



Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica*

Biomass and Carbon Accumulation and Prediction in Bamboo Plantations in Costa Rica

Accumulation et prédiction de biomasse et carbone dans les plantations de bambou à Costa Rica

William Fonseca-González**, Marilyn Rojas Vargas***

Recibido: 2015-05-10 // Aprobado: 2015-06-12 // Disponible en línea: 2016-01-30

Cómo citar este artículo: Fonseca-González, W. y Rojas Vargas, M. (2016). Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. *Ambiente y Desarrollo*, 20 (38), 85-98. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.ayd20-38.apbc>

doi: 10.11144/Javeriana.up14-4.ayd20-38.apbc

Resumen

El cambio climático cada día cobra mayor importancia y nuevas especies vegetales surgen como opciones para mitigar este problema mundial. El objetivo de la investigación fue estimar la biomasa acumulada y el carbono acumulado en la biomasa vegetal y en suelo en rodales artificiales de *Dendrocalamus latiflorus*, *Guadua angustifolia* y *Guadua aculeata* y desarrollar modelos matemáticos para estimar la biomasa y el carbono. La biomasa se estimó por el método destructivo, que consiste en la cosecha del material para obtener el peso húmedo. La fracción de carbono promedio osciló de 43,3 a 47,2% entre los diferentes componentes (hojas, ramas, raíz y tronco) en un mismo culmo y de 36,4 a 46,7% en la vegetación herbácea, en la necromasa fina y gruesa. El porcentaje de carbono en el suelo fue de 2,45%. El carbono almacenado (incluido el suelo) por hectárea en plantaciones de *D. latiflorus* fue de 186,73 Mg ha⁻¹ y de 117,74 Mg ha⁻¹ en *G. angustifolia* y *G. aculeata*. Los culmos representan más del 87% del carbono de la biomasa total y más de 34% a nivel de ecosistema. Los modelos ensayados por componente del culmo y para el culmo completo no presentaron buenos ajustes y se desestimaron, mientras que los modelos agregados poseen R² superiores al 89% y bajos errores de estimación.

Palabras clave: fracción de carbono; guadua; modelos de regresión

* Este artículo es producto de la investigación *Desarrollo de índices regionales y nacionales sobre acumulación de carbono en la biomasa y cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero en ecosistemas forestales*, desarrollado en el periodo 2013-2014. Financiado y desarrollado por la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

** Doctor en Cambio Global y Desarrollo Sostenible de la Universidad de Alcalá, España. Profesor e investigador, actualmente director de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica. Correo electrónico: wfonseca@una.cr.

** Licenciada en Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica. Profesora e investigadora de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica. Correo electrónico: marilyn.rojas.vargas@una.cr.

Abstract

Climate change becomes more and more importance every day and new plant species arise as options to mitigate this global issue. The purpose of this research was to estimate the accumulated biomass and carbon in plant biomass and on the soil in artificial stands of *Dendrocalamus latiflorus*, *Guadua angustifolia* and *Guadua aculeata*, and to develop mathematical models to estimate biomass and carbon. Biomass was estimated by means of the destructive method, which consists of harvesting the material to obtain the wet weight. The average carbon fraction was between 43.3 to 47.2 % including the different components (leaves, branches, root, and trunk) of the same culm, and between 36.4 to 46.7 % in herbaceous plants, in fine and thick necromass. The percentage of carbon in the soil was 2.45%. Stored carbon (included in the soil) by hectare in the plantations of *D. latiflorus* was 186.73 Mg ha⁻¹ and 117.74 Mg ha⁻¹ in *G. angustifolia* and *G. aculeata*. The culms represent over 87% of the carbon in the total biomass and over 34% on the ecosystem level. The models used by culm component and for the whole culm did not present good settings and were dismissed, while the aggregate models have R² over 89% and low estimation errors.

Keywords: carbon fraction; bamboo; regression models

Résumé

Le changement climatique chaque jour devient plus important et les nouvelles espèces végétales surgissent comme alternatives pour amortir ce problème mondial. L'objectif de la recherche était celui d'estimer la biomasse accumulée et le carbone accumulé dans la biomasse végétale et dans le sol à l'intérieur de peuplements artificiels de *Dendrocalamus latiflorus*, *Guadua angustifolia* y *Guadua aculeata* et développer les modèles mathématiques pour estimer la biomasse et le carbone. La biomasse était estimée par la méthode destructive, qui consiste à faire la recueille du matériau pour obtenir le poids humide. La fraction de carbone moyenne fluctue de 43,3 à 47,2% entre les différents composants (feuilles, branches, racines et tronc) dans un même chaume et de 36,4 à 46,7% dans la végétation herbacées, dans la nécromasse fine et grosse. Le pourcentage de carbone dans le sol était de 2,45%. Le carbone accumulé (inclut celui du sol) par hectare dans les plantations de *D. latiflorus* était de 186,73 Mg ha⁻¹ y de 117,74 Mg ha⁻¹ en *G. angustifolia* y *G. aculeata*. Les chaumes représentent plus du 87% du carbone de la biomasse totale et plus du 34% au niveau de l'écosystème. Les modèles traités pour les parties du chaume et pour le chaume complet n'ont pas montré des bons ajustements et on les a mésestimés, alors que les modèles ajoutés ont R² supérieure au 89% et peu d'erreurs d'estimation.

Mots clés: fraction de carbone ; bambou ; modèles de régression

Introducción

El aumento de la temperatura del planeta o cambio climático global y la influencia de los bosques naturales (González *et al.*, 2008) y artificiales (IPCC, 2007) como reguladores de este han sido temas ampliamente discutidos y documentados.

La mayor atención se centra en los árboles, principalmente en los trópicos, pero recientemente están tomando auge las gramíneas leñosas, entre ellas varias especies de bambú (*Dendrocalamus latiflorus* (Munro) var. *latiflorus* (Lin), *Guadua angustifolia* (Kunth), *Guadua aculeata* (Rupr. ex E. Fourn), *Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens* (J. Houz), entre otras). En condiciones tropicales, *D. latiflorus* secuestra carbono en cantidades comparables a las plantaciones de eucalipto (Yiping *et al.*, 2010). El carbono puede ser almacenado hasta por ochenta años cuando es industrializado (Castañeda *et al.*, 2005), además es un material muy resistente al fuego (hasta 400 °C) por la cantidad de ácido sílico que contiene la corteza (Barbaro, 2007).

Las especies de bambú tienen un potencial muy alto en proyectos de adaptación al cambio climático, su sistema radical y la cantidad de hojarasca que se acumula en el sotobosque contribuyen a disminuir la erosión y mantener la humedad por más tiempo (Camargo *et al.*, 2010a), disminuyendo la erosión y reteniendo nutrientes hasta quince veces más que las coberturas compuestas por pasturas (Chará *et al.*, 2010). Tienen la capacidad de almacenar agua en los entrenudos durante la época de más precipitación y la libera en la seca (Herrera, 2008). Cuando se cortan los culmos, se observa agua hasta diez metros de altura, característica que la hace propicia para proyectos de protección y conservación del recurso hídrico, fundamentales en actividades de adaptación al cambio climático.

El bambú es una alternativa real como sustituto de la madera, de él se pueden obtener industrialmente diferentes productos como laminados, aglomerados, columnas, vigas, viguetas, cuarterones, tablas, paneles y variedad de productos como artesanías, compostaje, forraje, medicina, carbón, pulpa y energía (Barbaro, 2007; Herrera, 2008; Camargo *et al.*, 2010b). También es un importante refugio para la biodiversidad, pues se han reconocido más de cuatrocientas especies leñosas que se han identificado en los guaduales (Camargo *et al.*, 2010b).

A pesar de la importancia que tiene el bambú en la mitigación y adaptación al cambio climático, la información es escasa y se genera en otras latitudes, lo cual motivó el estudio de estas especies en Costa Rica. El objetivo del trabajo fue cuantificar la biomasa y el carbono almacenado y desarrollar modelos para predecir la biomasa y el carbono por componente y por unidad de área.

Métodos

Área de estudio. Se encuentra conformada por plantaciones de bambú establecidas hace veintinueve años en terrenos aledaños al embalse del proyecto hidroeléctrico Arenal, ubicado en la provincia de Guanacaste (Cantón de Tilarán) y Alajuela (Cantón de San Carlos). La reforestación se estableció en bloques de forma irregular, separados entre sí por distancias no uniformes, para un total de 0,29 ha con *D. latiflorus* y 35,25 ha en combinación de *G. agustifolia* y *G. aculeata*, distribuidas en quince bloques (figura 1). El sitio presenta una elevación promedio de 600 msnm, suelos de tipo Inceptisol en la mayor parte del área, con pendientes entre 0 y 5% (ITCR, 2008).

Selección de la muestra. *D. latiflorus* tiene un crecimiento paquimórfico y por ende un comportamiento de culmos agrupados, por lo cual se utilizó la cepa como unidad de muestreo. La selección de cepas se hizo de forma aleatoria (sin reemplazo), con una intensidad de muestreo del 54% (diecinueve cepas), además se determinó el área ocupada por la plantación y se contó el número de cepas en el área. Debido a la cantidad de culmos, a la disponibilidad de recursos, y para facilitar el trabajo de campo, cada cepa se dividió en cuatro cuadrantes siguiendo rumbos francos. Los culmos se clasificaron en cinco categorías de acuerdo con el estado de madurez. Los culmos con edad menor a un año se contabilizaron en el cuadrante 1 (noreste), juveniles (uno a dos años) en el cuadrante 2 (sureste),

sazonos (dos a tres años aproximadamente) y maduros (mayor a tres años) en los cuadrantes 3 (suroeste) y 4 (noroeste), respectivamente; los culmos muertos se contaron en el cuadrante 1 (figura 2). Para realizar esta clasificación en el campo se tuvieron en cuenta aspectos como el tamaño y el color del tallo. Para cada culmo se registró el diámetro normal (1,3 m sobre el nivel del suelo) y su estado de madurez.

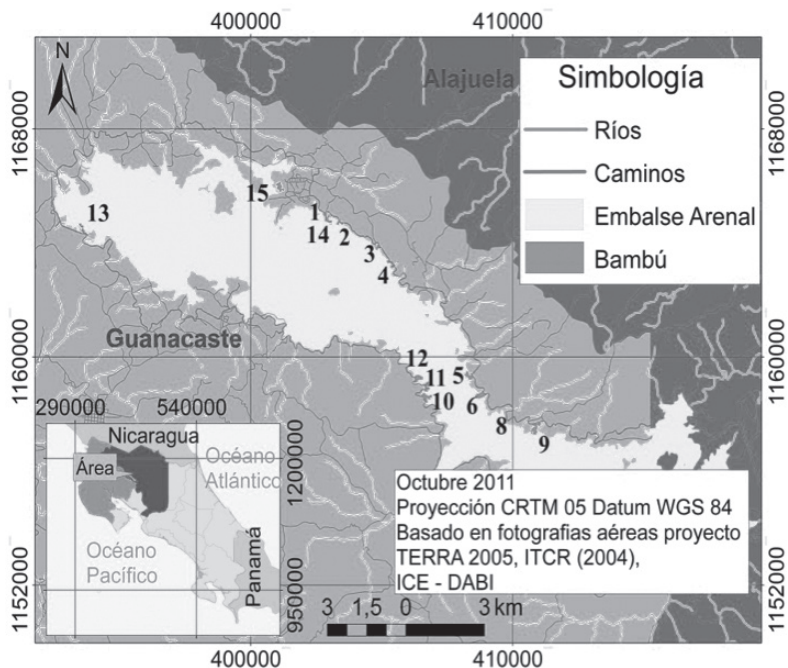


Figura 1. Ubicación geográfica de las áreas con cobertura de bambú en los terrenos aledaños al embalse Arenal, Guanacaste y Alajuela, 2011

Fuente: elaboración propia

Guadua angustifolia y *G. aculeata* también presentan un crecimiento paquimórfico, con cepas que no tienen una figura geométrica regular. Para estas especies el muestreo fue aleatorio, sin remplazo, con una intensidad de 11,5%. Se seleccionaron doce bloques y en ellos se establecieron parcelas o unidades de muestreo temporales de forma circular (100 m²). El tamaño de la muestra fue de 83 parcelas y para cada una se registró la ubicación con el sistema de posicionamiento global. En cada unidad de muestreo se midieron todos los culmos, registrando el diámetro normal y el estado de madurez según la figura 2.

Muestreo de biomasa en los culmos. La cuantificación de la biomasa se realizó por el método destructivo y para la selección de los culmos a cortar se tuvo en cuenta aspectos como facilidad de extracción y representatividad en diámetro. En total se cortaron 95 culmos de las tres especies: veinticuatro brotes (25%), veinte juveniles (21%), quince sazonos (16%), dieciséis maduros (17%) y veinte muertos (21%). A cada culmo se le midió el diámetro (excepto a los brotes, a los que se les midió el diámetro a nivel de suelo) y se obtuvo el peso húmedo (kg) de cada componente: fuste (Fu), ramas (Rm), hojas (Ho) y raíz (Ra). Para cuantificar al máximo la raíz se extrajeron culmos que estaban más aislados.

Muestreo de necromasa (fina y gruesa) y de la vegetación herbácea. Para el área plantada con *D. latiflorus* se elaboró una rejilla o malla de 10 m de lado, se obtuvo el centroide de cada parcela de muestreo potencial y sus coordenadas se introdujeron al GPS para su ubicación en el campo. El diseño de muestreo fue aleatorio, sin remplazo, con una muestra de cinco unidades. De cada punto de muestreo se midieron 2,5 m en dirección norte, sur, este y oeste para establecer las subparcelas de necromasa fina y de vegetación herbácea. La parcela para la necromasa gruesa se ubicó en el cuadrante.

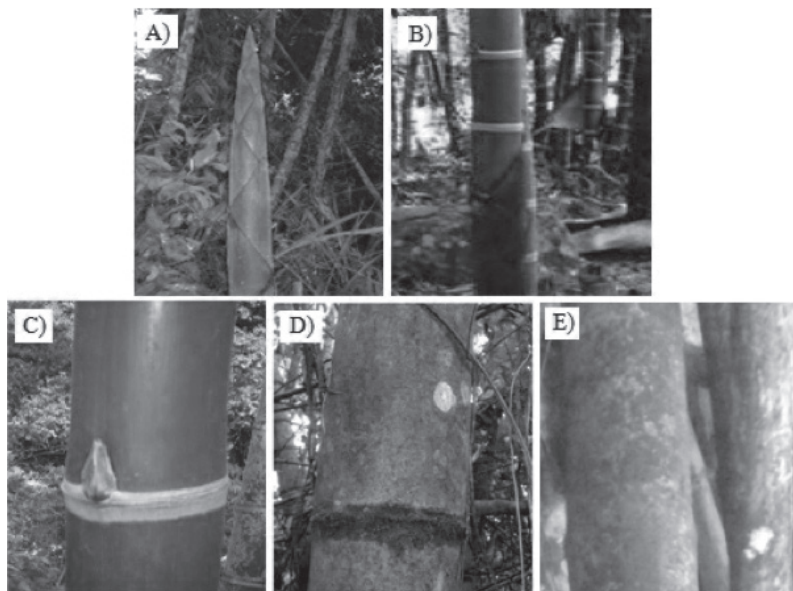


Figura 2. Clasificación de los culmos por su estado de madurez

Fuente: elaboración propia

En *G. angustifolia* y *G. aculeata* se dividió la parcela circular de 100 m² en cuatro cuadrantes y se instaló una parcela en cada uno, en tanto que para el componente necromasa gruesa se eligió un cuadrante al azar dentro de la parcela.

Cada componente de la biomasa se evaluó de la siguiente forma: 1) vegetación herbácea y arbustos (menores a 2,5 cm de diámetro a 1,3 m sobre el nivel del suelo), en cuatro subparcelas de 1 x 1 m (una en cada cuadrante), conformando una muestra de 4 m²; 2) hojarasca o mantillo (necromasa fina, material muerto con diámetro ≤ 2,5 cm), en cuatro subparcelas de 0,5 x 0,5 m (una en cada cuadrante, conformando una muestra de 1 m²); 3) necromasa gruesa (material muerto con diámetro ≥ 2,5 cm), en una subparcela de 5 x 5 m, en un cuadrante elegido al azar en cada parcela. El tamaño de la muestra para vegetación herbácea fue de 35 y de 37 parcelas para necromasa fina y necromasa gruesa.

Determinación de la biomasa seca. De cada componente de biomasa húmeda se extrajo una muestra de aproximadamente 0,6 kg que fue empacada en bolsas plásticas debidamente identificadas y se llevaron al laboratorio para determinar su peso húmedo (kg). La materia seca se calculó después de secarlas en un horno a 60 °C durante 72 horas y luego pesadas a temperatura ambiente (Fonseca *et al.*, 2009).

Existencias de carbono en el suelo. El carbono almacenado en el suelo se calculó con base en los datos de contenido porcentual de carbono en el suelo, la densidad aparente y la profundidad del suelo considerada (30 cm en este estudio). En 35 unidades de muestreo se obtuvo una submuestra aleatoria en cada cuadrante de la unidad principal y se mezcló para tener una muestra compuesta de aproximadamente un kilogramo. La densidad aparente se estimó mediante el método del cilindro (MacDicken, 1997).

Fracción de carbono en la biomasa y en el suelo. La muestra seca de cada componente de biomasa y de suelo se trituró a 10 µm para determinar la materia orgánica (MO) por el método Walkley & Black (Álvarez y Marín, 2011). El valor de materia orgánica se divide entre 1,72 para obtener la fracción de carbono.

Desarrollo de funciones alométricas. Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgraphics Centurion 15.1.02. Se ensayaron

modelos para cada especie y componente de biomasa (hojas, ramas, fuste, raíz y para biomasa total del culmo, así como para la biomasa y el carbono en biomasa en el ecosistema (biomasa del bambú, biomasa de hierbas y necromasa). Para todos los modelos, la variable dependiente fue la biomasa o el carbono y la independiente el diámetro para los componentes del culmo o para el culmo completo y el área basal para los modelos a nivel de ecosistema. El área basal es la sumatoria del área (m^2) ocupada por todos los culmos por hectárea.

En la selección de la ecuación de mejor ajuste se procedió según la metodología expuesta por Salas (2002) y por Segura y Andrade (2008). Adicionalmente, se graficaron los valores estimados contra los observados, para ver si los modelos sobreestiman o subestiman el cálculo de la biomasa y carbono. También por método gráfico se observó el comportamiento biológico de los modelos.

Resultados

Fracción de carbono y porcentaje de biomasa. La fracción de carbono promedio osciló de 43,3 a 47,2% entre los diferentes componentes en un mismo culmo y de 36,4 a 46,7% en los demás componentes de la biomasa vegetal del ecosistema. El componente con menor contenido de carbono fue la necromasa fina (36,4%), las hojas en los culmos sazones y la necromasa gruesa registraron el valor más alto. En todos los casos el error de estimación (E) fue inferior a 13%. El porcentaje de carbono en el suelo fue de 2,45% calculado con un error de 17,9% (tabla 1).

La materia seca de los diferentes componentes osciló entre 16 y 53% y la mayor variabilidad se presentó en el fuste de los renuevos ($E \pm 31,1\%$). Los culmos nuevos y juveniles tienen una fracción de materia seca en fuste y en raíz inferior a 0,3, mientras que en los adultos y sazones varía de 0,37 a 0,51 (tabla 2).

Existencias de carbono. Para *D. latiflorus* se estimó un promedio de 10793 culmos ha^{-1} ($E \pm 45,3\%$), cada cepa se encuentra compuesta por 89 culmos en promedio con 17% de culmos muertos. En las plantaciones de *G. angustifolia* y *G. aculeata* el promedio de culmos (vivos y muertos) por hectárea fue de 6473 ($E \pm 10,8\%$). Los culmos maduros se encontraron en mayor cantidad (representaron el 55,2%).

El carbono almacenado (incluido el suelo) por hectárea en plantaciones de *D. latiflorus* fue de 186,73 $Mg\ ha^{-1}$ ($E \pm 25,9\%$ solo para carbono en los culmos). Los culmos juveniles presentaron la mayor variabilidad, con un error de estimación de 23,8%. En los ejes o culmos vivos se acumuló el 59,6%, el 37,6% en el suelo y en los otros componentes (culmos muertos, necromasa y vegetación herbácea) un 2,8% (tabla 3). En *G. angustifolia* y *G. aculeata* el carbono promedio almacenado en la biomasa vegetal más el del suelo fue de 117,74 $Mg\ ha^{-1}$ ($E \pm 4,5\%$, $E \pm 20,3$ solo para los culmos). El suelo representó el 59,9% del carbono total, los culmos vivos el 32,8% y la vegetación herbácea y la necromasa el 7,3% (tabla 3).

En ambas especies, el tallo del culmo aportó la mayor cantidad de carbono, seguido por la raíz, las ramas y hojas, respectivamente (tabla 3). La biomasa de los culmos (incluyendo la raíz) por hectárea representaron más del 87% de la biomasa total y más de 34% del carbono total del ecosistema (tabla 3). El carbono en suelo representó más del 37% del carbono total, con 70,1 $Mg\ ha^{-1}$ en *D. latiflorus* y 71 $Mg\ ha^{-1}$ en *G. angustifolia-G. aculeata* en los primeros 30 cm de profundidad (tabla 3).

Modelos para estimar la biomasa y el carbono. Los modelos ensayados por componente del culmo y para el culmo completo no se muestran en este apartado porque no cumplieron los criterios establecidos en la metodología; por lo general, mostraron ajustes muy bajos (aunque significativos), las medidas de variabilidad fueron altas, igual que el error, y por lo tanto se desestimaron. En cambio, los modelos para estimar la biomasa vegetal o el carbono en la biomasa vegetal por unidad de área (tabla 4, figura 3) proporcionaron un mayor ajuste.

Tabla 1. Fracción de carbono (%) en la biomasa y en suelo en plantaciones de *D. latiflorus*, *G. angustifolia* y *G. aculeata*

Componente	Estadístico	Categoría de edad del culmo			
		Renuevo	Juvenil	Sazón	Maduro
Hojas	n			7	5
	Promedio			43,29	45,5
	SD			6,05	2,07
	E (%)			12,9	5,64
Ramas	n			7	7
	Promedio			44,35	45,3
	SD			3,12	3,75
	E (%)			6,5	7,7
Tronco	n	7	7	7	6
	Promedio	44,74	43,63	47,19	44,08
	SD	4,31	2,77	3,87	3,03
	E (%)	8,9	5,9	7,6	7,22
Raíz	n	7	5	10	12
	Promedio	43,24	44,48	43,63	43,97
	SD	3,76	1,86	4,04	4,66
	E (%)	8,4	5,2	6,6	6,7
Otros componentes					
		Vegetación herbácea	Necromasa gruesa	Necromasa fina	Suelo
	n	8	7	9	21
	Promedio	41,49	46,74	36,4	2,45
	SD	2,99	3,95	4,48	0,96
	E (%)	6,02	7,08	11,89	17,9

n= tamaño de la muestra, X= promedio, SD= desviación estándar, E (%)= error de muestreo

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Fracción de materia seca para la biomasa muestreada en *D. latiflorus*, *G. angustifolia* y *G. aculeata*

Tipo	Estadístico	Componente			
		Hojas	Ramas	Fuste	Raíz
Renuevo	n			19	4
	Promedio			0,16	0,24
	SD			0,11	0,03
	E (%)			31,1	20,6

Tipo	Estadístico	Componente			
Juvenil	n			22	6
	Promedio			0,25	0,3
	SD			0,15	0,07
	E (%)			13,5	25,1
Sazón	n	23	21	25	11
	Promedio	0,46	0,48	0,45	0,37
	SD	0,04	0,05	0,07	0,07
	E (%)	3,8	4,8	6,8	12,4
Maduro	n	24	24	28	11
	Promedio	0,48	0,53	0,51	0,38
	SD	0,05	0,07	0,07	0,07
	E (%)	4	5,6	5,4	12
Otros componentes					
	Estadístico	Vegetación herbácea	Necromasa gruesa	Necromasa fina	
	n	40	42	40	
	Promedio	0,21	0,47	0,41	
	SD	0,047	0,2	0,2	
	E (%)	7,2	14,1	15,6	

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Proporción de biomasa y carbono de los componentes del culmo en las categorías de edad presentes en plantaciones de *Dendrocalamus latiflorus*, *Guadua angustifolia* y *G. aculeata* (Mg ha⁻¹)

Categoría de edad del culmo	Componente	D. latiflorus		G. angustifolia-G. aculeata	
		Biomasa	Carbono	Biomasa	Carbono
Renuevo	Tallo	0,70	0,30	0,73	0,33
	Raíz	0,36	0,16	0,37	0,16
Juvenil	Tallo	3,90	1,70	1,12	0,49
	Raíz	1,45	0,65	0,42	0,18
Muerto	Tallo	0,20	0,10	5,40	2,52
	Raíz	0,04	0,01	1,03	0,48
Maduro	Hojas	6,90	3,10	3,93	1,79
	Ramas	7,30	3,30	4,13	1,87
	Tallo	73,90	45	42,03	18,53
	Raíz	15,60	7,05	8,95	3,87

Categoría de edad del culmo	Componente	D. latiflorus		G. angustifolia-G. aculeata	
		Biomasa	Carbono	Biomasa	Carbono
Sazón	Hojas	3,20	1,40	1,76	0,76
	Ramas	2,30	1,00	1,25	0,56
	Tallo	73,90	45	17,37	8,20
	Raíz	5,71	2,57	3,13	1,35
Hojarasca		9,90	3,60	1,78	0,65
Necromasa gruesa		2,25	1,05	9,84	4,59
Vegetación herbácea		1,52	0,63	1,01	0,42
Suelo			70,11		71,00
Total		209,09	186,73	104,25	117,74

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Modelos para estimar biomasa y carbono en plantaciones de *D. latiflorus* y *G. angustifolia - G. aculeata*. La biomasa y el carbono expresada en Mg ha⁻¹

Modelo	R ²	EEE	EMA	ECM	DA	IF	PRESS	E%	n
Bculmos = 13,8618 + 1,85367*G	79,61	23,809	19,4646	27,8	12,0	23,8	28 553,82	-9,5	36
Btotal = 29,2136 + 1,78608*G	76,10	25,376	19,9989	24,7	0,0	25,4	22 521,48	10,2	36
Cculmos = 6,30893 + 0,815235*G	79,30	10,569	8,66481	12,4	5,4	10,6	5 651,44	-9,5	36
Cbttotal = 10,7197 + 0,813445*G	81,55	9,9951	8,14566	11,1	1,3	10,0	4 521,68	4,0	34

Bculmos: biomasa de culmos, Btotal: biomasa total, Cculmos: carbono en biomasa de culmos Cbttotal: carbono en biomasa total, G = área basal (m²ha⁻¹), R²: coeficiente de determinación ajustado, EEE: error estándar de la estimación, EMA: error medio absoluto, ECM: error cuadrático medio, DA: diferencia agregada, IF: índice de Fumival, PRESS: suma de cuadrados de los residuos de los predichos, E%: error de muestreo, n: tamaño de la muestra

Fuente: elaboración propia

Discusión

Fracción de carbono y porcentaje de biomasa seca. La fracción de carbono en la biomasa estimada es precisa (E% < 0), a pesar del reducido tamaño de la muestra, y está por debajo del límite inferior recomendado (0,45-0,50) por el IPCC (2007) y de lo observado (0,5 de la biomasa) en diversos estudios (Castellanos *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2010). Además, se confirma que la concentración de carbono es distinta en los diferentes componentes de la biomasa vegetal en el ecosistema (Zhang *et al.*, 2009; Jagodzinski *et al.*, 2012), pero dentro del rango obtenido en otras investigaciones para diversos componentes de la biomasa de árboles en sitios de estudio muy cercanos (Fonseca *et al.*, 2011a, 2011b;

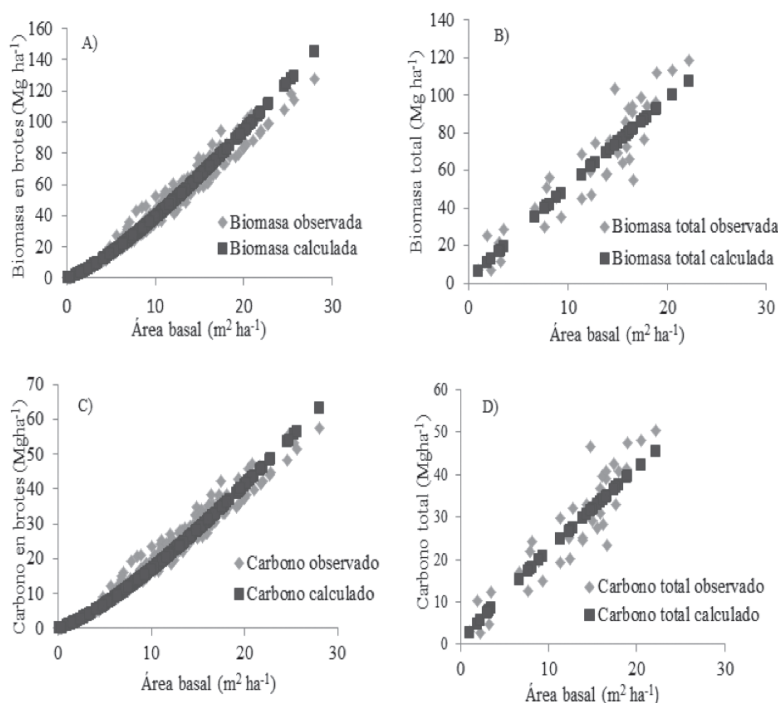


Figura 3. Estimación de biomasa y carbono a partir del área basal

A) biomasa en culmos ($B_{culmos} = 13,8618 + 1,85367 * G$; $R^2 = 79,61$); B) biomasa total ($B_{total} = 29,2136 + 1,78608 * G$; $R^2 = 76,1$); C) carbono en culmos ($C_{culmos} = 6,30893 + 0,815235 * G$; $R^2 = 79,3$); D) carbono total ($C_{total} = 10,7197 + 0,813445 * G$; $R^2 = 81,55$)

Fuente: elaboración propia

Rojas, 2012). La fracción de materia seca es muy similar a la reportada por Torezan y Silveira (2000) para culmos nuevos y juveniles (0,29) y superior a la biomasa seca para adultos (0,39). También fue muy inferior al factor de 0,5 usado en muchos trabajos para pasar de biomasa húmeda a peso seco.

Información de esta naturaleza no ha sido revelada antes, al menos en la revisión bibliográfica efectuada hasta el momento de realizar este estudio, por lo cual es relevante para mejorar la precisión en las estimaciones de carbono en relación con la recomendación del IPCC (2007) sobre la necesidad de utilizar indicadores nacionales en los cálculos de carbono.

Existencias de carbono. La biomasa en ecosistemas forestales presenta como característica una elevada variabilidad. La variabilidad observada en este estudio en relación con la cantidad de culmos, biomasa y carbono por hectárea, también se ha registrado en otras latitudes. Posiblemente, las condiciones de sitio, las actividades de manejo, y sin duda diferentes metodologías para la estimación, propician esta heterogeneidad cuando se comparan diferentes trabajos. Es característico cuando se hacen los inventarios en bambú el uso de parcelas pequeñas (< 100 m²), es posible que aumentando el tamaño de la parcela se logre mayor precisión en el muestreo, pero debe tenerse en cuenta las dificultades que presenta la especie para ser inventariada.

En diversos estudios, por lo general, a edades de entre cinco y siete años, se reporta una alta variabilidad de culmos por hectárea; por ejemplo, de 5090 a 9416 culmos ha⁻¹ según Arango y Camargo (2010), 11 827 (± 3884) de acuerdo con Camargo *et al.* (2010c), 4050 para Arango y Camargo (2010) y

10 101 tallos en el trabajo de Castañeda *et al.* (2005). Como característica, en estos trabajos no se reporta la variabilidad del muestreo, por lo cual es difícil hacer comparaciones. En las plantaciones evaluadas de *G. angustifolia* y *G. aculeata*, los culmos maduros se encuentran en mayor cantidad (representan el 55,2%), si se le suma a esta cifra los sazones se tiene el 84,2%. Esto hace pensar, más la presencia de una gran cantidad de culmos muertos, que las plantaciones están enfrentando un agudo proceso de deterioro, por la falta de aprovechamiento de los culmos maduros y el manejo de los remanentes. Esta conclusión se complementa con la observación en el campo de muchos claros en la plantación, sitios en donde se han perdido las cepas o estas se componen de muy pocos culmos.

En el presente estudio más del 80% del carbono en la biomasa vegetal se encuentra en la parte aérea; en otros trabajos se llega a los mismos resultados (Castañeda *et al.*, 2005; Yiping *et al.*, 2010; Arango y Camargo 2010; Camargo *et al.*, 2010c). El carbono almacenado en los culmos (incluyendo la raíz) por *D. latiflorus* y *G. angustifolia* - *G. aculeata* fue de 111,34 y 41,09 Mg ha⁻¹, respectivamente. Cifras muy similares o superiores a las reportadas por Yiping *et al.* (2010) en la India (entre 27 y 77 Mg ha⁻¹), Camargo *et al.* (2010c) en Colombia (20,7 Mg ha⁻¹ en biomasa aérea), o Arango y Camargo (2010) (34,3 y 24,6 ± 5 Mg ha⁻¹). Los demás componentes de la biomasa vegetal (hojarasca, necromasa y vegetación herbácea) tienen un aporte marginal inferior a 5% (tabla 3), con menos de 5 Mg ha⁻¹, algo similar a lo reportado por Camargo *et al.* (2010c) (2,9 Mg ha⁻¹ en el mantillo). El carbono almacenado en las plantaciones evaluadas demuestra una vez más el potencial de mitigación del cambio climático de estas especies y confirma que la capacidad de secuestro es comparable a la de especies leñosas usadas en reforestación para producción de madera (Yiping *et al.*, 2010). A este respecto, para especies leñosas, Fonseca *et al.* (2011a) reportan incrementos medios anuales (IMA) en carbono de 5,3 Mg ha⁻¹ en *Hieronyma alchorneoides* y de 7,1 Mg ha⁻¹ en *Vochysia guatemalensis*; 3,5 Mg ha⁻¹ para *Alnus acuminata*, según Ruiz (2011), en plantaciones de *Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.* y *Cupressus lusitánica*. Rojas (2012), por su parte, cita incrementos de 6,05, 1,8 y 3,2 Mg ha⁻¹, respectivamente, y 4,2 Mg ha⁻¹ en bosque natural secundario (Fonseca *et al.*, 2011b).

El carbono en suelo también es importante y puede ser igual o superior a la existencia en la biomasa aérea. En este estudio, el carbono en el suelo (en los primeros 30 cm de profundidad) representa más del 37% del carbono total, con 70 Mg ha⁻¹ (tabla 3). Este valor es similar al reportado en otros estudios, aunque hacer una comparación puede resultar engañoso porque se dan cifras a diferentes profundidades; por ejemplo, Arango y Camargo (2010) citan 148,2 ± 34,06 Mg ha⁻¹, hasta 25 cm de profundidad; hasta los 50 cm, Camargo *et al.* (2010c) reportan 142,8 Mg ha⁻¹ y Yiping *et al.* (2010) entre 75 y 212 Mg ha⁻¹.

Modelos para estimar la biomasa y el carbono. Los modelos para estimar biomasa y carbono permiten hacer estimaciones confiables y facilitar su proceso, máxime para el bambú, especie con mayores dificultades comparada con especies leñosas. Son escasas las investigaciones de esta naturaleza para bambú y sus resultados son similares a los obtenidos en este trabajo. En este caso, los modelos ensayados para estimar la biomasa en función del diámetro, para el componente del culmo (hojas, ramas, fuste y raíz) y para el culmo completo son desestimados porque no cumplen con los criterios establecidos en la metodología; en general, muestran un R² inferior a 0,7 y errores superiores al 10%, situación que puede deberse al comportamiento biológico de la planta. En las especies estudiadas, los culmos nuevos (rebrotos) y los juveniles no poseen ramas ni hojas (tabla 1); además, el diámetro y la biomasa de estos culmos a corta edad (menos de un año), pueden ser iguales e incluso mayores a los de sazones y maduros. Esto indica la existencia de relaciones alométricas poco definidas entre los distintos componentes del culmo (hojas-fuste-ramas-raíz), como en cambio sí ocurre en la mayoría de especies arbóreas leñosas, en donde el diámetro explica muy bien la biomasa de los distintos componentes del árbol (Fonseca *et al.*, 2009). Es posible mejorar el ajuste del modelo y explicar más la variabilidad observada en la biomasa si se utilizan otras variables predictoras como la altura. Similares resultados reportan Castañeda *et al.* (2005), quienes logran ajustes (R²) que varían entre 0,48 y 0,95 en modelos para biomasa total y por componente (tallo, ramas y hojas) y Torezan y Silveira (2000) con R² de 76% usando el diámetro y la altura.

Los modelos para estimar la biomasa vegetal y el carbono en la biomasa vegetal por unidad de área presentan mejor ajuste ($R^2 > 76\%$). Estos modelos usan el área basal como variable independiente y son de fácil aplicación porque el área basal es fácil de determinar. Además, se hace un muy buen aporte al conocimiento de estas especies porque no se han encontrado en la literatura revisada hasta el momento.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado gracias al apoyo del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Además, participaron en el trabajo de campo el máster Daniel Ortiz de la Universidad de Alcalá, España y los ingenieros forestales José Alvarado y Manuel Chavarría, a ellos nuestro agradecimiento.

Referencias

- Álvarez, E. y Marín, M. A. (2011). *Manual de procedimientos analíticos para suelos y plantas*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Arango, A. y Camargo, J. C. (2010). Bosques de guadua del Eje Cafetero de Colombia: oportunidades para su inclusión en los mercados de carbono y en el programa REDD+. *Recursos Naturales y Ambiente*, (61), 77-85.
- Barbaro, G. (2007). Transformación e industrialización del bambú. *Arquitectura del Paisaje*, (155), 8-15.
- Camargo, J., Chará, J., Giraldo, L. P., Chará, M. y Ximena, G. (2010a). Beneficios de los corredores ribereños de Guadua angustifolia en la protección de ambientes acuáticos en la Ecorregión cafetera de Colombia. I Efectos sobre las propiedades del suelo. *Recursos Naturales y Ambiente*, (61), 53-59.
- Camargo, J. C., Moreno, R. D. y Villota, N. (2010b). Sustainable management of guadua bamboo forests, Colombia. *ETFRN News*, (52), 72-77.
- Camargo, J. C., Rodríguez, J. y Arango, A. (2010c). Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, (61), 86-94.
- Castañeda, A., Vargas, J., Gómez, A., Valdez, J. y Vaquera, H. (2005). Acumulación de carbono en la biomasa aérea en una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia*, 30(1), 107-113.
- Castellanos, E-, Quilo, A., Montenegro, R. y Quemé, S. (2008). *Estimación del contenido de carbono en bosques del altiplano occidental de Guatemala*. Centro de Estudios Ambientales, Universidad del Valle de Guatemala. Recuperado el 12 de febrero 2013, de http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/cea/informes%20de%20proyectos/Informe%20fase%203_CARE_12mayo08_AQ_RM.pdf.
- Chará, J., Giraldo, L. P., Chará, M. y Ximena, G. (2010). Beneficios de los corredores ribereños de Guadua angustifolia en la protección de corredores acuáticos en la Ecorregión a Cafetera de Colombia. 2. Efectos sobre la escorrentía y captura de nutrientes. *Recursos Naturales y Ambiente*, (61), 60-66.
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey Benayas, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30 (1), 36-47.
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey Benayas, J. M. (2011a). Carbon accumulation in aboveground and belowground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43(2), 197-211.
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey Benayas, J. M. (2011b). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, (262), 1400-1408.
- González, P., Hassan, R., Lakada, P., McCallum, I., Nilson, S., Pulhin, J., van Rosenburg, B. y Scholes, B. (2008). *Forest and woodland systems*: Chapter 21 (pp. 587-614). Recuperado el 12 de febrero 2013, de <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.290.aspx.pdf>.
- Guo, Z., Fang, J., Pan, Y. y Birdsey, R. (2010). Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management*, (259), 1225-1231.
- Herrera, G. (2008). Bienes y servicios ambientales de la guadua en Colombia (*Guadua angustifolia* Kunth). Recuperado el 12 de febrero de 2013, de http://www.sigguada.gov.co/sites/default/files/archivos/bienes_y_servicios_guadau.pdf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (ipcc) (2007). *Cambio climático (2007): Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos*

- sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p. Recuperado el 12 de febrero de 2013, de http://www.quiminet.com/ar7/ar_vcdRsDFadddsahgsA-el-mecanismo-de-desarrollo-limpio-mdl.htm.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). (2008). *Atlas digital de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ingeniería Forestal.
- Jagodzinski, A. M., Jarosiewicz, G., Karolewski, P. y Oleksyn, J. (2012). Carbon concentration in the biomass of common species of understory shrubs. *Sylvan*, (156), 650-662.
- MacDicken, K. G. (1997). *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Forest Carbon Monitoring Program.
- Rojas, M. (2012). *Almacenamiento de carbono en plantaciones forestales del proyecto hidroeléctrico Cachi* (tesis licenciatura en ciencias forestales). Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- Ruiz, L. (2011). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa en *Alnus acuminata* (kunth) en Costa Rica* (tesis Licenciatura en Ciencias Forestales). Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- Salas, C. (2002). Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue. *Bosque*, 23(2), 81-92.
- Segura, M. y Andrade, H. (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*, (46), 89-96.
- Torezan, M. y Silveira, M. (2000). The biomass of bamboo (*Guadua weberbaueri*) in open forest of the southwestern amazon. *Ecotropica*, (6), 71-76.
- Yiping, L., Yanxia, L., Breckingham, K., Henley, G. y Guomo, Z. (2010). Bamboo and climate change mitigation. The International Network for Bamboo and Rattan (Inbar). Technical report n° 42. 47 p. Recuperado el 25 de abril del 2014, de www.INBAR.int.
- Zhang, Q., Chuankuan, W., Xingchang, W. y Xiankui, Q. (2009). Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *Forest Ecology and Management*, (258), 722-727.