

Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana

Carbon Storage and allometric equations for species groups and lowland forest, Ecuadorian Amazon

María Elena Cuenca¹,

Oswaldo Jadán^{2*},

Kelvin Cueva⁴,

Cristian Aguirre^{3*}

¹ Ingeniera Forestal de la Universidad Nacional de Loja.

² Docente de la Carrera de Ingeniería Forestal, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja. *Autor para correspondencia oswaldo.jadan@unl.edu.ec

³ Proyecto UN REDD FAO UNPJ/ECU/083/UNJ.

⁴ Coordinador del proyecto UN REDD FAO UNPJ/ECU/083/UNJ

Recibido 10 de Mayo 2014; Aceptado 09 octubre 2014

Resumen

En el Ecuador, para evaluar la potencialidad de los servicios ecosistémicos respecto al carbono almacenado mediante la cuantificación de la biomasa en los ecosistemas forestales, se han realizado muchos esfuerzos de investigación aplicada, que permitan mejorar los métodos de evaluación. La presente investigación se realizó en el estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía. El objetivo fue determinar la biomasa aérea y generar modelos alométricos para grupos de especies y el estrato ecosistémico. Se instalaron 12 parcelas permanentes de 60 m x 60 m (3 600 m²), donde se evaluaron los árboles con el diámetro a altura del pecho (dap) ≥ 10 cm según la propuesta metodológica de la Evaluación Nacional Forestal del Ecuador. Las variables que se usaron para la generación de los modelos fueron el diámetro a la altura de 1,3 m (dap), la altura comercial (Hc), total (Ht) y biomasa aérea total. La biomasa aérea y carbono total en el estrato fue de 124,85 Mg ha⁻¹ y de 62,43 Mg C ha⁻¹ respectivamente. El grupo 8 presentó los valores más altos en biomasa y Carbono total (54,02 Mg ha⁻¹; 27,01 Mg C ha⁻¹, respectivamente) a diferencia del grupo 3 con los más bajos (0,16 Mg ha⁻¹ y 0,08 Mg C ha⁻¹, respectivamente). Para los modelos alométricos del estrato y grupo de especies, las variables que mejor se ajustaron fueron el logaritmo natural del dap Ln dap, Ln Hc, Ln Ht y cuadrado del dap (dap²); se registró coeficientes de determinación ajustados entre 0,84 (G4) y 0,99 (G2).

Palabras clave: Amazonía ecuatoriana, biomasa, modelos alométricos, tierras bajas, factores de expansión.

Abstract

The soil-transmitted In Ecuador to assess the potential of ecosystem services in relation to carbon stored by quantifying biomass in forest ecosystems, there have been many efforts applied research to improve assessment methods. This research made in the stratum evergreen forest of lowland of Amazonía. The aim was to determine the aerial biomass and generate allometric models in order to groups of species and ecosystem stratum. Settled in 12 permanent plots of 60 m x 60 m (3 600 m²), where the trees were evaluated with diameter at breast height (dbh) ≥ 10 cm according to the methodology of the National Forest Evaluation of Ecuador. The variables used to generate the models were (dbh), total height and comercial height (Hc) and (Ht) aboveground biomass. The aboveground biomass and total carbon in the stratum was 124.85 Mg ha⁻¹ and 62.43 Mg C ha⁻¹ respectively. The group 8 had the highest values in biomass and C total (54.02 Mg ha⁻¹, 27.01 Mg C ha⁻¹, respectively) unlike group 3 with lower values (0.16 Mg ha⁻¹, 0.08 Mg C ha⁻¹). For allometric models of the stratum and species group, the variables that best adjusted were the natural logarithm of dbh, dbh Ln, Ln Hc, Ln Ht and squared dbh (dbh²); registered coefficients of determination between 0.84 (G4) and 0.99 (G2).

Key words: Ecuadorian Amazon, Biomass allometric models, Lowland, Expansion factors.

Introducción

En los bosques naturales el dióxido de carbono presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, mediante el proceso de fotosíntesis se convierte la energía de la luz solar en energía química aprovechable para su desarrollo (Fonseca *et al.*, 2009). Así, los bosques almacenan grandes cantidades de carbono en la biomasa de la vegetación y el suelo e intercambian carbono con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración (Brown, 1997; Foley *et al.*, 2003).

La biomasa es la capacidad existente en los diferentes componentes del ecosistemas para acumular o almacenar materia orgánica en diferentes periodos de tiempo (Fonseca *et al.*, 2009). Está compuesta por el peso de la materia orgánica epigea y subterránea que existe en un ecosistema forestal (Fonseca *et al.*, 2009). Según Network (2002), refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles y plantas que pueden ser convertidas en energía. La cuantificación de la biomasa en base al crecimiento de la vegetación en los ecosistemas forestales es importante para estimar el carbono almacenado y las tasa anuales de fijación; un tema relevante por sus implicaciones directas con el calentamiento global (Cifuentes Jara y Catie, 2009).

Existen dos métodos para estimar la biomasa: directos e indirectos. Primero se destacan procedimientos destructivos, que consiste en cortar la planta y determinar la biomasa por pesada de cada componente de almacenamiento (Schlegel, 2001). En los indirectos se utilizan técnicas de cubicación del árbol, donde se suman los volúmenes de madera. Para ello se toman muestras frescas y se pesan, los resultados permiten calcular los factores de conversión del volumen a peso seco, a través de gravimetría (Fonseca *et al.*, 2009).

Otra forma de estimar la biomasa es a través de ecuaciones o modelos alométricos basados en análisis de regresión lineal o no lineal. Estos utilizan variables medidas en el campo denominadas regresoras o independientes tales como: el diámetro a la altura de 1,30 m (dap), la altura comercial (Hc) y total (Ht), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera (Chave *et al.*, 2005; Jadán *et al.*, 2012). Este método no es destructivo y es extrapolable o comparable con situaciones de crecimiento en ecosistemas similares (Chave *et al.*, 2004; Malhi *et al.*, 2006). Los modelos para estimar la biomasa

han aumentado en los últimos años y posiblemente sean generados no solo para estimar el carbono en sitios boscosos sino también para árboles individuales (Muller - Landau *et al.*, 2006).

Los modelos alométricos facilitan la estimación de biomasa y carbono a pequeña y gran escala (Nogueira *et al.*, 2008). Para estimarla se usan diferentes tipos de modelos de regresión y combinación de variables (Segura *et al.*, 2008). En muchas investigaciones generalmente se expresa que el dap es la variable que mejor se correlaciona y ajusta para predecir la biomasa aérea (Popescu *et al.*, 2003; Rivera y Chaidez, 2004). Además es fácil de medir en el campo y se registra en los inventarios forestales (Brown *et al.*, 1989). También se emplea como variable la densidad de la madera, la cual permite predecir la biomasa obtenida, mediante su dureza o suavidad y las alturas total y comercial (Chave *et al.*, 2005; Picard *et al.*, 2012; Henry *et al.*, 2013). Otros autores utilizan transformaciones logarítmicas o exponenciales de estas variables (Baskerville, 1972; Jenkins *et al.*, 2003); posteriormente se emplean los factores de corrección descritos por Sprugel (1983) y Chave *et al.*, (2004).

En el Ecuador el tema de cambio climático es tratado muy concertadamente dentro de la política nacional donde la evaluación de los bosques es un tema principal, por lo que la caracterización y valoración de sus servicios ecosistémicos como el carbono almacenado es un tema relevante (MAE, 2012). Actualmente se desarrolla la Evaluación Nacional Forestal multipropósito, aplicando y desarrollando metodologías que permitan cuantificar acertada y confiablemente los bienes y servicios ecosistémicos que proveen los bosques naturales del Ecuador. Según MAE (2012), los bosques de tierras bajas son escenarios de gran importancia para la conservación y provisión de servicios ecosistémicos como almacenamiento de carbono y conservación de la biodiversidad; en estos ecosistemas existen más de 200 especies arbóreas mayores a 10 cm de dap en una hectárea de bosque y son calificados como los de mayor riqueza a nivel mundial (Pitman *et al.*, 2001; Berry *et al.*, 2002).

Dada la relevancia de los bosques como reguladores del cambio climático, así como la necesidad de modelos para estimar el carbono almacenado como servicio ecosistémico se realizó este estudio, cuyo objetivo fue: estimar la biomasa en grupos de especies y del estrato ecológico de Bosque siempre

verde de tierras bajas de la Amazonía y generar modelos alométricos para estimar la cantidad de biomasa existente en diferentes grupos de especies forestales nativas y estrato. Como aportes de este trabajo se presentan los modelos para estimar la biomasa en árboles por grupo de especies y estrato de bosque evaluado en la región amazónica del Ecuador.

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

La investigación se realizó en el Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía, en las provincias de Sucumbíos, Orellana, Pastaza y Morona Santiago. Los sitios de investigación están ubicados en altitudes que no superan los 500 m s.n.m. de altitud; las temperaturas oscilan entre los 16°C y los 26°C, con precipitaciones superiores 2000 mm. Se instalaron cuatro conglomerados formados por tres parcelas permanentes de 60 m x 60 m. En el Cuadro 1, se detalla las coordenadas de los sitios de estudio.

Cuadro 1. Coordenadas de los cuatro conglomerados instalados en Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía

Conglomerado	Ubicación	DATUM WGS84	X	Y
1	Pastaza - Cueva de los tayos	18S	857794,31	9783827,34
2	Orellana –Dayuma	18S	285588,99	9926598,71
3	Lago Agrio - Juan Montalvo	18N	323335,15	10616,76
4	Morona Santiago - Tiwintza	18S	175282,47	9665104,91

Según el tamaño y forma de las unidades de muestreo utilizadas por la Evaluación Nacional Forestal (Aguirre *et al.*, 2010) se instalaron cuatro conglomerados con tres parcelas de 60 m x 60 m, cada uno de manera sistemática, alcanzando un área de muestreo total de 4,32 ha donde se realizaron las mediciones de las variables dasométricas: dap, altura comercial (Ht) y altura total (Hc).

Determinación de los grupos de especies

Para separar los grupos de especies (G), se consideraron las siguientes clases de densidades:

- Menores a 500 kg m³
- Entre 500 a 700 kg m³
- Iguales o mayores a 700 kg m³

Morfología de especies en base a la altura comercial:

- Especies con fuste comercial menores a 3 m de altura
- Especies con fuste comercial ≥ 3 m de altura
- Especies con fuste comercial ≥ 7 m de altura

Estos rangos permitieron agrupar los individuos en árboles bifurcados y pequeños; medianos y altos. Bajo la combinación de las clases de densidades y morfología propuestas se obtuvieron nueve grupos de especies como escenarios de investigación, los cuales se presentan a continuación.

- Grupo 1 (G1): Altura comercial < 3 m y densidad < 500 kg m³
- Grupo 2 (G2): Altura comercial < 3 m y densidad ≥ 500 kg m³
- Grupo 3 (G3): Altura comercial < 3 m y densidad ≥ 700 kg m³
- Grupo 4 (G4): Altura comercial ≥ 3 m y densidad < 500 kg m³
- Grupo 5 (G5): Altura comercial ≥ 3 m y densidad ≥ 500 kg m³
- Grupo 6 (G6): Altura comercial ≥ 3 m y densidad ≥ 700 kg m³
- Grupo 7 (G7): Altura comercial ≥ 7 m y densidad < 500 kg m³
- Grupo 8 (G8): Altura comercial ≥ 7 m y densidad ≥ 500 kg m³
- Grupo 9 (G9): Altura comercial ≥ 7 m y densidad ≥ 700 kg m³

Variabes a medir

Para determinar la biomasa del fuste se midió la Hc de todos los árboles \geq a 10 cm de dap en cada una de las parcelas; se calculó el factor de forma bajo el método de Cailliez y Alder (1980). Se calculó el volumen comercial mediante las fórmulas de Smalian según Prodan (1997), la densidad específica de la madera bajo el método de King *et al.*, (2006); para ello se utilizó el barrenado de incremento, mediante la obtención de una muestra de madera del fuste a la altura de 1,10 m sobre el suelo. Con estas dos últimas variables se calculó la biomasa.

Para determinar la biomasa de la copa se abatieron 10 árboles por cada grupo. A este componente se lo dividió por sub-componentes en: ramas gruesas, finas y hojas. Se pesó cada sub-componente y tomó muestras, con las que se determinó la materia seca MS aplicando la metodología de Overman *et al.*, (1994). Se llevaron las muestras al laboratorio para secarlas a 75°C de temperatura por 48 horas, hasta peso constante. Con la biomasa del fuste y de la copa se calculó la biomasa total de los 10 árboles abatidos por grupo de especies. Se calculó el factor de expansión de biomasa FEB promedio entre los árboles abatidos para lo que se aplicó la metodología propuesta por Avendaño Reyes *et al.*, (2008) que relaciona la biomasa total del árbol y la biomasa total del fuste. El promedio entre todos los grupos fue el FE para el estrato. Esta variable sirvió para calcular la biomasa de todos los árboles de cada grupo utilizando la biomasa del fuste calculada previamente.

Biomasa y carbono para grupos de especies y estratos

Se consideró la evaluación individual de cada árbol, para luego mediante sumatoria determinar la biomasa y C aéreo por grupo de especies. Para el estrato se procedió de manera similar secuencialmente con los individuos arbóreos, por parcela y luego la determinación por estrato; los valores obtenidos son expresados en Mg C ha⁻¹ (Mega gramos de C por hectárea). Para determinar el carbono (C) aéreo total en cada individuo se multiplicó la biomasa por el factor de conversión 0,5 propuesto por el IPCC (Penman *et al.*, 2003). Para determinar las variables dasométricas que

están influyendo sobre la presencia y magnitud de la biomasa total, se calculó el área basal (m² ha⁻¹ = 0,7854 × dap²) y abundancia (N ha⁻¹ = individuos por hectárea) (Prodan, 1997). Luego conjuntamente con el volumen comercial (m³ ha⁻¹) y densidad específica (Kg m³) se calculó correlaciones lineales de Person ($p < 0,05$).

Ajuste y selección de modelos

Se realizó para los nueve grupos de especies inicialmente seleccionados. Para construir los modelos se utilizó el programa estadístico Infostat versión 2013p (Di Rienzo *et al.*, 2011). Para seleccionar la ecuación de mejor ajuste se procedió según la metodología propuesta por Fonseca *et al.*, (2009) y Segura *et al.*, (2008); se cumplió los siguientes pasos:

- Comprobación de los supuestos del análisis de regresión (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas). Los modelos que no cumplieron con algunos de estos supuestos, fueron desechados.
- Cálculo de indicadores de ajuste: coeficiente de determinación ajustado (R²). Aquellos modelos que presentaron, al menos, un coeficiente no significativo ($p < 0,05$) respecto a una variable utilizada como independiente o regresora fueron eliminados.
- Cálculo de indicadores de capacidad predictiva de los modelos: Error Cuadrático Medio Ponderado (ECMP), Criterio de Información Akaike (AIC) y Criterio de información Bayesiano (BIC).
- Se calificó cada modelo en base a la escala de calificación propuesta por Segura *et al.*, (2008). El modelo con menor puntaje en base a la sumatoria de los indicadores fue seleccionado como el mejor, en base a lo siguiente: en el caso del R² será el de mayor valor y tomará el valor 1, cuando se aproxime a este (escala de 0-1) y en los indicadores de predicción (ECMP; AIC y BIC) los que más se acercan a cero. Los valores de 2, 3, 4 etc., corresponderán al valor del indicador que se aleja de uno (R²) o del cero.

Resultados

Biomasa y carbono total aéreo por grupo de especies

La biomasa y C total (fuste y copa), registraron diferencias significativas ($p = 0,0001$) entre los grupos de especies evaluados, el G8 presentó los

mayores valores ($54,02 \pm 9,64$ Mg ha⁻¹; $27,01 \pm 4,82$ Mg C ha⁻¹, respectivamente) a diferencia del G3 que presentó los menores (Figura 1).

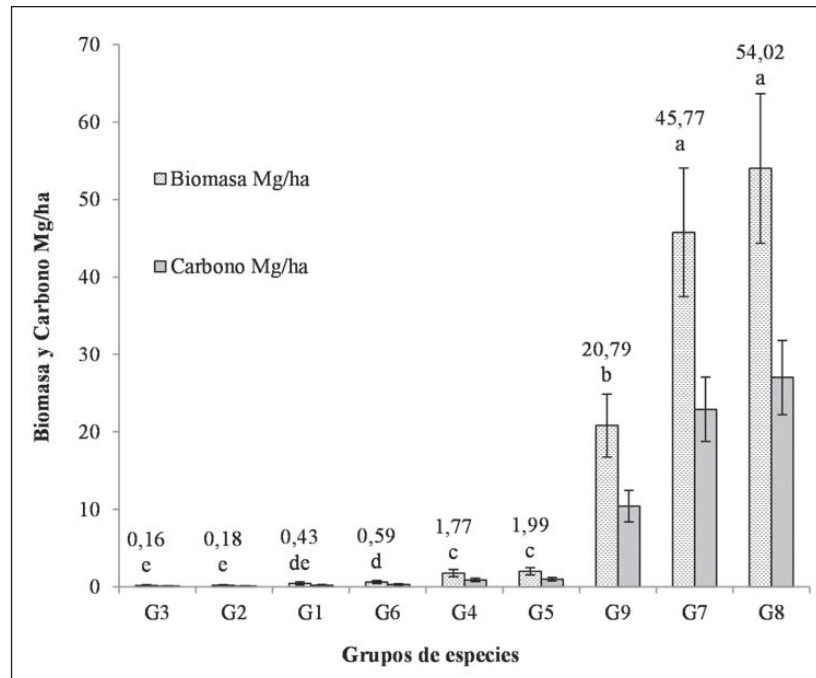


Figura 1. Biomasa y C aéreo total almacenado en los nueve grupos de especies evaluadas. Letras minúsculas desiguales indican diferencias estadísticas según la prueba de Fisher ($p < 0,05$); barras verticales indican los errores estándar

Biomasa y carbono aéreo total del estrato de bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía

La biomasa aérea total del estrato, evaluada en las 12 parcelas de 3 600 m², muestra una distribución medianamente heterogénea con un Coeficiente de Variación (CV) de 28,06 %. Se registra un

promedio de 124,85 Mg ha⁻¹ de Biomasa aérea total y un FE de 2,03. En el Cuadro 2 se muestran los valores obtenidos en la biomasa y C aéreo.

Cuadro 2. Biomasa aérea y carbono total para estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía del Ecuador

Variable	n	Promedio (Mg ha ⁻¹)	Desv. Está.	CV %	Mín	Máx	LI (95)	LS (95)	FEB*
Biomasa del fuste	12	64,24	17,17	26,72	30,10	83,60	54,53	73,95	2,03
Biomasa de copa	12	60,61	18,08	29,84	20,10	80,60	50,38	70,84	
Biomasa aérea total	12	124,85	35,03	28,06	50,10	162,90	105,03	144,67	
Carbono del fuste	12	32,13	8,60	26,75	15,00	41,80	27,27	37,00	
Carbono de copa	12	30,30	9,04	29,83	10,00	40,30	25,19	35,41	
Carbono aéreo total	12	62,43	17,50	28,03	25,10	81,40	52,53	72,34	

*FEB=Factor de Expansión de la Biomasa, obtenido como resultado del promedio entre los FEB de los grupos de especies

Relación entre variables de abundancia, densidad de la madera y variables de productividad con la biomasa y carbono total aéreo

Según el análisis de correlación de Pearson, las variables área basal ($m^2 ha^{-1}$) y volumen comercial ($m^3 ha^{-1}$) explican significativamente ($p < 0,05$) la cantidad de biomasa aérea ($Mg ha^{-1}$) en todos

los grupos a excepción del G3. Respecto a la abundancia ($N ha^{-1}$) y densidad o peso específico ($Kg m^3$) con la biomasa, registran relaciones muy bajas, no significativas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores del Coeficiente de Correlación de Pearson (r) entre la biomasa y con las variables de productividad para el estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía del Ecuador

Variable A	Variable B	G1	G2	G4	G5	G6	G7	G8	G9
Biomasa aérea total ($Mg ha^{-1}$)	Área basal ($m^2 ha^{-1}$)	0,98*	0,99*	0,86*	0,96*	0,93*	0,87*	0,87*	0,90*
Biomasa aérea total ($Mg ha^{-1}$)	Volumen Comercial ($m^3 ha^{-1}$)	0,95*	0,98*	0,91*	0,99*	0,98*	0,97*	0,99*	0,99*
Biomasa aérea total ($Mg ha^{-1}$)	Abundancia ($N ha^{-1}$)	0,000	0,000	Sd	Sd	0,000	0,000	0,000	Sd
Biomasa aérea total ($Mg ha^{-1}$)	Densidad específica ($Kg m^3$)	0,51	-0,18	0,22	-0,16	-0,003	0,16	0,08	0,07

* $p < 0,001$; G1, G2,...G9: Grupos de especies, Sd: Sin datos suficientes para correlacionarse. G3: no posee datos suficientes (dos árboles)

Modelos alométricos para la estimación de la biomasa aérea total para cada grupo de especies y estrato bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía

En el Cuadro 4 muestran los modelos seleccionados en cada grupo de especies para estimar la biomasa aérea total, que incluye la biomasa del fuste y de la copa. Todos los modelos seleccionados mostraron un R^2 ajustado superior al 84 %. Los parámetros de cada modelo fueron significativos ($p < 0,05$). Se observó que los residuos de los

modelos presentaron una distribución normal. Siete modelos fueron generados con dos variables independientes (dap y Hc o Ht) y otros dos con una sola (dap). Para los grupos siete, ocho, nueve y el estrato, la variable dependiente e independiente se transformaron a logaritmo natural (Ln) para lograr mejor ajuste y homogeneidad en las varianzas. En estos grupos se expresa la biomasa transformada a Ln en función del Ln (dap) y de Ln (Hc). Los modelos generados para los grupos uno y seis expresan la biomasa en función del dap^2 .

Cuadro 4. Modelos alométricos ajustados para los grupos de especies y estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía

Grupo	MODELO	N	R^2	R^2_{Aj}	ECMP (%)	AIC	BIC
1	$BT = -1,75 + 0,09 \times dap^2$	10	0,96	0,95	202,89	82,07	82,98
2	$BT = -63,44 + 4,75 \times dap + 27,73 \times Ln(Hc)$	12	0,99	0,99	9,79	60,38	62,32
4	$Ln(BT) = -2,29 + 2,28 \times Ln(dap) - 0,05 \times Ht$	107	0,84	0,83	0,16	105,24	115,93
5	$BT = -34,94 + 0,20 \times dap^2 + 8,86 \times Hc$	82	0,94	0,93	1988,26	824,48	834,10
6	$BT = -26,63 + 0,42 \times dap^2$	22	0,87	0,86	1416,48	211,19	214,46
7	$Ln(BT) = -3,70 + 2,13 \times Ln(dap) + 0,84 \times Ln(Hc)$	486	0,88	0,88	0,17	511,38	528,13
8	$Ln(BT) = -3,77 + 2,00 \times Ln(dap) + 1,24 \times Ln(Hc)$	470	0,96	0,95	0,06	-1,81	14,80
9	$Ln(BT) = -3,73 + 2,11 \times Ln(dap) + 1,20 \times Ln(Hc)$	123	0,97	0,97	0,05	-29,80	-18,56
Estrato	$Ln(BT) = -3,36 + 2,05 \times Ln(dap) + 0,92 \times Ln(Hc)$	1314	0,88	0,88	0,20	1594,66	1615,38

BT = Biomasa aérea total (Kg); n = número de individuos, dap = (cm); Ht = altura total (m); Hc = altura comercial (m); Ln = Logaritmo natural; R^2 = coeficiente de determinación; R^2_{Aj} = coeficiente de determinación ajustado; ECMP (%) = Error cuadrático medio ponderado; AIC = Criterio de Información Akaike; BIC = Criterio de Información Bayesiano.

Factor de expansión

En el Cuadro 5 se muestra el FEB de los nueve grupos. Poseen rangos entre 1,86 para el G7 y 2,2 en el G3; el promedio entre todos los grupos es de 2,03 cuyo valor es tomado como FEB para el estrato de bosque. Este resultado significa que de

un Mg de biomasa total 1,03 Mg corresponden a biomasa de fuste. Los coeficientes de variación son bajos con el 13,94 % para el G6 que posee un número considerable de muestras (10 árboles).

Cuadro 5. Factor de expansión promedio para los grupos de especies evaluados en el estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía

Variable	Grupos	n	Media	D.E.	CV (%)	Mín	Máx
FEB	G1	10	2,08	0,28	13,65	1,83	2,49
	G2	12	2,09	0,25	12,06	1,83	2,49
	G3	2	2,21	0,39	17,56	1,94	2,49
	G4	107	1,99	0,19	9,42	1,28	2,49
	G5	82	2,05	0,23	11,16	1,83	2,49
	G6	22	2,04	0,28	13,94	1,28	2,49
	G7	486	1,86	0,24	12,73	1,28	2,49
	G8	470	1,96	0,15	7,51	1,28	2,49
	G9	123	2,02	0,22	10,77	1,28	2,49

G1, G2,...G9 = Grupos de especies; FEB = Factor de Expansión de la Biomasa; n=número de muestras generalizado el FEB; D.E = Desviación Estándar; CV = Coeficiente de Variación.

Discusión

Biomasa aérea total de grupo de especies

El mayor valor de la biomasa aérea total (fuste y copa) para el G8 ($54,02 \pm 9,64 \text{ Mg ha}^{-1}$), se explica por el área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) y volumen comercial ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$); no depende significativamente de la densidad específica de la madera. Contradictoriamente Casanoves *et al.*, (2011) afirma que la densidad es un rasgo funcional que determina el mayor o menor contenido de C; la no relación significativa entre densidad y biomasa posiblemente se debe a la agrupación morfológica de especies, que se torna más influyente en los grupos de especies donde la altura es mayor y por ende mayor magnitud en volumen que incide significativamente en la biomasa; esto discrimina considerablemente la influencia que puede tener la densidad específica. Los resultados de biomasa obtenidos en esta investigación son diferentes a los registrados en Costa Rica, Turrialba en sistemas agroforestales con cultivo de café, en especies con densidades dentro de los rangos establecidos en el G8, como *Cordia alliodora* ($77 \pm 54 \text{ Mg ha}^{-1}$), *Terminalia Amazonia* ($66 \pm 33 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Castillo, 2003); esto se debe posiblemente a la diferencias ambientales entre los dos contextos además a la morfología diferente que presentan las especies plantadas con las existentes en un bosque natural del presente estudio.

Biomasa aérea total del estrato siempreverde de tierras bajas

Respecto a la biomasa aérea del estrato Bosque siempreverde de tierras bajas, el valor registrado en la biomasa aérea ($124,85 \text{ Mg ha}^{-1}$) es inferior a los registrados en ecosistemas tropicales por Arreaga (2002) en la Reserva de Biósfera Maya de Guatemala, donde el valor fue de $162,27 \text{ Mg ha}^{-1}$. De forma similar a los obtenidos en regiones templadas por Schlegel (2001) en el sur de Chile – Chaulin (160 Mg ha^{-1}). Sin embargo son similares a los registrados por el último autor en Buenaventura (140 Mg ha^{-1}). Otros estudios en contextos tropicales emiten resultados superiores; para bosques siempreverdes de Bolivia (268 Mg ha^{-1}) (Araujo *et al.*, 2006); en concordancia a esto en el noroccidente del Ecuador López *et al.*, (2002) reporta un valor de 223 Mg ha^{-1} . En estudios realizados en Costa Rica los valores máximos son de 207 Mg ha^{-1} según Ulate (2011) en bosques tropicales húmedos y muy húmedos. La variación en los resultados se debe posiblemente a los diferentes métodos de evaluación que se aplican para levantar la información y a las características biofísicas intrínsecas en las áreas de estudio, que son determinantes en las existencias de biomasa aérea y de C almacenado.

Modelos alométricos para grupos de especies y estrato del Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía

Para la generación de modelos alométricos, en los grupos evaluados se consideró que cada uno de ellos tuviera valores significativos respecto a las variables regresoras ($p < 0,05$) y un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) superior a 0,80. En general, los modelos seleccionados presentan buenos ajustes (R^2 ajustado superior al 84 %, con una $p < 0,05$) para todos los grupos de especies. Tienen como variables regresoras o independientes el diámetro y las alturas (total y comercial), las cuales son imprescindibles para en el levantamiento de información en un inventario forestal. Los menores ajustes en los modelos se observan para el G4, G6 y G7 lo que posiblemente se deba a la mayor variabilidad dentro de estos grupos en las variables utilizadas como regresoras (Fonseca et al., 2009).

En los grupos con mayor número de individuos (G7, G8 y G9), las regresiones mostraron coeficientes de determinación de entre 0,88 a 0,97, con ecuaciones logarítmicas y exponenciales ajustadas a cada grupo de especies. Moret y Ruiz (1998) y Schlegel (2001) coinciden en la transformación logarítmica o exponencial de algunas ecuaciones y exponenciales, de esta manera tener un coeficiente de determinación confiable. También concuerdan en seleccionar las mejores ecuaciones para estimar la biomasa al combinar dos variables independientes (dap, Hc y Ht), así como en la transformación logarítmica de la variable independiente.

En el caso del G1 y G6, se logró obtener un coeficiente de determinación R^2 ajustado de 0,96 y 0,87 respectivamente; se obtuvo una ecuación exponencial con una sola variable independiente (dap²). Esto resulta interesante, pues el dap es una variable simple de medir y se logra en la mayoría de los estudios donde se colecta información para el manejo de plantaciones o bosque natural.

En esta investigación los resultados obtenidos en los grupos G1, G2, G5, G8 y G9 son similares a los registrados por Chave et al., (2005), quienes a partir de métodos destructivos registraron coeficientes de determinación mayores a 0,90. El dap transformadas a logaritmo natural (Ln) fue la variable regresora de mejor ajuste.

Factor de expansión de Biomasa

El FEB en base a su coeficiente de variación es aceptable para ser usado en ecosistemas similares al contexto ecológico de esta investigación. Los FEB calculados en este estudio se encuentran dentro de los rangos reportados en algunas investigaciones similares. Schlegel (2001); en Chile reportó FEB de 1,98 sin considerar la raíz. Otros estudios realizados por Arreaga (2002), Montero y Montagnini (2006) los FEB oscilan entre 1,86 y 2,2 cuyos rangos son similares a los determinados en este estudio.

Conclusiones

La biomasa aérea total y C almacenado promedio para el estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía es de 124,85 Mg ha⁻¹ y 62,45 Mg C ha⁻¹. No existe correlación significativa entre la densidad y el C total en los nueve grupos evaluados. Existe una interdependencia significativa entre la biomasa aérea total con el área basal y volumen comercial en los nueve grupos de especies evaluados, a excepción del G3.

Los mayores valores de biomasa son para el G8 (Hc ≥ 7 metros y densidades ≥ 500 Kg m³). Dentro de este grupo se encontraron especies como: *Cordia alliodora*, *Terminalia amazónica*, *Calycophyllum obovatum*, *Parkia multijuga*, *Tabebuia chrysantha*, *Terminalia oblonga*, *Otoba parvifolia*, que son especies que alcanzan alturas totales ≥ 25 m.

Los modelos alométricos ajustados para predecir la biomasa aérea total para los nueve grupos y para el estrato Bosque siempre verde de tierras bajas de la Amazonía mostraron altos coeficientes de determinación (R^2 ajustados) mayores al 84 %. Las variables regresoras que mejor se ajustaron en la ecuación para la predicción de la biomasa aérea total son el dap y la Hc tanto en escala lineal como logarítmicas, respectivamente. Los modelos alométricos lineales con transformaciones a logarítmicas dieron mejor resultado en la predicción de la biomasa aérea total para los nueve grupos de especies y para el estrato de Bosque siempreverde de tierras bajas de la Amazonía.

Agradecimientos

Los autores agradecemos la colaboración y el apoyo al Ministerio del Ambiente del Ecuador, al Programa Nacional conjunto ONU REDD, a la

representación FAO Ecuador, en especial al Ing. Kelvin Cueva Director del Proyecto UN REDD FAO UNPJ/ECU/083/UNJ, a los Docentes de la Carrera de Ingeniería Forestal en especial Ing. Mg. Oswaldo Jadán por las revisiones técnicas, quienes hicieron posible que la presente investigación se llevará a cabo. Además agradecemos de forma especial a Camilo Kajekai por su gran aporte en la identificación de especies durante la fase de campo.

Literatura Citada

- Aguirre N., M Añazco., K Cueva., A Pekkarinen., C Ramírez., X Salazar y G Sánchez. 2010. Metodología para desarrollar el estudio piloto de la Evaluación Nacional Forestal en conformidad con el mecanismo REDD+. Ministerio del Ambiente del Ecuador, y FAO. Quito, Ecuador. 85 p.
- Araujo A., L Arroyo., TJ Killeen y M Saldias. 2006. Dinámica del bosque, incorporación y almacenamiento de biomasa y carbono en el Parque Nacional Noel Kempff Mercado. *Ecología en Bolivia* 41:24.
- Arreaga W. 2002. Almacenamiento del carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de Biósfera Maya, Petén, Guatemala. Carbon storage in forests with sustainable management in the Reserva de Biósfera Maya, Petén, Guatemala.
- Avendaño Reyes J., J Camargo García., J García Sierra., T Morales Pinzón., P Carrillo., J Camargo García., J Heuveldop., M Neumann., R Ramírez Santiago y M Turtiainen. 2008. Modelos genéricos de biomasa aérea para especies forestales en función de la arquitectura y la ocupación del rodal. Turrialba (IICA).
- Baskerville G. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 2(1):49-53.
- Berry PE., M Guariguata y G Kattan. 2002. Diversidad y endemismo en los bosques neotropicales de bajura. *Ecología y conservación de Bosques Neotropicales*. Libro Universitario Regional. Primera edición. Cartago, Costa Rica.
- Brown S., AJ Gillespie y AE Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest science* 35(4):881-902.
- Brown S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Actas del XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Árboles.
- Cailliez F y D Alder. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento: con referencia especial a los trópicos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. p. (1)
- Casanoves F., L Pla y JA Di Rienzo. 2011. Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos. Serie técnica, Informe técnico No 384.
- Castillo BBD. 2003. Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica.
- Cifuentes Jara M y T CATIE. 2009. ABC del cambio climático en Mesoamérica. Programa Cambio.
- Chave J., R Condit., S Aguilar., A Hernandez., S Lao y R Perez. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 359(1443):409-420.
- Chave J., C Andalo., S Brown., M Cairns., J Chambers., D Eamus., H Fölster., F Fromard., N Higuchi y T Kira. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1):87-99.
- Di Rienzo J., F Casanoves., M Balzarini., L Gonzalez., M Tablada y C Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

- Foley JA., MH Costa., C Delire., N Ramankutty y P Snyder. 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1(1):38-44.
- Fonseca W., F Alice y JM Rey. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque (Valdivia)* 30(1):36-47.
- Henry M., A Bombelli., C Trotta., A Alessandrini., L Birigazzi., G Sola., G Vieilledent., P Santenoise., F Longuetaud y R Valentini. 2013. GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest-Biogeosciences & Forestry* 6(6).
- Jadán O., B Torres y S Günter. 2012. Influencia del uso de la tierra sobre almacenamiento de carbono en sistemas productivos y bosque primario en Napo, Reserva de Biósfera Sumaco, Ecuador. *Revista Amazónica: Ciencia y Tecnología* 1(3):173-186.
- Jenkins JC., DC Chojnacky., LS Heath y RA Birdsey. 2003. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science* 49(1):12-35.
- King DA., SJ Davies., S Tan y NS NOOR. 2006. The role of wood density and stem support costs in the growth and mortality of tropical trees. *Journal of Ecology* 94(3):670-680.
- López M., Fd Koning., H Paredes y P Benítez. 2002. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el Noroccidente de Ecuador. *Investigación de Bosques tropicales. Begleitprogramm Tropenökologie (TÖB), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.*
- MAE. 2012. Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito.
- Malhi Y., D Wood., T Baker., J Wright., O Phillips., T Cochrane., P Meir., J Chave., S Almeida y L Arroyo. 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology* 12(7):1107-1138.
- Montero M y F Montagnini. 2006. Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 45:118-125.
- Moret A y P Ruiz. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para Mureillo (*Erismia uncinatum*) en la unidad C4 de la Reserva Forestal Imataca, Bolívar-Venezuela. *Rev. Forest. Venez* 42(2):187-197.
- Muller-Landau HC., RS Condit., J Chave., SC Thomas., SA Bohlman., S Bunyavejchewin., S Davies., R Foster., S Gunatilleke y N Gunatilleke. 2006. Testing metabolic ecology theory for allometric scaling of tree size, growth and mortality in tropical forests. *Ecology Letters* 9(5):575-588.
- Network BU. 2002. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central:56.
- Nogueira EM., PM Fearnside., BW Nelson., RI Barbosa y EWH Keizer. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management* 256(11):1853-1867.
- Overman JPM., HJL Witte y JG Saldarriaga. 1994. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of tropical Ecology* 10(2):207-218.
- Penman J., M Gytarsky., T Hiraishi., T Krug., D Kruger., R Pipatti., L Buendia., K Miwa., T Ngara y K Tanabe. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. p.
- Picard N., L Saint-André y M Henry. 2012.

- Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction.
- Pitman NC., JW Terborgh., MR Silman., P Núñez V., DA Neill., CE Cerón., WA Palacios y M Aulestia. 2001. Dominance and distribution of tree species in upper Amazonian terra firme forests. *Ecology* 82(8):2101-2117.
- Popescu SC., RH Wynne y RF Nelson. 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian journal of remote sensing* 29(5):564-577.
- Prodan M. 1997. *Mensura forestal*. Agroamerica. v. 1, p.
- Rivera CM y JdJN Chaidez. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10(2):29-43.
- Schlegel B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional de Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile.
- Segura M., H Andrade., D Wake., S Whitfield., K Bell., T Philippi., M Sasa., F Bolaños., G Chaves y J Savage. 2008. Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. How to develop biomass models of woody perennials species. *Agroforestería en las Américas (CATIE)*. 2008 (46):89-96.
- Sprugel D. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64(1):209-210.
- Ulate C. 2011. Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica.