

¿Cómo hacerlo?

¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?

Milena Segura¹; Hernán J. Andrade¹

RESUMEN

Los modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono (VBC) ayudan a estimar el almacenamiento de carbono en sistemas forestales y agroforestales. Este artículo presenta una guía práctica para la construcción de modelos alométricos de VBC de árboles individuales de especies leñosas perennes (árboles, arbustos y palmas). Este proceso comprende: (i) selección del sitio y de las especies; (ii) estimación del tamaño de la muestra; (iii) selección de los individuos por muestrear; (iv) corte, medición y pesaje de los individuos muestreados; (v) prueba de modelos genéricos; y (vi) selección de los mejores modelos alométricos. Este artículo presenta algunos ejemplos de modelos de biomasa desarrollados para sistemas agroforestales con cacao o café, sistemas silvopastoriles, bosques manejados y plantaciones forestales.

Palabras claves: análisis de regresión, árboles, arbustos, componentes de biomasa, gravedad específica, índice de Furnival, palmas, PRESS.

How to develop biomass models of woody perennials species

ABSTRACT

The allometric models of volume, biomass or carbon (VBC) support the estimation of carbon storage in forests and agroforestry systems. This paper presents a practical guide for the construction of allometric models of VBC for individual trees of woody perennial species (trees, shrubs and palms). The process comprises: (i) selection of site and species; (ii) estimation of sample size; (iii) cutting, measuring and weighing of sampled individuals; (iv) measurement of allometric variables for the individuals selected; (v) testing generic models; and (vi) selecting the best allometric models. This paper presents some examples of biomass models developed for agroforestry systems with cacao or coffee, silvopastoral systems, managed forests and forestry plantations.

Keywords: biomass components, Furnival index, palms, PRESS, regression analysis, shrubs, specific gravity, trees.

INTRODUCCIÓN

Las metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del Protocolo de Kyoto (1997) crearon un mercado de créditos de carbono para alcanzar los objetivos antes del año 2012 (IPCC 2003). Los GEI podrían reducirse mediante la disminución de las emisiones de CO₂ y el incremento de los sumideros terrestres. El servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales y agroforestales es un mecanismo aprobado en el Protocolo de Kyoto para la reducción de los GEI en la atmósfera (Vine et ál. 1999, IPCC 2003). Los créditos de carbono provenientes de los proyectos de uso del suelo, cambio de uso del suelo y forestería (LULUCF, por sus siglas en inglés) representan sólo el 1% del mercado global,

pero proveen beneficios financieros a la comunidad y sus costos son competitivos (Capoor y Ambrosi 2007). La agroforestería podría ser una opción financieramente viable para generar créditos de carbono (Albrecht y Kandji 2003)

En proyectos forestales y agroforestales de fijación de carbono es fundamental el desarrollo de modelos alométricos locales para estimar el carbono almacenado en los árboles, arbustos y palmas (Somarriba y Beer 1987, Andrade e Ibrahim 2003, IPCC 2003, Pérez y Kanninen 2003, Segura y Kanninen 2005, Segura et ál. 2006). En este artículo se presenta una guía práctica para desarrollar modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono (VBC) de árboles, arbustos y palmas (AAP).

¹ Investigadores del Grupo Temático Cacao, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Correos electrónicos: msegura@catie.ac.cr, handrade@catie.ac.cr.

Cuadro 1. Algunos modelos de biomasa aérea total desarrollados para Costa Rica y Nicaragua

País	Especie	Modelo	R ² ajustado	Fuente
Sistemas silvopastoriles (Costa Rica)				
	<i>Acacia mangium</i>	$B = 3,4 + 0,064 * \text{dap}^2 + 1,0 * h$	0,99	Andrade (1999)
	<i>Eucalyptus deglupta</i>	$B = 4,2 + 0,052 * \text{dap}^2 + 1,1 * h$	0,99	Andrade (1999)
	<i>Pithecellobium saman</i> , <i>Dalbergia retusa</i> y <i>Diphysa robinoides</i>	$B = 10^{-1,54 + 2,05 \log(\text{dcm}) + 1,18 \log(h)}$	0,92	Andrade (2007)
Plantación pura (Costa Rica)				
	<i>Tectona grandis</i>	$B = 10^{-0,82 + 2,38 * \log(\text{dap})}$	0,97	Pérez y Kanninen (2003)
Sistemas agroforestales				
Costa Rica				
	Frutales	$B = 10^{-1,11 + 2,64 * \log(\text{dap})}$	0,95	
	<i>Theobroma cacao</i>	$B = 10^{-1,625 + 2,63 * \log(d_{30})}$	0,98	Andrade et ál. (en preparación)
	<i>Cordia alliodora</i>	$B = 10^{-0,51 + 2,08 * \log(\text{dap})}$	0,92	
	Latizales (dap < 10 cm)	$B = 10^{-1,27 + 2,20 * \log(\text{dap})}$	0,88	
Nicaragua				
	<i>Coffea arabica</i>	$B = 10^{-1,0 + 2 * \log(d_{15}) + 0,54 * \log(h)}$	0,95	
		$B = 10^{-1,2 + 2,1 * \log(d_{15})}$	0,94	Segura et ál. (2006)
	<i>Inga punctata</i> , <i>Inga tonduzii</i> , <i>Cordia alliodora</i> , <i>Juglans olanchana</i>	$B = 10^{-1,0 + 2,3 * \log(\text{dap})}$	0,94	
Bosque (Costa Rica)				
	Siete especies	$B = e^{-7,3 + 2,1 * \ln(\text{dap})} * 1000$	0,71	Segura y Kanninen (2005)

Notas: R² ajustado = coeficiente de determinación ajustado; B = biomasa aérea total (kg árbol⁻¹); dap = diámetro a la altura de pecho (cm); h = altura total (m); log = logaritmo base 10; dcm = diámetro cuadrático medio a una altura de 30 cm; d₃₀ = diámetro del tronco a 30 cm de altura (cm); d₁₅ = diámetro del tronco a 15 cm de altura (cm); ln = logaritmo natural (base e).

¿QUÉ ES UN MODELO ALOMÉTRICO?

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar el VBC de AAP en función de unas pocas variables de fácil medición, tales como el diámetro del tronco a la altura del pecho (dap) y/o la altura total (Loetsch et ál. 1973, Caillez 1980, Husch et ál. 1982, Parresol 1999). Algunos de los modelos de biomasa desarrollados en Costa Rica y Nicaragua se detallan en el Cuadro 1.

Desarrollo de modelos alométricos de VBC

La construcción de modelos alométricos de VBC para AAP conlleva los siguientes pasos:

1. Definición del ecosistema y selección de las especies de interés

Una vez definido el ecosistema para el cual se desarrollarán los modelos alométricos (sistemas agroforestales, plantaciones o bosques), se definen las especies de interés. Algunos autores han definido las especies, en caso de ecosistemas mixtos, de acuerdo con su dominancia (Suárez et ál. 2004, Segura y Kanninen 2005, Segura et ál. 2006).

2. Determinación del tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra estará dado por la variabilidad de VBC (o del dap) de la población y sitios seleccionados, así como de las condiciones del sitio.

a. Selección de sitios (estratificación). En el caso de sitios con diferentes condiciones topográficas, edáficas, climáticas, de zonas de vida, edad, manejo y especies, se estratifica agrupando los sitios con condiciones similares y muestreando dentro de cada grupo.

b. Variación del dap o de VBC por individuo. Se recomienda muestrear al menos 30 árboles distribuidos en todo el rango de dap, divididos en clases diamétricas, y equitativamente entre clases.

3. Selección de individuos por muestrear

Los individuos seleccionados para cortar, medir y pesar deben ser “típicos” de la especie y del sitio. El término “típico” se refiere a que los individuos deben tener la forma, sanidad del fuste y volumen de copa de la población muestreada.

4. Medición, corte y estimación de VBC por árbol

a. Medición de variables dasométricas de los individuos en pie. Una vez seleccionados los árboles por cortar, se debe medir con la mayor precisión posible el dap o a otra altura de referencia (por ejemplo 15 ó 30 cm) la altura total (h_t), la altura comercial (h_c) y el diámetro de copa (m) de cada árbol. Estas variables se utilizan para construir ecuaciones de regresión que estiman el VBC por árbol. En el análisis de regresión $y = f(x)$, y se llama variable dependiente (VBC) y a x se llama variable independiente (dap, h) (Steel y Torrie 1988).

El dap se mide con cinta diamétrica, forcípula o cinta métrica; en este último caso, se transforman los valores de circunferencia a diámetro dividiendo entre la constante $\pi = 3,1416$. Las alturas se pueden medir con vara telescópica (árboles con $h \leq 15$ m) ó con clinómetro y cinta métrica. El diámetro de copa se mide con cinta métrica, promediando dos mediciones perpendiculares de la proyección vertical de las copas sobre el suelo. El área de copa es estimada como el área de un círculo cuyo diámetro (D) es el diámetro promedio de copa. El área del círculo (A_c) se calcula mediante la fórmula $A_c = \pi * D^2 = 0,7854 * D^2$.

b. Corte de los individuos seleccionados. Los individuos seleccionados deben ser cortados y luego, sobre el suelo, se miden la altura total y comercial. Se recomienda cortar los árboles que se puedan medir y pesar inmediatamente, ya que el proceso de senescencia y descomposición es acelerado y afecta el cálculo de VBC.



Figura 1. Corte de árboles y separación por componentes de biomasa en Talamanca, Costa Rica (foto: Simiane Gregoire-Valentini).



Figura 2. Peso fresco de ramas pequeñas en bosques manejados de Nueva Quesada, Nicaragua (foto: Outi Myatt-Hirvonen).

c. Peso y medición de los componentes y toma de muestras para análisis en laboratorio. Se definen las secciones (o componentes) en que se dividirá y cuantificará el VBC de los individuos seleccionados. Se recomienda separar el árbol en fuste y ramas grandes (diámetro > 25 cm, o según la capacidad de la balanza); ramas pequeñas (diámetro ≤ 25 cm); y hojas, flores y frutos (si se presentaran; Figura 1).

Normalmente, la biomasa por componentes se pesa en fresco (peso húmedo) (Figura 2) y se toma una muestra de unos 200 g para secar en horno y estimar su contenido de materia seca (60 °C durante 48-72 h). La biomasa se expresa en peso seco (Ecuación 1).

$$B = \frac{P_f \times M_s}{100} \quad [1]$$

donde:

$$\begin{aligned} B &= \text{biomasa (kg)} \\ P_f &= \text{peso fresco (kg)} \\ M_s &= \text{materia seca (\%)} \end{aligned}$$

La biomasa del fuste y de las ramas grandes se puede estimar también mediante cubicación, aunque esta es menos precisa que el pesaje directo de la biomasa. En la cubicación, se estima el volumen de la madera dividiendo el fuste y las ramas en trozas a las que se mide el diámetro en ambos extremos cada cierta longitud (ej. 1, 2 ó 2,5 m). Con estas mediciones se calcula el volumen de cada troza de acuerdo a la fórmula de Smalian y/o Huber (Ecuaciones 2 y 3; Loestch et ál. 1973). El volumen total del fuste y de las ramas grandes se obtiene

sumando los volúmenes de las trozas medidas en cada componente.

$$V = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times \left(\frac{D_1^2 + D_2^2}{2}\right) \times L \quad [2]$$

$$V = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times D_{centro}^2 \times L \quad [3]$$

donde:

- V = volumen de la troza o sección (m³)
- D_1^2 y D_2^2 = diámetros al cuadrado de los extremos de la troza (cm)
- D_{centro}^2 = diámetro al cuadrado en el centro de la troza (cm)
- L = longitud de la troza o sección (m)

El volumen de madera se multiplica por la gravedad específica de la madera para estimar la biomasa (Ecuación 4). La gravedad específica es el peso de un bloque de madera secado al horno dividido entre el peso de un volumen igual de agua (Panshin y Zeeuw 1970). Se toma una muestra de madera por componente (fuste y ramas grandes) para estimar la gravedad específica utilizando el método de *bouyancy* o inmersión en agua destilada (ASTM 1983). También se puede tomar un bloque de madera de 5 × 5 × 15 cm (ASTM 1984) y secar en horno a 60 °C hasta peso seco constante.

$$B = V \times g_e \quad [4]$$

donde:

B = biomasa (t)

V = volumen (m³)

g_e = gravedad específica (t m⁻³)

d. Organización de los datos y correlación entre variables. Se debe organizar la información en un cuadro, con una fila por individuo, detallando en las columnas las mediciones de todas las variables independientes (dap, h_r , h_c , área de copa) y dependientes (VBC o por componente). Luego, se grafica el VBC contra cada variable independiente para ver las tendencias de los datos y definir cuáles modelos de regresión utilizar, ya sean modelos lineales o no (Walpole y Myers 1992).

5. Selección de los mejores modelos alométricos

a. Definición de las variables y prueba de supuestos estadísticos. Los datos que se utilizarán en el análisis de regresión deben cumplir los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas. En caso de no cumplirse algunos de ellos, entonces se transforman las variables usando logaritmos (naturales y en base 10), potencias y raíces. Walpole y Myers (1992) indican que una gráfica de valores observados en función de la variable independiente (x) puede indicar la necesidad de transformar los datos. Cuando no sea posible linealizar mediante transformaciones, se usarán modelos de regresión no lineal.

Las variables independientes se seleccionan con base en los más altos coeficientes de correlación de Pearson (r) con VBC (Steel y Torrie 1988). Los valores de 1 y -1 indican una perfecta correlación lineal o una perfecta relación funcional entre las dos variables, positiva y negativa, respectivamente. Se espera una alta correlación entre el dap y VBC de fustes y ramas; no así entre el dap y la biomasa de hojas o ramas pequeñas.

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas genéricas más empleadas para la estimación de volumen, biomasa o carbono (VBC) de árboles, arbustos y palmas

Nombre	Ecuación
Berkhout	$VBC = a + b * dap$
Kopezky	$VBC = a + b * dap^2$
Hohenadl - Krenn	$VBC = a + b * dap + c * dap^2$
Husch	$\ln VBC = a + b * \ln dap$
Spurr	$VBC = a + b * dap^2 * h$
Stoate	$VBC = a + b * dap^2 + c * dap^2 * h + d * h$
Meyer	$VBC = a + b * dap^2 + c * dap * h + d * dap^2 * h$
Schumacher-Hall	$\ln VBC = a + b * \ln dap + c * \ln * h$

Fuente: Loetsch et ál. (1973).

Notas: VBC = volumen (m³ árbol⁻¹), biomasa (kg árbol⁻¹) o carbono (kg árbol⁻¹); dap = diámetro a la altura de pecho (o a otra altura de referencia; cm); h = altura total o comercial (m); a, b, c, d = parámetros del modelo; ln= logaritmo base e.

b. Estimación de parámetros de modelos genéricos La literatura (Loetsch et ál. 1973) recomienda varios modelos alométricos genéricos (Cuadro 2).

c. Selección del modelo de mejor ajuste a los datos Se deben considerar los siguientes criterios:

- Alto coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajust.): el coeficiente de determinación (R^2) indica la proporción de la variación total observada en la variable dependiente explicada por el modelo. El R^2 -ajust. es una variante del R^2 que no necesariamente aumenta al incluir una variable independiente adicional en el modelo, debido a que penaliza la inclusión de nuevas variables independientes. Si la variable independiente ingresada es significativa, el R^2 -ajust. será cercano al R^2 ; en caso contrario, el R^2 -ajust. disminuirá respecto al R^2 . Cuanto más cercanos a 1 sean R^2 o R^2 -ajust, el ajuste del modelo será mayor.
- Error estándar de la estimación o raíz del cuadrado medio del error (RCME): se calcula empleando la Ecuación 5 y se busca el menor valor posible. Cuanto menor sea el RCME, el ajuste del modelo será mayor.

$$RCME = \sqrt{SCR / (n - p)} \quad [5]$$

donde:

SCR = suma del cuadrado de los residuos
 n = número de observaciones
 p = número de parámetros del modelo lineal (incluyendo el término β_0 , el intercepto)

Los dos estadígrafos anteriores no permiten la comparación entre modelos con variables transformadas y sin transformar, ni permiten comparar visualmente los valores estimados y observados en la medición de los árboles. Por esta razón, es necesario calcular otros indicadores, tales como:

- el índice de Furnival (IF), que permite comparar modelos lineales con aquellos donde la variable dependiente es transformada. Se calcula empleando la Ecuación 6 (Furnival 1961). El IF en modelos sin transformar es igual al error

Cuadro 3. Recíprocos de la primera derivada de las variables dependientes transformadas para el cálculo del índice de Furnival

Variable dependiente transformada	$(B')^{-1}$
$\log(B)$	$2,3026 * B$
$\ln(B)$	B
B^k	$1/(kB^{k-1})$
$1/B$	$-B^2$
\sqrt{B}	$2B^{1/2}$

Fuente: Adaptada y complementada de Alder (1980).

estándar de la estimación (raíz del cuadrado medio del error – RCME). Cuanto más pequeño es el IF mejor es el ajuste del modelo.

$$IF = RCME \times \text{anti log} \left(\frac{\sum (\log((B')^{-1}))}{n} \right) \quad [6]$$

donde:

IF = índice de Furnival
 $RCME$ = raíz cuadrada del cuadrado medio del error
 $(B')^{-1}$ = recíproco de la primera derivada de la variable dependiente (transformada)

El Cuadro 3 lista los recíprocos de la derivada de algunas de las transformaciones más comúnmente utilizadas en el ajuste de modelos alométricos de VBC. El Cuadro 4 presenta un ejemplo detallado de cómo calcular el índice de Furnival de algunos modelos de biomasa con la variable dependiente transformada.

- El estadígrafo $PRESS$, la suma de cuadrados de los residuos de los predichos, se calcula con la siguiente fórmula (Clutter et ál. 1983):

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{ip}^*)^2 \quad [7]$$

donde:

$PRESS$ = suma de cuadrados de los residuos de los predichos
 Y_i = valor observado
 \hat{Y}_{ip}^* = valor predicho

Debido a que existen cuatro ó cinco indicadores para la selección de los modelos, se sugiere calificar cada modelo de acuerdo a cada indicador (uno al mejor modelo,

Cuadro 4. Ejemplo del cálculo del índice de Furnival usando datos ficticios

Dap (cm)	Biomasa total (kg)	Altura total (m)	Log(B') ⁻¹			
			Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
12,9	62,4	18,5	0,0	1,8	2,2	1,2
13,8	128,3	17,3	0,0	2,1	2,5	1,4
18,5	118,0	16,0	0,0	2,1	2,4	1,3
21,8	568,2	28,9	0,0	2,8	3,1	1,7
24,8	218,8	20,1	0,0	2,3	2,7	1,5
29,5	349,0	26,2	0,0	2,5	2,9	1,6
31,6	420,3	27,2	0,0	2,6	3,0	1,6
35,1	548,3	25,7	0,0	2,7	3,1	1,7
34,9	495,4	21,3	0,0	2,7	3,1	1,6
48,0	1245,3	37,4	0,0	3,1	3,5	1,8
45,4	1139,6	24,4	0,0	3,1	3,4	1,8
46,9	1804,6	36,5	0,0	3,3	3,6	1,9
47,7	998,4	25,5	0,0	3,0	3,4	1,8
50,3	1616,0	40,1	0,0	3,2	3,6	1,9
52,3	1691,6	32,5	0,0	3,2	3,6	1,9
56,5	1500,0	34,1	0,0	3,2	3,5	1,9
59,9	2706,5	41,6	0,0	3,4	3,8	2,0
64,5	2307,6	36,9	0,0	3,4	3,7	2,0
68,1	2003,1	35,3	0,0	3,3	3,7	2,0
75,2	3329,2	37,8	0,0	3,5	3,9	2,1
$\sum \log((B')^{-1})$			0,0	57,3	64,6	34,7
RCME			300,4	0,3	0,1	4,2
$\left(\frac{\sum (\log((B')^{-1}))}{n} \right)$			0,0	2,9	3,2	1,7
$anti \log \left(\frac{\sum (\log((B')^{-1}))}{n} \right)$			1,0	733,7	1689,3	54,2
$IF = RCME \times anti \log \left(\frac{\sum (\log((B')^{-1}))}{n} \right)$			300,4	242,1	236,5	224,8

Notas: Modelos = 1: $B = a + b * dap^2$; 2: $\ln(B) = a + b * dap + c * h$; 3: $\log(B) = a + b * \ln(dap)$; 4: $\sqrt{(B)} = a + b * dap$. RCME: raíz del cuadrado medio del error; IF: índice de Furnival.

Cuadro 5. Ejemplo del método para seleccionar el modelo de biomasa considerando cuatro estadígrafos (datos ficticios)

Modelo	CME		R ² ajustado		PRESS		IF		Calificación total
	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	
$\log(B) = -1,71 + 2,02*\log(d_{30}) + 1,16*\log(h)$	0,02	1	0,98	1	0,97	1	1,54	3	6
$\log(B) = -1,70 + 2,73*\log(d_{30})$	0,03	2	0,97	4	1,24	2	1,79	5	13
$\ln(B) = -3,67 + 1,54*\ln(d_{30}) + 1,06*\ln(h) + 0,40*\ln(a_c)$	0,10	7	0,98	3	5,76	8	1,51	1	19
$\ln(B) = -3,94 + 2,02*\ln(d_{30}) + 1,16*\ln(h)$	0,10	8	0,98	2	5,13	7	1,54	2	19
$\log(B) = -1,51 + 0,87*\log(d_{30} * a_c) + 1,09*\log(h)$	0,03	3	0,97	6	1,34	4	1,81	6	19
$\ln(B) = -3,91 + 2,73*\ln(d_{30})$	0,14	9	0,97	5	6,58	9	1,79	4	27
$\log(B) = -1,31 + 0,31*d_{30} - 0,01*d_{30}^2$	0,04	5	0,96	9	1,84	5	2,10	9	28

Notas: B = biomasa aérea total (kg árbol⁻¹); d₃₀: diámetro a 30 cm de altura (cm); h = altura total (m); a_c = área de copa (m²); CME = cuadrado medio del error; R² ajustado = coeficiente de determinación ajustado; PRESS = suma de los cuadrados de los residuos; IF = índice de Furnival.

el dos al segundo mejor y así sucesivamente). Luego, se suman las calificaciones de los cuatro indicadores evaluados para cada modelo. El modelo con menor suma es probablemente la mejor selección (Cuadro 5).

d. Comparación de observaciones reales contra las estimaciones de los mejores modelos. Una vez seleccionados los modelos de mejor ajuste, se grafican los valores estimados (x) para cada modelo contra los observados en los árboles muestreados (y). La nube de puntos debería alinearse a lo largo de la recta y = x. La distancia vertical entre los puntos y la línea (errores en la predicción) señalan la variabilidad, la ubicación de los puntos respecto a la línea (por arriba, encima, por debajo) indican el sesgo del modelo (sobrestima, sin sesgo y subestima, respectivamente; Figura 3). En el ejemplo de la Figura 3, los modelos de mejor ajuste son el **c** y **d**, ya que los puntos caen muy cerca de la línea, mientras que los modelos a y b muestran sesgos sistemáticos en la distribución de los residuos, ya que siempre subestiman la biomasa de los árboles.

e. Practicidad en el uso y lógica biológica de los modelos. Es oportuno hacer un balance entre la rigurosidad estadística y la practicidad en el uso de los modelos alométricos de VBC. Se recomiendan los modelos que incluyen un máximo de dos variables independientes de fácil y precisa medición, tales como el dap y la altura total. Se debe analizar el comportamiento de los modelos seleccionados en los extremos y fuera del rango de los datos con los cuales se construyeron. Si la curva de un modelo cambia drásticamente al usarlo fuera del rango mencionado, éstos deben ser reevaluados o descartados.

Una forma de hacer este análisis es observando la lógica biológica del modelo, es decir, comparando los valores estimados por cada modelo con los valores que el investigador esperaría para esos AAP. Este caso se puede ver en la Figura 4, donde el modelo desarrollado funciona bien en el rango de 60 a 100 cm de dap (Figura 4a); sin embargo, al estimar la biomasa de árboles con un dap

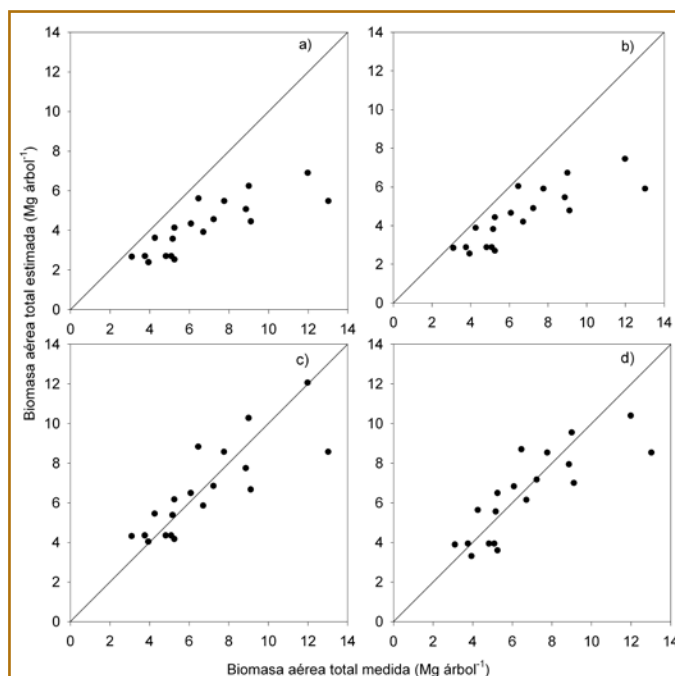


Figura 3. Comparación de la precisión de algunos modelos de biomasa aérea total. a) $B = 13,2 - 4,9*dap + 0,7*dap^2$ (Brown et ál. 1989); b) $B = 21,3 - 6,9*dap + 0,7*dap^2$ (Brown e Iverson 1992); c) $\ln(B) = 0,76 + 1,5x10^{-4} *dap^2$ y d) $\ln(B) = -7,27 + 2,07*\ln(dap)$ (Segura y Kanninen 2005).

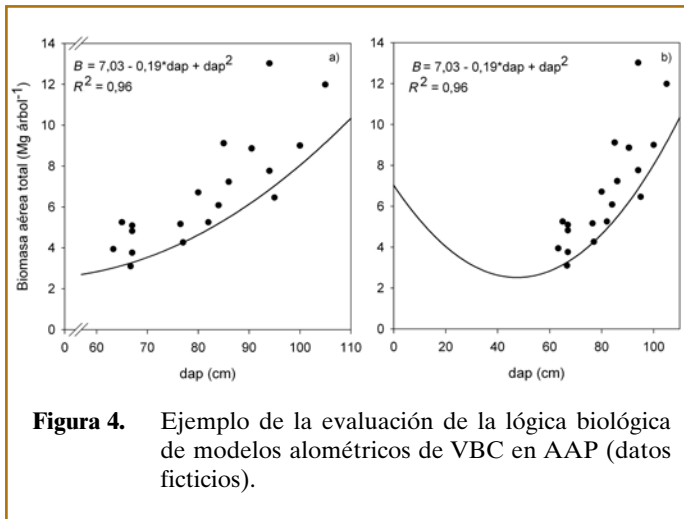


Figura 4. Ejemplo de la evaluación de la lógica biológica de modelos alométricos de VBC en AAP (datos ficticios).

menor a 60 cm se obtienen estimados ilógicos (Figura 4b). Por ejemplo, un árbol de 10 cm de dap tendría una biomasa estimada de cerca de 5,4 t, la cual es similar a la obtenida para un árbol de 85 cm de dap. Siempre es oportuno recalcar la importancia de usar los modelos en el rango de tamaño de AAP con los que se construyó el modelo.

COMENTARIOS FINALES

- El desarrollo de modelos de biomasa locales es una herramienta valiosa para proyectos de mitigación de gases efecto invernadero y para investigadores de especies leñosas perennes.
- Esta guía muestra los pasos detallados para la construcción de modelos alométricos de árboles individuales. Se presentan ejemplos de aplicaciones reales y explicaciones sencillas del cálculo de estadísticos para la selección de los modelos de mejor ajuste.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud al Proyecto Cambio de Uso de la Tierra y Flujos de Carbono en América Central (LUCCAM) de la Academia de Finlandia (Becas Número 67843 y 201566), y al Dr. Fernando Casanoves por la revisión de la parte estadística de este manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma, IT, Estudio FAO: Montes 22. v. 2, 80 p.

Albrecht, A; Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99(1-3): 15-27.

Andrade, H. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.

Andrade, HJ. 2007. Growth and inter-specific interactions in young silvo-pastoral systems with native timber trees in the dry tropics of Costa Rica. Tesis PhD. Turrialba, Costa Rica. CATIE-University of Wales. 224 p.

Andrade, H; Segura, M; Somarriba, E; Villalobos, M. En preparación. Biomass equations to estimate aboveground biomass of woody components in indigenous agroforestry systems with cacao.

ASTM. 1983. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. Edition D 2395-83. Philadelphia, US, ASTM. p. 353-360.

ASTM. 1984. Standard methods of testing small clear specimens of timber. Edition D 143-83. Philadelphia, US, ASTM. 35-76 p.

Brown, S; Gillespie, AJR; Lugo, AE. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4):381-902.

Brown, S; Iverson, LR. 1992. Biomass estimates for tropical forests. *World Resources Review* 4(3):366-383.

Cailleux, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma, IT, FAO. v. 1, 33 p.

Cappor, K; Ambrosi, P. 2007. State and trends of the carbon market 2007. Washington, DC, US, The World Bank. 45 p.

Clutter, JL; Fortson, JC; Pienaar, LV; Brister, GH; Bailey RL. 1983. Timber management: A quantitative approach. New York, US, Wiley. 333 p.

Furnival, GM. 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science* 7(4):337-341.

Husch, B; Miller, CI; Beers, TW. 1982. Forest mensuration. New York, US, John Wiley and Sons. 402 p.

IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry (en línea). Disponible en <http://www.ipcc-nggip-iges.or.jp>

Loetsch, F; Zohrer, F; Haller, KE. 1973. Forest inventory. Munich, DE, BLV Verlagsgesellschaft. 469 p.

MacDicken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, US, Winrock International. 87 p.

Panshin, AJ; De Zeeuw, C. 1970. Textbook of wood technology. Structure, Identification, Defects, and uses of the commercial woods of the United States. New York, US, McGraw-Hill. v. 1. 705 p.

Parresol BR. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45(4): 573-593.

Pérez, LD; Kanninen, M. 2003. Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 15(1):199-213.

Segura, M; Kanninen, M; Suárez, D. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems* 68:143-150

Segura, M; Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1):2-8.

Somarriba, EJ; Beer, JW. 1987. Dimensions, volumes and growth of *Cordia alliodora* in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 18:113-126.

Steel, RGD; Torrie, JH. 1988. Bioestadística: principios y procedimientos. México, McGraw-Hill. 613 p.

Suárez, D; Segura, M; Kanninen, M. 2004. Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos. *Agroforestería en las Américas* 41-42: 112-119.

Vine, E; Sathaye, J; Makundi, W. 1999. Guidelines for monitoring, evaluation, reporting, verification and certification of forestry projects for climate change mitigation. Estados Unidos, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 125 p.

Walpole, R; Myers, R. 1992. Probabilidad y estadística. 4 ed. México, McGraw-Hill. 797 p.