Climate Change Initiative*. Inf. téc. Online: <https://bit.ly/2UaXHv5>: International Institute for Sustainable Development (IISD), pág. 13.
- Nair, P. K., Kumar B. Mohan y V. D. Nair (2009). «Agroforestry as a strategy for carbon sequestration». En: *Journal of plant nutrition and soil science* 172.1, 10-23. Online: <https://bit.ly/2XsTlfp>.
- Návar, J., N. González y J. Graciano (2011). «Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México.» En: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia. Online: <https://bit.ly/2Vqt98u>.
- Ortiz, Ángela, Lorena Riascos y Eduardo Somarriba (2008). «Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*)». En: *Agroforestería en las Américas* 46, 26-29. Online: <https://bit.ly/2VugBgJ>.
- Prodan, M. y col. (1997). *Mensura forestal. (CATIE: Série Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible)*. Inf. téc. Online: <https://bit.ly/2BRlwR9>: IICA-BMZ-GTZ.
- Pérez, D. y M. Kanninen (2003). «Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica». En: *Journal of Tropical Forest Science* 15.1, 199-213. Online: <https://bit.ly/2EINF3l>.
- Quero Carrillo, Adrián Raymundo, Javier Francisco Enríquez Quiroz y Leonor Miranda Jiménez (2007). «Evaluación de especies forrajeras en América tropical, avances o status quo». En: *Interciencia* 32.8, 566-571. Online: <https://bit.ly/2XundNB>.
- Ramos, José A. y col. (2014). «Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán». En: *Revista mexicana de ciencias forestales* 5.23, 92-109. Online: <https://bit.ly/2EAyWD8>.
- Rojas, Jairo, Muhammad Ibrahim y Hernán J. Andrade (2009). «Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica». En: *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 10.2, 214-223. Online: <https://bit.ly/2Svm84r>.
- Ruiz, A. (2002). *Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua*. Inf. téc. Online: <https://bit.ly/2le8mCa>: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Salas, E. C. (2002). «Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue». En: *Bosque* 23.2, 81-92. Online: <https://bit.ly/2VnEs1p>.

- Schlegel, Bastienne (2001). «Estimación de la Biomasa y Carbono en Bosques del Tipo Forestal Siempreverde». En: *Valdivia*, Online: <https://bit.ly/2Xse0FS>.
- Segura, M. y Hernán J. Andrade Castañeda (2008). «¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?» En: *Agroforestería en las Américas* 46, 89-96. Online: <https://bit.ly/2Ub1clb>.
- Segura, Milena y col. (2000). «Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica». En: *Revista Forestal Centroamericana (CATIE)* 30, 23-28. Online: <https://bit.ly/2U69Tgq>.
- Shibu, Jose (2009). «Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview». En: *Agroforestry systems* 76.1, 1-10. Online: <https://bit.ly/2GP7dB2>.
- Snowdon, P. y col. (2001). *Protocol for sampling tree and stand biomass*. Inf. téc. 31. doi 10.13140/RG.2.1.2825.8967. National Carbon Accounting System, Australian Greenhouse Office.
- Steinfeld, Henning y col. (2006). *Livestock's long shadow: environmental issues and options*. Online: <https://bit.ly/1gUpXqK>: Food & Agriculture Org.
- Torres Rivera, José Antonio y col. (2011). «Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz». En: *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13.3, 543-549. Online: <https://bit.ly/2EgDugx>.
- Umaña, J.A y A. Conde (2013). «Huella de carbono en los sistemas de producción agrícola dominantes en el municipio de Falan, Tolima.» En: *Revista Ciencia Animal* 6, 11-27. Online: <https://bit.ly/2NC07jW>.
- Villa Herrera, Adán y col. (2009). «Utilización del guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) como fuente de forraje en la ganadería bovina extensiva del trópico mexicano». En: *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10.2, 253-261. Online: <https://bit.ly/2Sysmkp>.