

Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica

Marcelino Montero M.

Investigador Forestal, Consultor, Dinámica de Plantaciones
Universidad de Helsinki, Finlandia / CATIE
mmontero@catie.ac.cr

Florencia Montagnini

Yale University, School of Forestry and Environmental Studies
florencia.montagnini@yale.edu

Los modelos alométricos ajustados para predecir la biomasa aérea seca de cada componente del árbol para las diez especies nativas de las plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica, mostraron altos coeficientes de determinación, mayores de $r^2 > 0.95$, utilizando en la mayoría de los casos el diámetro a la altura del pecho (dap) como variable predictora de la biomasa.



Fotos: Andrés Sanchún H.

Resumen

Es importante investigar la producción de biomasa y carbono de plantaciones, especialmente de las especies que producen madera de buena calidad, lo cual resulta en un almacenamiento del carbono fijado a más largo plazo.

En Costa Rica desde hace unos quince años los agricultores están plantando especies forestales nativas, las cuales pueden contribuir a la toma de carbono atmosférico. Por este motivo es necesario determinar modelos matemáticos que permitan el cálculo de la biomasa de las especies sin que sea necesario el raleo para su determinación directa.

En el presente trabajo se estimaron modelos alométricos para diez especies nativas en plantaciones experimentales en la Estación Biológica La Selva, en la vertiente Atlántica de Costa Rica, utilizando datos de altura total, diámetro a la altura del pecho (dap), y biomasa seca proveniente de un raleo realizado en las plantaciones a los 8 años de edad.

El dap fue la variable más correlacionada con la biomasa aérea seca. En promedio para las diez especies, el fuste mostró una correlación de $r = 0,97$, las ramas un $r = 0,75$, hojas $r = 0,87$ y la biomasa seca aérea total presentó un $r = 0,97$. Es una ventaja que los modelos consideren sólo la variable dap, ya que los inventarios de plantaciones o bosques naturales siempre consideran esta variable por su facilidad de medición en el campo. Los modelos alométricos desarrollados para cada especie pueden ser utilizados en condiciones similares a las del presente estudio para estimar la biomasa de cada especie de manera confiable, ya que estadísticamente todos los modelos mostraron valores altos en los coeficientes de determinación.

Palabras claves: Producción de biomasa; almacenamiento de carbono; captura de carbono atmosférico; árboles forestales; especies nativas; modelos matemáticos; Estación Biológica La Selva, Costa Rica.

Summary

Allometric equations for estimation of biomass for ten native tree species growing in plantations in the Atlantic region of Costa Rica.

Research on biomass production and carbon sequestration in plantation forestry is becoming increasingly important, especially for those species that yield good quality timber, since in this case the carbon is sequestered and stored in the long term. In Costa Rica, over the last fifteen years farmers have been planting native tree species that can contribute to carbon sequestration and storage. There is a need to develop mathematical models that allow calculation of biomass production by tree species without the need of destructive sampling. In the present article we estimated allometric models for ten native tree species growing in experimental plantations at La Selva Biological Station in the Atlantic lowlands of Costa Rica, using data on total height, diameter at breast height (dbh), and dry biomass from thinnings done in the plantations at 8 years of age. The dbh was the variable that had the best correlation with dry aerial biomass. On average for the ten species, the stem had a correlation of $r = 0,97$, the branches $r = 0,75$, leaves $r = 0,87$ and total dry biomass $r = 0,97$. It is advantageous that the models consider only the dbh variable, since surveys of plantations or natural forests always consider this variable because it is easy to measure in the field. The allometric models developed for each species can be used in conditions similar to those of the present study to estimate biomass of each species in a reliable manner, since all the models showed high values of coefficients of determination.

Keywords: Biomass production; carbon storage; atmospheric carbon capture; forest trees; native species; mathematical models; La Selva Biological Station, Costa Rica.

El uso de plantaciones forestales para la acumulación de carbono de la atmósfera se ha incrementado en la última década (Cairns and Meganck 1994). Aunque las plantaciones acumulan carbono a una tasa más rápida que los bosques, éstos conservan más carbono por hectárea. Sin embargo, las opciones para acumular carbono deben incluir las plantaciones, ya que éstas absorben carbono y proveen beneficios económicos (Shepherd y Montagnini 1999). Es necesario probar la capacidad de crecimiento y de acumulación de biomasa de muchas especies forestales utilizadas en plantaciones, tanto exóticas como nativas, en todo tipo de ambientes tropicales. Es especialmente importante la investigación de las especies que producen madera de buena calidad, lo cual resulta en un almacenamiento del carbono fijado a más largo plazo (Montagnini y Porras, 1998; Montero y Kanninen, en prensa).

En la región Atlántica de Costa Rica se ha estado trabajando con plantaciones de especies forestales nativas desde hace más de una década, investigando su crecimiento en condiciones puras y mixtas (Montagnini *et al.* 1995). En dos ocasiones, haciendo uso del material de raleos, se calculó la biomasa de fuste, ramas, follaje y total, por árbol y por hectárea (Montagnini y Porras 1998, Shepherd y Montagnini 1999, Shepherd y Montagnini 2001). Sin embargo, estos son métodos destructivos y laboriosos que dificultan estos cálculos. El uso de ecuaciones alométricas basado en relaciones matemáticas entre parámetros relativamente fáciles de medir, tales como el diámetro, permite el cálculo de la biomasa de una especie forestal de una manera no destructiva y extrapolable a situaciones de crecimiento similares. En un trabajo anterior, se presentaron modelos matemáticos para la estimación de diferentes componentes de biomasa,

para diez especies que han demostrado mejor crecimiento y adaptabilidad en la región Atlántica de Costa Rica (Ugalde *et al.* 2002). En ese trabajo se utilizaron datos de biomasa verde de las especies. En el presente trabajo se utilizan datos de la biomasa seca para esas mismas diez especies, que son más aplicables a diferentes condiciones.

El uso de ecuaciones alométricas basado en relaciones matemáticas entre parámetros relativamente fáciles de medir, tales como el diámetro, permite el cálculo de la biomasa de una especie forestal de una manera no destructiva y extrapolable a situaciones de crecimiento similares.

Metodología

Descripción del área de estudio

Este trabajo se realizó en la Estación Biológica La Selva, ubicada sobre la vertiente Atlántica de Costa Rica (10° 26' N, 86° 59' O). La temperatura media anual es de 24°C y la precipitación media anual es de 4000 mm. La elevación promedio es de 50 m. Los suelos son Fluventic Dystropepts derivados de aluviones volcánicos, y son profundos, bien drenados, libres de rocosidad, ácidos, con materia orgánica media o baja, bajo contenido de nutrientes y textura moderadamente pesada (Sancho y Mata 1987). El bosque original fue cortado a mediados de los años 50, y el sitio se utilizó para pastoreo de ganado hasta 1981. El presente trabajo fue realizado en plantaciones experimentales de especies nativas, mixtas y puras,

que habían sido establecidas en 1991-1992 con el fin de realizar estudios de crecimiento, productividad y circulación de nutrientes.

Las plantaciones estaban diseñadas al azar, con cuatro repeticiones de cada tratamiento. Cada tratamiento estaba ubicado en una parcela de 32 x 32 m. Dentro de cada bloque fueron marcadas seis parcelas o tratamientos: cuatro de especies arbóreas en plantación pura, una mezcla de las cuatro especies plantadas sistemáticamente, y una parcela con regeneración natural o testigo. La selección de las especies para las plantaciones se realizó en función del buen crecimiento (González y Fisher, 1994), valor económico, impacto potencial sobre el suelo, circulación de nutrientes (descomposición de hojarasca y efectos sobre los nutrientes del suelo) (Montagnini y Sancho, 1990; 1994; Montagnini *et al.* 1995), y disponibilidad de plántulas. Las plantaciones fueron raleadas a los tres y a los seis años, con lo cual la distancia original de 2 x 2 m se amplió a 4 x 4 m aproximadamente.

En el presente estudio, las plantaciones se ralearon por tercera vez a la edad de ocho años, eliminando árboles de las parcelas siguiendo criterios silviculturales. Además, en cada parcela se seleccionaron de 6 a 10 árboles según la especie, para medición de diámetros en cm (dap) y las alturas totales en m, y la cuantificación de biomasa. Se separó en los componentes fuste, ramas y hojas, se pesó en el campo en kilogramos, y se tomaron sub-muestras de cada componente de aproximadamente un kilogramo de peso, para secar en una estufa a 70 °C. Se usó la relación peso seco: peso húmedo para corregir los datos de campo y así obtener la biomasa aérea seca de cada componente del árbol. Para los cálculos de las relaciones alométricas, se utilizaron solamente datos de los árboles que representaban los diámetros más frecuentes para cada especie.

Generación de ecuaciones alométricas

Inicialmente todos los datos fueron evaluados mediante la matriz de correlación simple de Pearson del programa SYSTAT 10, para observar si existía correlación (r) entre las variables dap y altura con las variables de biomasa de cada componente y de cada especie.

Las regresiones lineales usadas en la determinación de la relación del diámetro (dap) y la altura total (H) con respecto a los componentes de la biomasa del árbol de las diez especies nativas, fueron realizadas con el programa estadístico SYSTAT 10. La selección de los modelos se realizó mediante la creación de gráficos, observando el comportamiento de los valores calculados por el modelo vs los calculados para biomasa aérea seca, y estadísticamente mediante el mayor valor del coeficiente de determinación ajustado (r^2 ajustado) de cada modelo y el cuadrado medio del error (CME) (Parresol 1999), así como también considerando que los parámetros de cada modelo fueran estadísticamente significativos, al menos con una $P < 0.05$.

Los modelos alométricos que se probaron para determinar la biomasa de cada componente en función del diámetro y la altura para cada componente del árbol fueron los siguientes:

$$\ln(Y) = a + b * \ln(\text{dap}) \dots\dots\dots (1)$$

$$Y = a + b * (\text{dap}^2) + (c * H) \dots\dots (2)$$

$$\ln(Y) = a + b * \ln(\text{dap}) + c * \ln(H) \dots (3)$$

Donde “Y” es la biomasa del componente del árbol en Kg (fuste, ramas, follaje o total), “a”, “b” y “c” son los parámetros a estimar, “ln” es el logaritmo natural, el “dap” es el diámetro a 1.3 m de altura en cm y “H” es la altura total del árbol en m.

Sprugel (1983) indica que todos los modelos alométricos con transformaciones logarítmicas deben ser corregidos por un factor de corrección (FC), por lo que el resultado obtenido al usar cualquier modelo debe ser multiplicado por el FC de cada uno. La ecuación que sugiere este autor y que se usó para calcular el FC es la siguiente:

$$FC = \exp\left(\frac{SSE^2}{2}\right)$$

Donde FC es el factor de corrección y SSE es el error estándar estimado por la regresión.

Resultados

Los valores observados de peso verde de cada componente y especie fueron transformados a peso seco (valores calculados), los cuales se presentan en el Cuadro 1. En este cuadro se resume el ámbito en extremos y promedio de los valores observados y calculados de las variables que se usaron en la generación de modelos que predijeran el comportamiento de la biomasa aérea seca de cada componente por árbol para cada especie nativa.

Con la base de datos del Cuadro 1, para cada especie se ajustaron tres tipos de modelos alométricos (modelo 1, 2 y 3), uno en función del dap y los otros en función del dap y la altura para predecir la biomasa aérea seca de los diferentes componentes del árbol para las diez especies nativas.

Aunque en el Cuadro 1 se presentan datos del componente de biomasa de ramas para *J. copaia*, el número de observaciones no permitió el ajuste de un modelo predictor de este componente para esta especie.

Cuadro 1.

Valores mínimos, máximos y promedios obtenidos por árbol y especie de las variables medidas y calculadas por componente

Especie	dap (cm)			H (m)			Biomasa aérea seca por árbol para cada componente (kg)											
							Fuste			Ramas			Hojas			Total		
	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.	Mín.	Máx.	Prom.
<i>Calophyllum brasiliense</i>	8,9	19,6	14,1	12,7	15,3	14,2	16,3	114,0	57,3	2,9	42,4	20,2	1,7	25,6	11,0	20,8	182,0	88,5
<i>Vochysia guatemalensis</i>	8,5	31,4	20,4	11,2	24,3	18,6	9,0	225,6	97,2	1,7	54,7	12,1	1,3	9,3	4,8	9,6	245,0	112,7
<i>V. ferruginea</i>	9,8	24,9	16,3	14,6	17,1	15,8	11,0	57,6	30,6	0,6	36,6	11,3	0,1	12,2	5,3	11,8	106,4	47,2
<i>Jacaranda copaia</i>	8,1	27,0	17,3	9,7	24,2	18,9	3,8	60,5	31,6	2,1	14,4	6,4	0,5	3,7	1,6	4,3	78,6	31,8
<i>Virola koschnyi</i>	8,6	22,5	15,9	11,2	18,2	16,0	4,4	50,9	27,6	0,3	16,5	7,6	0,2	7,4	3,6	4,8	74,4	38,8
<i>Dipterys panamensis</i>	8,3	18,9	13,7	13,5	18,8	17,4	18,7	186,1	89,5	4,2	59,5	29,3	1,6	19,4	10,1	24,5	256,2	128,9
<i>Terminalida amazonia</i>	9,7	26,0	17,8	13,8	23,0	19,6	21,6	263,1	130,8	4,6	80,6	39,7	1,8	25,8	12,8	28,1	360,5	183,3
<i>Genipa americana</i>	7,6	19,8	12,5	8,3	14,6	11,4	6,2	61,0	24,2	0,2	47,2	12,5	0,1	8,8	2,7	6,4	117,0	39,4
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	9,5	20,5	14,9	13,1	19,9	17,1	14,8	93,2	53,6	10,2	58,0	29,8	0,1	9,9	4,5	35,4	159,5	87,9
<i>Balizia elegans</i>	8,9	17,5	12,9	9,0	16,9	12,7	3,4	23,5	11,8	0,6	13,7	4,3	0,1	3,5	1,1	5,2	40,6	17,3

dap : diámetro a 1,3 m de altura H : altura total Mín. : valor mínimo Máx. : valor máximo Prom. : promedio

Cuadro 2.

Modelos seleccionados y valor de los parámetros y estadísticas de regresión de los modelos ajustados para estimar la biomasa aérea seca de los componentes de cada árbol en función del dap y la altura para todas las especies

Especie	Componente	Modelo	n	Parámetros			r ²	r ² _{ajustado}	CME	FC
				a	b	c				
<i>Calophyllum brasiliense</i>	fuste	1	6	- 2.570 s	2.454 as		0.98	0.98	0.011	1.01
<i>Vochysia guatemalensis</i>	fuste	1	9	- 3.044 as	2.450 as		0.99	0.99	0.003	1.00
		3	9	- 3.867 as	2.048 as	0.697 s	0.99	0.99	0.001	1.00
<i>V. ferruginea</i>	fuste	1	7	- 1.776 as	1.804 as		0.99	0.99	0.004	1.00
<i>Jacaranda copaia</i>	fuste	1	7	- 3.581 as	2.405 as		0.95	0.94	0.062	1.03
<i>Virola koschnyi</i>	fuste	1	8	- 3.679 as	2.481 as		0.98	0.98	0.013	1.01
<i>Dipterys panamensis</i>	fuste	1	6	- 2.831 as	2.747 as		0.99	0.99	0.005	1.00
<i>Terminalia amazonia</i>	fuste	1	7	- 2.473 as	2.501 as		0.99	0.99	0.011	1.01
<i>Genipa americana</i>	fuste	1	6	- 2.934 as	2.358 as		0.98	0.98	0.016	1.01
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	fuste	1	7	- 3.136 s	2.591 as		0.96	0.95	0.029	1.01
<i>Balizia elegans</i>	fuste	1	6	- 4.491 s	2.672 as		0.96	0.95	0.027	1.01
<i>C. brasiliense</i>	ramas	1	6	- 5.773 s	3.226 s		0.92	0.91	0.099	1.05
<i>V. guatemalensis</i>	ramas	1	6	- 1.872 s	1.202 s		0.92	0.90	0.028	1.01
<i>V. ferruginea</i>	ramas	1	6	- 10.100 as	4.285 as		0.99	0.99	0.013	1.01
<i>J. copaia</i>	ramas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>V. koschnyi</i>	ramas	1	8	- 9.279 as	3.962 as		0.96	0.95	0.098	1.05
<i>D. panamensis</i>	ramas	1	6	- 6.137 s	3.534 as		0.93	0.92	0.094	1.05
<i>T. amazonia</i>	ramas	1	5	- 4.876 s	2.844 as		0.99	0.97	0.044	1.02
<i>G. americana</i>	ramas	1	5	- 12.710 as	5.641 as		0.98	0.97	0.134	1.07
<i>H. alchorneoides</i>	ramas	1	6	- 8.615 as	4.234 as		0.98	0.98	0.027	1.01
<i>B. elegans</i>	ramas	1	4	- 8.661 as	3.949 as		0.98	0.98	0.044	1.02
<i>C. brasiliense</i>	hojas	1	6	- 6.825 s	3.379 as		0.95	0.93	0.072	1.04
<i>V. guatemalensis</i>	hojas	1	7	- 4.229 as	1.856 as		0.97	0.95	0.036	1.02
<i>V. ferruginea</i>	hojas	1	8	- 12.761 s	4.976 s		0.86	0.84	0.454	1.26
<i>J. copaia</i>	hojas	3	6	- 2.787 s	3.729 as	- 2.510 s	0.99	0.98	0.015	1.01
<i>V. koschnyi</i>	hojas	1	8	- 8.988 s	3.610 s		0.89	0.87	0.217	1.11
<i>D. panamensis</i>	hojas	1	6	- 6.256 s	3.197 as		0.95	0.94	0.053	1.03
<i>T. amazonia</i>	hojas	1	6	- 5.456 s	2.622 as		0.93	0.91	0.090	1.05
<i>G. americana</i>	hojas	1	6	- 12.804 s	5.195 s		0.81	0.76	0.960	1.62
<i>H. alchorneoides</i>	hojas	1	6	- 6.404 s	2.876 as		0.95	0.93	0.034	1.02
<i>B. elegans</i>	hojas	1	5	- 6.350 s	2.528 s		0.83	0.77	0.164	1.09
<i>C. brasiliense</i>	total	1	6	- 2.829 s	2.704 as		0.98	0.98	0.015	1.01
<i>V. guatemalensis</i>	total	1	9	- 2.815 s	2.428 as		0.97	0.96	0.044	1.02
<i>V. ferruginea</i>	total	1	8	- 3.252 s	2.492 as		0.95	0.94	0.039	1.02
<i>J. copaia</i>	total	1	6	- 4.398 as	2.765 as		0.98	0.98	0.029	1.01
<i>V. koschnyi</i>	total	1	8	- 4.132 as	2.755 as		0.98	0.97	0.022	1.01
<i>D. panamensis</i>	total	1	6	- 3.011 as	2.947 as		0.99	0.99	0.006	1.00
<i>T. amazonia</i>	total	1	6	- 2.538 as	2.614 as		0.99	0.99	0.007	1.00
<i>G. americana</i>	total	1	6	- 4.084 as	2.958 as		0.99	0.98	0.020	1.01
<i>H. alchorneoides</i>	total	1	5	- 1.696 s	2.224 as		0.98	0.98	0.008	1.00
<i>B. elegans</i>	total	1	5	- 4.820 s	2.959 as		0.96	0.95	0.043	1.02

n : número de observaciones a, b y c: parámetros estimados s : estadísticamente significativo (P < 0.05) as : altamente significativo (P < 0.01) r² : coeficiente de determinación r²_{ajustado} : coeficiente de determinación ajustado CME : cuadrado medio del error FC : factor de corrección

El valor de los parámetros y las estadísticas obtenidas de los modelos que mejor ajuste mostraron en la predicción de la biomasa en función del dap y la altura, para cada uno de los componentes de cada especie, se presenta en el Cuadro 2.

Las variables dap y altura mostraron muy buena correlación (r) con las variables de biomasa de cada componente y de cada especie, como se observó en la matriz de correlación simple de Pearson del programa SYSTAT 10. Los modelos ajustados muestran un coeficiente de determinación ajustado (r^2 ajustado), bastante alto, variando entre 0.81 y 0.99 para todas las especies. Los parámetros de cada modelo fueron al menos significativos estadísticamente, con una probabilidad del 95 % ($P < 0.05$) y en algunos casos mayor el grado de confiabilidad de los parámetros (Cuadro 2).

En la prueba de normalidad de los datos, se observó que los modelos presentan una distribución normal, lo que permitió un buen ajuste de los modelos.

Con respecto al factor de corrección sugerido por Sprugel (1983), en el componente fuste éste varió de 1,00 a 1,03, en ramas entre 1,01 y 1,07, mientras que en hojas este valor mostró un rango más amplio de 1,01 a 1,26, este valor máximo lo obtuvo el modelo de la especie *V. ferruginea*. En el caso de la biomasa aérea total este valor se reduce considerablemente, entre 1,01 y 1,02.

La curva de ajuste de los modelos seleccionados en función del dap, junto con los datos calculados de biomasa seca aérea por árbol de cada componente para las diez especies nativas se presenta en la Fig. 1. El ajuste de estos modelos con los datos calculados para biomasa aérea seca mostró una relación muy estrecha con el dap y en algunos casos con la altura total.

Generados los modelos para cada componente y especie se graficó la

dispersión de los residuales contra los valores esperados de la biomasa aérea seca y no se observó una tendencia que pudiera rechazar los resultados de los análisis realizados.

El dap fue la variable más correlacionada con la biomasa aérea seca de los diferentes componentes del árbol. Es una ventaja que los modelos consideren sólo la variable dap, ya que los inventarios de plantaciones o bosques naturales siempre consideran esta variable por su facilidad de medición en el campo.

Discusión

El dap fue la variable más correlacionada con la biomasa aérea seca de los diferentes componentes del árbol. En promedio para las diez especies el fuste mostró una correlación de $r = 0,97$, las ramas un $r = 0,75$, hojas $r = 0,87$ y la biomasa seca aérea total presentó un $r = 0,97$; correlación bastante alta, y similar a la obtenida en esta relación con modelos alométricos generados para diferentes especies en condiciones de bosque natural en el trópico y plantaciones (Brown *et al.* 1989; Brown y Iverson, 1992; Pérez y Kanninen, 2003, Pérez y Kanninen, 2002; Montero y Kanninen, 2002 y Acosta *et al.* 2002).

Es una ventaja que los modelos consideren sólo la variable dap, ya que los inventarios de plantaciones o bosques naturales siempre consideran esta variable por su facilidad de medición en el campo.

La corrección sugerida por Sprugel (1983), es indicada cuando

se ajustan modelos con datos transformados, como en este estudio, en que se usaron datos logaritmizados para homogenizar éstos y obtener un mejor ajuste en los modelos. En este cálculo correctivo, se pudo observar que el valor del FC se minimiza en el caso de la biomasa aérea total entre 1.01 a 1.02, al compararlo con los obtenidos para cada componente de las diez especies (Cuadro 2).

En el caso del componente fuste de *V. guatemalensis* los modelos seleccionados fueron el “1 y el 3”, donde interviene además del dap la altura, ya que los parámetros para estos dos modelos fueron significativos estadísticamente y con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0,99$. Para la especie *J. copaia* en el componente hojas, el cálculo de ésta se debe realizar con el modelo “3”, que fue el modelo que mejor ajuste mostró para predecir este componente, donde la biomasa depende no sólo del dap sino también de la altura total. En el caso de las ramas no se logró el ajuste de ningún modelo, esto debido a que no se contó con un número suficiente de observaciones que permitiera el ajuste estadístico de este componente para esta especie (Cuadro 2, Fig. 1).

A excepción de lo anterior, todos los demás modelos para los componentes y especies mostraron coeficientes de determinación (r^2) en el caso de la biomasa aérea seca total mayores que 0,95. Los valores más altos ($r^2 = 0,99$) los obtuvieron *D. panamensis*, *T. amazonia* y *G. americana* (Cuadro 2). Los modelos alométricos para estimar biomasa han proporcionado buenos ajustes con otras especies. Por ejemplo, Pérez y Kanninen (2003) con *Tectona grandis*, Montero y Kanninen (2002) con *Terminalia amazonia*, Pérez y Kanninen (2002) con *Bombacopsis quinata*, también obtuvieron resultados excelentes en el ajuste de modelos para estimar biomasa a partir de la variable dap, todo esto en condición de plantaciones.

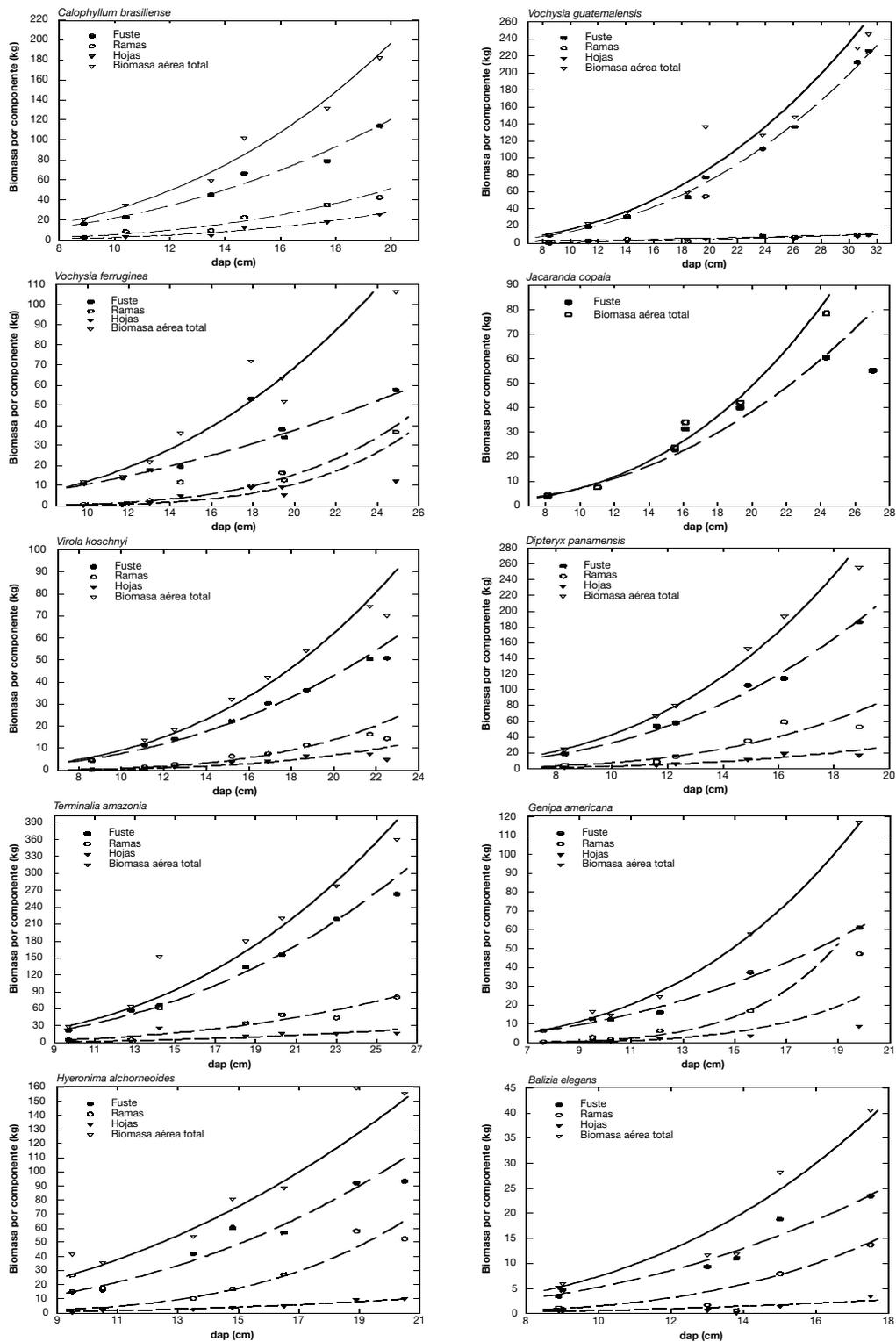


Figura 1. Dispersión de los datos “calculados de biomasa aérea seca” de cada componente y las curvas de los modelos seleccionados en función del dap para las diez especies nativas

Experiencias similares, pero en bosque natural para estimar la biomasa total las reporta Acosta *et al.* (2002). Estos autores obtuvieron $r^2 > 0.97$ para seis especies del bosque mesófilo de montaña y bosque de encino, en Oaxaca, México, con un número de observaciones similar a las de este estudio. Otras experiencias son las de Brown e Iverson, (1992) y Brown *et al.* (1989).

Pero no todos los casos son satisfactorios: por ejemplo, Geron y Ruark (1988) citado por Acosta *et al.* (2002) al utilizar el dap como variable predictora de la biomasa foliar de *Pinus radiata* obtuvieron un r^2 de apenas 0,62, aunque éste mejoró cuando se utilizó el diámetro del tronco medido en la base de la copa ($r^2 = 0,94$).

Conclusiones

Los modelos alométricos ajustados para predecir la biomasa aérea seca de cada componente del árbol para las diez especies nativas de las plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica, mostraron altos coeficientes de determinación, mayores de $r^2 > 0.95$, utilizando en la mayoría de los casos el diámetro a la altura del pecho (dap) como variable predictora de la biomasa.

El buen ajuste mostrado de cada modelo y el tener como variable predictora el dap son coincidentes con lo reportado en la literatura sobre investigaciones similares realizadas tanto en bosque natural como en plantaciones y en diferentes climas.

Estadísticamente todos los modelos mostraron valores altos en los coeficientes de determinación, y aún más, todos los parámetros fueron al menos significativos con un grado de confiabilidad del 95%.

Si se desea utilizar las funciones alométricas generadas en esta investigación en otras condiciones, se debe tener en cuenta el ámbito de datos con los que fueron generados y las condiciones de la región del presente estudio.

Cabe resaltar que los modelos alométricos desarrollados para cada especie pueden ser utilizados en condiciones similares a las del presente estudio para estimar la biomasa de cada especie de manera confiable. 

Literatura citada

- Acosta, MM; Vargas, H.J; Velázquez, MA; Etchevers, BJ. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- 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.
- _____; Iverson, LR. 1992. Biomass estimates for tropical forests. *World Resource Review*. 4 (3) 366-383.
- Cairns, MA; Meganck, RA. 1994. Carbon sequestration, biological diversity, and sustainable development: Integrated forest management. *Environmental Management* 18 (1): 13-22.
- Geron, CD; Ruark, GA. 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Can. J. for. Res.* 18 (10): 1298-1304.
- González, E; Fisher, RF. 1994. Growth of native forest species planted on abandoned pastureland in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 70: 150-167.
- Montagnini, F; Sancho, F. 1990. Influencia de seis especies de árboles nativos sobre la fertilidad del suelo en una plantación experimental en la llanura del Atlántico en Costa Rica. *Yvyrareta* (Argentina) 1(1): 2949.
- _____; Sancho, F. 1994. Above-ground biomass and nutrients in young plantations of four indigenous tree species: implications for site nutrient conservation. *Journal of Sustainable Forestry* 1 (4): 115-139.
- _____; Porras, C. 1998. Evaluating the role of plantations as carbon sinks: An example of an integrating approach from the humid tropics. *Environmental Management* 22: 459-470.
- _____; González, E; Porras, C; Rheingans, R. 1995. Mixed and pure forest plantations in the humid neotropics: a comparison of early growth, pest damage and establishment costs. *Commonwealth Forestry Review* 74: 306-314.
- Montero MM; y Kanninen, M. 2002. Biomasa y Carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* (Gmel.) Exell en la zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana* No 39-40: 50-55 p.
- _____; y Kanninen, M. Carbono fijado a diferentes edades en plantaciones de *Terminalia amazonia*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica. (en prensa).
- Parresol, BR. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45 (4): 573-593.
- Pérez, CLD; Kanninen, M. 2002. Wood specific gravity and aboveground biomass of *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forest. Ecology. Management*. 165 (1-3).
- _____; Kanninen, M. 2003. Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 15 (1): 199-213.
- Sancho, F; Mata, R. 1987. Estudio detallado de suelos. Estación Biológica La Selva. Organización para Estudios Tropicales, San José, Costa Rica, 162 p.
- Shepherd, D; Montagnini, F. 1999. Acumulación de carbono en plantaciones mixtas y puras en el trópico húmedo. *In Semana Científica CATIE* (4, 1999, Turrialba, CR). Logros de la investigación para el nuevo milenio. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p. 345-349
- _____; Montagnini, F. 2001. Carbon Sequestration Potential in Mixed and Pure Tree Plantations in the Humid Tropics. *Journal of Tropical Forest Science* 13(3): 450-459.
- Sprugel, DG. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64 (1): 209-210.
- Ugalde Arias, LA; Montagnini, F; Reiche, CR. 2002. Modelos preliminares para la estimación de biomasa para diez especies nativas de la zona Atlántica de Costa Rica. Taller-Seminario Nacional sobre Especies Nativas (2002, Heredia, CR) Memoria. Heredia, Costa Rica, UNA/ACEN/INISIFOR. p. 73-76.