

Modelación de la biomasa en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI Macurije

Biomass Model in plantations of *Pinus caribaea* var. *caribaea* in Forest Enterprise Macurije

Autores: Adolfo Luís Sandín López*, Eduardo González Izquierdo y Héctor Barrero Medel

* Estudiante de Ingeniería Forestal, Universidad “Hermanos Saíz Montes de Oca”. Calle Martí 270 Final, Pinar del Río. CP. 20100. Cuba

RESUMEN

En el trabajo se seleccionó el mejor modelo para la estimación de los componentes principales de la biomasa (tronco, ramas, hojas, corteza y raíces) en plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari, en las condiciones de la Empresa Forestal Integral Macurije, perteneciente a los municipios Guane y Mantua de la provincia de Pinar del Río. Para ello se utilizó el registro de los datos de 30 parcelas establecidas en los años 2012 y 2013 con mediciones efectuadas de diámetro a 1,30 metros del suelo y altura total, distribuidas en las diferentes Unidades Básicas de Producción Forestal (UBPF), Mantua, Los Ocuje, 20 de Mayo y Macurije. Estas parcelas fueron de 20 x 25 m siguiendo un muestreo aleatorio simple. Se probaron los modelos siguientes: lineal, logarítmico, inverso, cuadrático, cúbico, compuesto, potencia, sigmoideo, crecimiento, exponencial y logístico, según la estimación curvilínea del paquete estadístico SPSS versión 15.0. Se presentan en el trabajo las ecuaciones y los parámetros ajustados para cada componente de la biomasa. Como resultado del ajuste se concluye que el modelo simoidal fue el más preciso.

Palabras claves: modelo, biomasa, plantación, manejo forestal, calidad de sitio forestal

ABSTRACT

In the work the best model was selected for estimate of the main components of the biomass (bole, branches, needles, bark and roots) in stands of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret and Golfari, under the conditions of the Integral Forest Enterprise Macurije, belonging to the municipalities Guane and Mantua of Pinar del Río. For it was used it the registration of the data from 30 plots settled down in the years 2012 and 2013 with made mensurations of diameter to 1,30 meters of the soil and total height, distributed in the different Basic Units of Forest Production (UBPF), Mantua, Los Ocujes, 20 de Mayo and Macurije. These plots were of 20 x 25 m following a simple random sampling. The following models were proven: lineal, logarithmic, inverse, quadratic, cubic, compound, power, simoidal, growth, exponential and logistical, according to the curvilinear estimate of the statistical package SPSS Version 15.0. They are presented in the work the equations and the adjusted parameters for each component of the biomass. As a result of the adjustment it concludes that the pattern simoidal was the most precise.

Key words: model, biomass, plantation, forest management, forest site quality

INTRODUCCIÓN

El desafío actual en el manejo forestal es la planificación de suministros sostenibles de madera y otros valores forestales, a la vez que se preserva la integridad del ecosistema forestal, teniendo en cuenta el enfoque global del concepto de sostenibilidad, cobran más importancia el uso de modelos que den un pronóstico creíble de las probables estrategias que se podrían utilizar en aras de mantener un buen manejo del bosque.

Teniendo en cuenta este desafío Wilson y Wang (1999) definen el manejo forestal sostenible como el conjunto de regímenes de manejo para mantener y reforzar la salud e integridad a largo plazo de los ecosistemas del bosque y las comunidades dependientes del mismo.

Durante casi dos siglos, curvas de volumen edad, curvas de altura-edad, y tablas de volumen han sido la base en la cual los gestores del bosque han predicho los

rendimientos futuros. Estos datos históricos son válidos para las especies involucradas y el juego particular de condiciones bióticas y abióticas de crecimiento. Sin embargo, si ocurren cambios en futuros regímenes de manejo, en los impactos humanos en la atmósfera, o cambios en la fertilidad del suelo, se alterarán significativamente las condiciones futuras de crecimiento. Por tanto, las predicciones de los modelos tradicionales de crecimiento y producción probablemente no serán exactas (Kimmins *et al.*, 1999).

La modelación matemática, se considera como un método de estudio y especialización, en la que convergen aspectos teóricos, metodológicos y computacionales, considerados en el marco de un proceso en el que se pretende postular, ajustar y evaluar la capacidad y sensibilidad de un modelo para describir una relación causa-efecto sobre un conjunto de unidades en estudio (Ojeda, 1993).

Los pinares de la provincia de Pinar del Río y de Cuba en general, son de gran importancia económica, pues de éstos se extrae madera para múltiples usos y ocupan por regla general suelos pocos convenientes para la agricultura intensiva. En Cuba, las especies del género *Pinus* tienen un peso fundamental en el plan de fomento forestal para la etapa 1997-2015, estando determinada su preferencia por el rápido crecimiento que presentan y los múltiples usos que tienen sus maderas (MINAG, 1996).

Debido a esto, el 46% de la composición de las especies forestales cubanas actualmente empleadas en la reforestación son coníferas (Marrero *et al.*, 1998). *Pinus caribaea* var. *caribaea* (pino macho) es una subespecie endémica de Pinar del Río e Isla de la Juventud, de rápido crecimiento que se utiliza con resultados excelentes en los programas de mejoramiento genético forestal por la calidad de su madera y su plasticidad ecológica. Para evaluar los impactos de los escenarios de manejo alternativo, a nivel de rodal, en la productividad del sitio a largo plazo en estas plantaciones de *Pinus caribaea*, los silvicultores cubanos necesitan modelos de crecimiento del bosque basados en la Ecología de estos sistemas forestales.

La utilización de modelos matemáticos capaces de predecir las potencialidades de biomasa en los bosques, resultan herramientas de gran utilidad para satisfacer las necesidades de evaluación de dichos recursos aparejado a la necesidad de cambiar o modificar la mentalidad de los decisores a cargo del proceso de producción forestal,

que permita una nueva visión para la incorporación o introducción de nuevas tecnologías capaces de aprovechar en sus diferentes formas las potencialidades existentes en los bosques de la biomasa forestal.

Entonces se debe plantear el problema siguiente: ¿Cómo obtener estimaciones de la biomasa de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en plantaciones de la EFI Macurije?

Para lo se ha propuesto el objetivo siguiente: Determinar el modelo que estime con mayor precisión la biomasa en las plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI Macurije

Con los objetivos específicos:

1. Calcular los parámetros que definen los modelos para estimar la biomasa de la especie en las plantaciones de la EFI Macurije.
2. Identificar el modelo más preciso para estimar la biomasa en las plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI Macurije.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las parcelas se levantaron en unidades de la Empresa Forestal Integral Macurije del municipio Guane de la provincia de Pinar del Río (Figura 1). La empresa tiene una extensión de 88017,8 ha en el cual se encuentran las tres categorías de bosque existentes. Los cuales contienen estratos de pizarras de varios colores y material esquistoso a base de mica y cuarzo, los cuales han sufrido intensos procesos de meteorización y erosión. Según la clasificación los suelos que predominan, son los del tipo ferralítico cuarcítico amarillo lixiviado, pardo sin carbonatos y ferralítico rojo en todos estos suelos está presente la erosión en forma de pequeñas cárcavas. Son suelos ácidos, pobres en materia orgánica, con concentraciones medias de Ca y Mg y bajas de N, P y K, especialmente P. El fósforo en dicha zona, es el principal elemento limitante para la nutrición de *Pinus caribaea* siguiéndole en importancia el N (Herrero, 2001).

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio de las unidades Guane y Mantua.



Fuente: EFI Macurije

Según el Proyecto de Ordenación de la empresa (2006) la formación boscosa que más predomina es la de pinares con un 47,6% del área total de la empresa, la cual constituye, a la vez, la especie maderable de mayor importancia en la empresa, le sigue la formación de bosque semicaducifolio sobre suelos ácidos con un 26% y que la constituyen principalmente las galerías, en las cuales existen especies de latifolias de valor económico

La vegetación de la zona está constituida principalmente en el estrato arbóreo por *Pinus caribaea* var. *caribaea* (pino macho), *Pinus tropicales* (pino hembra) y *Eucalyptus* sp., en el estrato arbustivo *Tetrazigia coriacea* (cordobán), *Byrsonima crassifolia* (peralejo), *Brya mycrophylla* (granadillo), *Copernicia glabrescens* (guano blanco), *Comocladia dentata* (guao prieto).

Las lluvias oscilan entre 1350 mm y 1700 mm al año con temperaturas medias anuales que varían entre 24,7°C y 27°C (Herrero *et al*, 1985). Aunque no se presenta un período poco lluvioso tan evidente, si se aprecian, claramente los dos períodos de lluvia indicado en la literatura para Cuba: período poco lluvioso de noviembre a abril y período lluvioso de mayo a octubre.

Antes de proceder a la toma de datos fue preciso identificar las calidades de sitio existentes en la empresa. Los estadios de desarrollo que tenían las plantaciones en

esos rodales fueron: brinzal, latizal, fustal. Las calidades de sitio en las plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* existentes en la empresa se reflejan en la Tabla 1.

Tabla 1. Calidades de sitio en el área de estudio.

Escala evaluativo	Calidad de sitio
Muy bueno	I
Bueno	II
Regular	III
Malo	IV

Fuente: EFI Macurije

Se muestrearon cuatro Unidades Básicas de Producción (UBP): 20 de Mayo, Los Ocujes, Río Mantua y Macurije, estas se escogieron por la cercanía que tiene a la empresa (Tabla 2).

Tabla 2. Unidades Básicas de Producción y rodales donde se levantaron las parcelas.

Unidades básicas de producción	Rodales
20 de Mayo	25, 26 y 35
Los Ocujes	82, 83
Río Mantua	38, 30
Macurije	5,

Fuente: EFI Macurije

Siguiendo un muestreo aleatorio simple se eligieron los rodales a muestrear, contando con que la población es infinita, las parcelas que se utilizaron fueron rectangulares de 20 x 25 m, con un tamaño de 500 m².

Después de revisar la literatura existente para el cálculo de la biomasa, tanto en Cuba como internacionalmente, se emplearon las fórmulas siguientes:

Se utilizó la fórmula planteada por Kadeba (1989) para el cálculo de biomasa forestal

$$\text{Log}_e Y = a + b \text{Log}_e DBH$$

Donde: Y: peso completo del árbol en kg. DBH: diámetro a 1,3 metros del suelo en (cm.)

Para determinar el número de árboles se aplicó la fórmula de González (1986) citado por González (2008), que establece que: El número de árboles estimado representa la densidad normal correspondiente al potencial productivo de acuerdo al sitio:

$$N_{opt} = 6543e^{-0,116h_{100}}$$

Donde: e = constante eule h_{100} = altura dominante

Así se estima el valor del número óptimo de árboles por hectáreas (N Opt.) en función de la altura máxima.

Para determinar la altura máxima en función de la calidad de sitio se emplean las ecuaciones planteadas por García (2004):

Clase de calidad 23 m $\ln h_o = 3.5640 - 8.5695 \cdot 1/e$

Clase de calidad 26 m $\ln h_o = 3.6866 - 8.5695 \cdot 1/e$

Donde:

\ln = logaritmo neperiano h_o = altura máxima que define la calidad de sitio

E = edad expresada en años

Con los resultados del levantamiento de las parcelas se pusieron a prueba diferentes modelos matemáticos para decidir cual de ellos se ajustaba mejor a la estimación de la biomasa de los componentes del árbol. Los modelos matemáticos utilizados fueron los siguientes:

Modelos	ecuaciones	
Lineal	$y = b_0 + b_1 t$	(1)
Logarítmico	$y = b_0 + b_1 \ln t$	(2)
Inverso	$y = b_0 + \frac{b_1}{t}$	(3)
Cuadrático	$y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2$	(4)
Cúbico	$y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3$	(5)
Potencia	$y = b_0 t^{b_1}$	(6)
Logístico	$y = \frac{1}{b_0 b_1^t}$	(7)
Compuesto	$y = b_0 (b_1)^t$	(8)
Exponencial	$y = e^{(b_0 + b_1 t)}$	(9)

Sigmoideo
$$y = \text{Exp}\left(b_0 - \frac{b_1}{t}\right) \quad (10)$$

Crecimiento
$$y = \text{Exp}(b_0 + b_1 t) \quad (11)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado de los cálculos para determinar los diferentes componentes de la biomasa para las parcelas en la calidad de sitio I (26 m), según su edad y número de árboles se presenta en la Tabla 3. Semejantes resultados obtuvo Kadeba (1989) en plantaciones de *Pinus caribaea* en Nigeria, al igual que Khadka (2005) en Sri Lanka. Kadeba (1989) señala que la productividad primaria neta de la biomasa aérea estimada en estas plantaciones de dicha especie fue de 13,5; 22,6 y 16,1 t.ha⁻¹.año⁻¹, los cuales fueron inferiores a los 34,3 t.ha⁻¹.año⁻¹ reportados para los 30 años de *Pinus patula* en África del Este según Lundgren (1978) citado por Kadeba (1989), pero comparables con 14,4 t.ha⁻¹.año⁻¹ que fueron calculados en edades entre 0 a 22 años en *Pinus radiata* en New Zealand por Madgwick *et al.*, (1977) citado por Kadeba (1989). Las parcelas de los 25 años en el área de estudio promediaron aproximadamente 15,36 t.ha⁻¹.año⁻¹. Ambagahaduwa *et al.*, (2009) casualmente en rodales de 25 años de *Pinus caribaea* en bosques de Hantana (Sri Lanka) reportan biomasa total de 194 t/ha.

Tabla 3. Resultados del cálculo de la biomasa en la clase de calidad I (26 m).

Parcel a	No. árboles	Edad (años)	Biomasa (t/ha)					
			Tronco	Ramas	Hojas	Corteza	Raíces	Total
1	20	5	5,5566	1,2594	0,3199	0,6499	11,1132	18,8990
2	27	5	7,5210	1,7046	0,4330	0,8797	15,0419	25,5801
3	23	10	12,3694	2,8034	0,7121	1,4468	24,7388	42,0706
4	21	10	9,8059	2,2224	0,5645	1,1469	19,6117	33,3515
5	23	10	9,9468	2,2544	0,5726	1,1634	19,8935	33,8307
6	31	15	28,0313	6,3531	1,6138	3,2786	56,0626	95,3394
7	26	20	68,4127	15,5052	3,9386	8,0018	136,8255	232,6838
8	24	20	76,2026	17,2707	4,3871	8,9129	152,4052	259,1785
9	26	20	83,4190	18,9063	4,8025	9,7570	166,8381	283,7229
10	22	20	72,9825	16,5409	4,2017	8,5363	145,9649	248,2262
11	22	20	84,9197	19,2464	4,8889	9,9325	169,8395	288,8271
12	29	25	111,0529	25,1693	6,3934	12,9891	222,1058	377,7105
13	28	25	106,2975	24,0915	6,1197	12,4329	212,5951	361,5367
14	28	25	124,9560	28,3203	7,1939	14,6152	249,9120	424,9974
15	29	25	80,5857	18,2641	4,6394	9,4256	161,1714	274,0862
16	28	25	141,5204	32,0745	8,1475	16,5527	283,0408	481,3358

Fuente: Elaboración Propia

Para las parcelas de la calidad de sitio II (23 m) los cálculos para determinar los diferentes componentes de la biomasa, según su edad y número de árboles se presenta en la Tabla 4. En este caso obviamente por ser un sitio de menor productividad los valores de biomasa son inferiores, sin embargo se acercan a los obtenidos por Ambagahaduwa *et al.*, (2009) que reportan biomasa total de 194 t/ha.

Tabla 4. Resultados del cálculo de la biomasa en la clase de calidad II (23 m).

Parcela	No. árboles	Edad (años)	Biomasa (t/ha)					
			Tronco	Ramas	Hojas	Corteza	Raíces	Total
1	35	5	17,380609	3,939183	1,000621	0,085211	7,878366	30,283989
2	31	5	3,288719	0,745363	0,189335	0,016123	1,490726	5,730266
3	29	10	19,970676	4,526202	1,149734	0,097909	9,052403	34,796924
4	28	10	9,093231	2,060912	0,523507	0,044581	4,121823	15,844054
5	20	10	23,026534	5,218789	1,325663	0,112891	10,437577	40,121453
6	31	10	44,635843	10,116374	2,569734	0,218834	20,232748	77,773533
7	29	15	45,315279	10,270363	2,608850	0,222165	20,540726	78,957383
8	29	15	38,679881	8,766501	2,226843	0,189634	17,533001	67,395860
9	20	15	50,569320	11,461151	2,911331	0,247924	22,922303	88,112029
10	21	20	85,990833	19,489168	4,950586	0,421583	38,978335	149,830504
11	21	20	85,990833	19,489168	4,950586	0,421583	38,978335	149,830504
12	21	25	96,093540	21,778869	5,532210	0,471113	43,557739	167,433471
13	21	25	96,093540	21,778869	5,532210	0,471113	43,557739	167,433471
14	21	25	96,093540	21,778869	5,532210	0,471113	43,557739	167,433471

Fuente: Elaboración Propia

Biomasa del tronco

En la Tabla 5 se observan todos los modelos empleados en la estimación curvilínea para la variable biomasa del tronco del árbol. Véase que salta a la vista estos tres modelos, crecimiento, exponencial y logístico que tienen coeficientes de determinación ajustados por encima de un 95% y con un error de estimación en un rango de 0,245 a 0,345, con niveles de significación acordes entre ellos la diferencia radica en que su representación grafica la curva continua creciendo contradiciendo el principio de que un bosque no crece indefinidamente, sino que la curva llega a un punto y se mantiene relativamente constante, debido a lo cual se escoge el modelo sigmoideo, que presenta un coeficiente de determinación de 0,792 (no tan alto), un error de estimación de 0,540

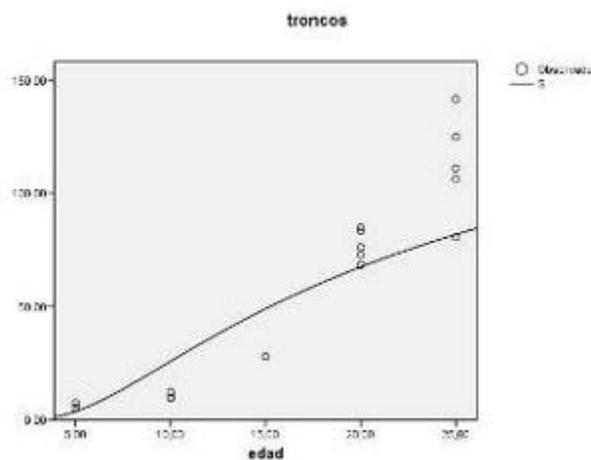
que es pequeño y su representación gráfica muestra su cercanía a una asíntota de su punto máximo en la curva con una tendencia a mantenerse casi constante (Figura 2).

Tabla 5. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos para la biomasa del tronco.

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de los parámetros			
	R ²	Sig.	Error de estimación	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,886	,000	16,039	-39,352	5,904		
Logarítmica	,774	,000	22,569	-135,625	72,734		
Inversa	,598	,000	30,072	114,633	-666,200		
Cuadrática	,916	,000	14,246	-,446	-,474	,204	
Cúbica	,925	,000	13,984	46,064	-12,754	1,093	-,019
Compuesto	,957	,000	,245	2,802	1,166		
				.000	.000		
Potencia	,925	,000	,325	,176	1,986		
				.033	.000		
S	,792	,000	,540	5,170	-19,155		
				.000	.000		
Crecimiento	,957	,000	,245	1,030	,153		
				.000	.000		
Exponencial	,957	,000	,245	2,802	,153		
				.000	.000		
Logística	,957	,000	,245	,357	,858		
				.000	.000		

Fuente: Elaboración Propia

Figura 2. Comportamiento de la biomasa del tronco ajustado al modelo sigmoideo.



Fuente: Elaboración Propia

Biomasa de las ramas

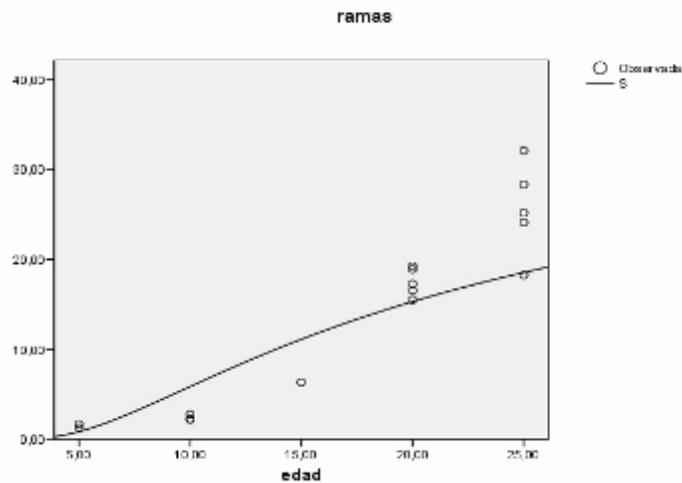
En la Tabla 6 se observan todos los modelos empleados en la estimación curvilínea para la variable biomasa de las ramas del árbol. Vuelve a ocurrir que en estos cuatro modelos: potencial, crecimiento, exponencial y logístico tienen coeficientes de determinación ajustados por encima de un 96% y con un error de estimación en un rango de 0,245 a 0,345, con niveles de significación acordes entre sí. La diferencia radica en que su representación gráfica la curva continua creciendo contradiciendo el principio de que un bosque no crece indefinidamente, sino que la curva llega a un punto y se mantiene constante. Debido a esto se escoge el modelo sigmoideo, que presenta un coeficiente de determinación de 0,792 (no es tan alto), con un error de estimación de 0,540 que es pequeño y su representación gráfica muestra como llegado al punto máximo la curva se mantiene constante (Figura 3).

Tabla 6. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos para la biomasa de las ramas.

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de los parámetros			
	R ²	Sig.	Error de estimación	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,886	,000	3,635	-8,919	1,338		
Logarítmica	,774	,000	5,115	-30,738	16,485		
Inversa	,598	,000	6,816	25,981	-150,989		
Cuadrático	,916	,000	3,229	-,101	-,107	,046	
Cúbico	,925	,000	3,169	10,440	-2,891	,248	-,004
Compuesto	,957	,000	,245	,635	1,166		
				.000	.000		
Potencia	,925	,000	,325	,040	1,986		
				.033	.000		
S	,792	,000	,540	3,686	-19,155		
				.000	.000		
Crecimiento	,957	,000	,245	-,454	,153		
				.015	.000		
Exponencial	,957	,000	,245	,635	,153		
				.000	.000		
Logística	,957	,000	,245	1,575	,858		
				.000	.000		

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3. Comportamiento de la biomasa de las ramas ajustado al modelo sigmoideo.



Fuente: Elaboración Propia

La ecuación del modelo sigmoideo sería la siguiente: $y = EXP(3,69 - \frac{19,155}{x})$

Biomasa de las hojas

En la Tabla 7 se observan todos los modelos empleados en la estimación curvilínea para la variable biomasa de las hojas del árbol. Aquí el modelo que se escoge con un coeficiente de determinación de 79,2 %, un error de estimación de 0,540 y con una significación alta es el sigmoideo, y su representación gráfica muestra como llegado al punto máximo la curva se mantiene constante (Figura 4).

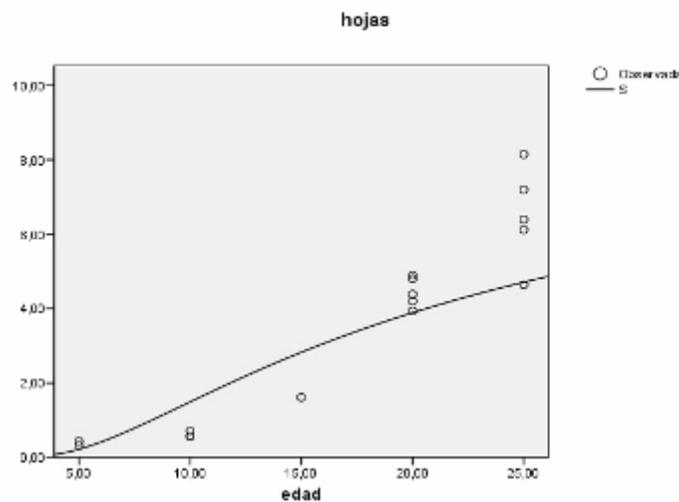
Tabla 7. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos para la biomasa de las hojas.

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de los parámetros			
	R ²	Sig.	Error de estimación	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,886	,000	,923	-2,266	,340		
Logarítmica	,774	,000	1,299	-7,808	4,187		
Inversa	,598	,000	1,731	6,600	-38,354		
Cuadrático	,916	,000	,820	-,026	-,027	,012	
Cúbico	,925	,000	,805	2,652	-,734	,063	-,001
Compuesto	,957	,000	,245	,161	1,166		
				,000	,000		
Potencia	,925	,000	,325	,010	1,986		
				,033	,000		

S	,792	,000	,540	2,316	-19,155
				.000	.000
Crecimiento	,957	,000	,245	-1,824	,153
				.000	.000
Exponencial	,957	,000	,245	,161	,153
				.000	.000
Logística	,957	,000	,245	6,199	,858
				.000	.000

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4. Comportamiento de la biomasa de las hojas ajustado al modelo sigmoideo.



Fuente: Elaboración Propia

La ecuación del modelo sigmoideo sería la siguiente: $y = EXP(2,32 - \frac{19,155}{x})$

Biomasa de la corteza

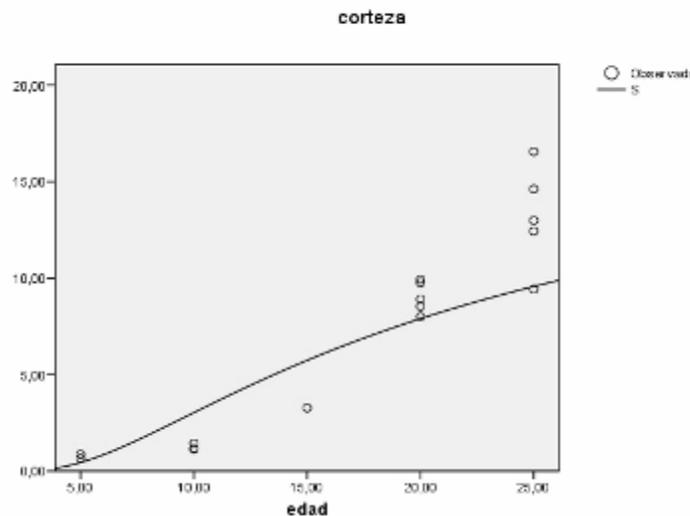
En la Tabla 8 se observan todos los modelos empleados en la estimación curvilínea para la variable biomasa de las hojas del árbol. Aquí el modelo que se escoge con un coeficiente de determinación de 79,2 %, un error de estimación de 0,540 y con una significación alta es el sigmoideo, y su representación gráfica muestra como llegado al punto máximo la curva se mantiene constante (Figura 5).

Tabla 8. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos para la biomasa de la corteza.

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de los parámetros			
	R ²	Sig.	Error de estimación	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,886	,000	1,876	-4,603	,691		
Logarítmica	,774	,000	2,640	-15,863	8,507		
Inversa	,598	,000	3,517	13,408	-77,921		
Cuadrático	,916	,000	1,666	-,052	-,055	,02	
Cúbico	,925	,000	1,636	5,388	-1,492	,12	-,002
Compuesto	,957	,000	,245	,328	1,166		
Potencia	,925	,000	,325	,021	1,986		
S	,792	,000	,540	3,025	-19,155		
Crecimiento	.957	,000	,245	-1,116	,153		
Exponencial	,957	,000	,245	,328	,153		
Logística	,957	,000	,245	3,051	,858		

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5. Comportamiento de la biomasa de la corteza ajustado al modelo sigmoideo.



Fuente: Elaboración Propia

La ecuación del modelo sigmoideo sería la siguiente: $y = EXP(3,02 - \frac{19,155}{x})$

Biomasa de las raíces

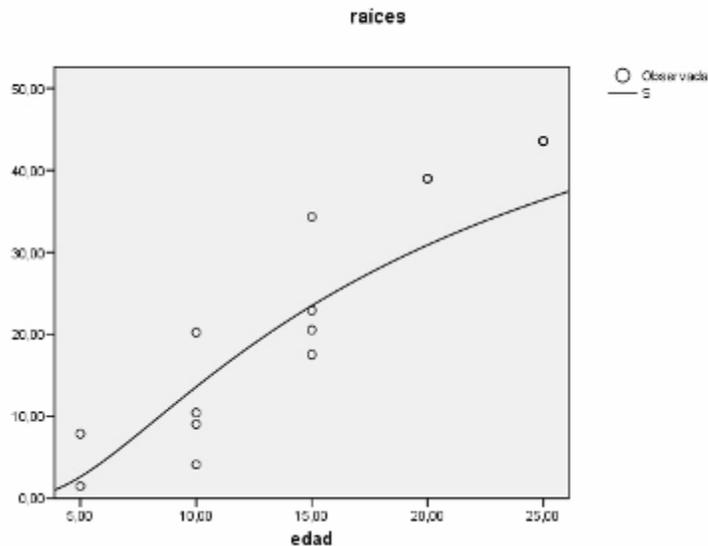
En la Tabla 9 se observan todos los modelos empleados en la estimación curvilínea para la variable biomasa de las ramas del árbol. La diferencia radica en que su representación grafica la curva continua creciendo contradiciendo el principio de que un bosque no crece indefinidamente, sino que la curva llega a un punto y se mantiene constante. Debido a esto se escoge el modelo sigmoideo, que presenta un coeficiente de determinación de 0,792 (no tan alto), con un error de estimación de 0,540 que es pequeño y su representación gráfica muestra como llegado al punto máximo la curva se mantiene constante (Figura 6).

Tabla 9. Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos para la biomasa de las raíces.

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de los parámetros			
	R ²	Sig.	Error de estimación	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,882	,000	5,515	-8,118	2,129		
Logarítmica	,812	,000	6,951	-45,269	26,631		
Cuadrático	,882	,000	5,740	-8,315	2,160	-,001	
Cúbico	,904	,000	5,410	15,568	-4,324	,492	-,011
Potencia	,777	,000	,488	,222	1,676		
				.153	.000		
S	,726	,000	,540	4,252	-16,430		
				.000	.000		
Crecimiento	,718	,000	,548	,988	,124		
				.015	.000		
Exponencial	,718	,000	,548	2,686	,124		
				.014	.000		
Logística	,718	,000	,548	,372	,884		
				.014	.000		

Fuente: Elaboración Propia

Figura 6. Comportamiento de la biomasa de las raíces ajustado al modelo sigmoideo.



Fuente: Elaboración Propia

La ecuación del modelo sigmoideo sería la siguiente: $y = EXP(4,25 - \frac{16,43}{x})$

El resultado de la ecuación de regresión curvilínea aplicada para el ajuste de los modelos de crecimiento seleccionados, usando como variable la biomasa de las partes de los árboles dio como resultado que el modelo que más se ajusta es el sigmoideo.

Resultados con la biomasa de las ramas secas, según Vidal **et al.**, (2002), para bosques naturales de *Pinus tropicalis* Morelet; obtuvieron un modelo logarítmico en función del diámetro ($LogP.M. = -1,9292 + 2,6177 * \log d$). Vidal **et al.**, (2004), emplean también un modelo logarítmico ($LogP.R. = -,1686 + 1,9066 * \log d$), para *Pinus caribaea* var. *caribaea*; posteriormente Benítez (2006), llega a un modelo polinomial, pero en plantaciones de *Casuarina equisetifolia*

$Pms = -0,850986 + 0,075811 * (d_{1,3})^2 + 0,010927 * (h)^2$, en la provincia Camagüey. Vidal **et al.**, (2011), también para las ramas, encontraron un modelo logarítmico para *Pinus cubensis* Griseb ($LogP.R. = -1,3749 + 2,1342 * \log d$) y Flores **et al.**, (2012), estimaron la

biomasa de las ramas mediante un modelo exponencial como este $Bmra = 1,584e^{0,0044DN}$, para *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham.

Para la biomasa del follaje seco:

Vidal **et al.**, (2002), el modelo $LogP.F. = -1,4022 + 2,357 * \log d$, en bosques naturales de *Pinus tropicalis* Morelet; Vidal **et al.**, (2004), el modelo $LogP.F. = 0,6886 + 1,5009 * \log d$, para *Pinus caribaea* var. *caribaea* Barret y Golfari; Benítez (2006), el modelo $Psf = -0,149755 + 0,042032 * (d_{1,3})^2 + 0,003071 * (h)^2$, en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst en la provincia de Camagüey; Fassola **et al.**, (2010), el modelo $Log(Bac) = -1,67 + 1,44 * \log(dcap)$, para *Pinus taeda*, en la zona norte de la provincia Misiones, Argentina; Vidal **et al.**, (2011), el modelo $LogP.F. = -0,6334 + 1,4089 * \log d$, para *Pinus cubensis* Griseb.

Biomasa del fuste seco:

Benítez (2006), obtuvo el modelo $LnPfs = -6,137224 + 2,21381 * \ln d_{tocón} + 1,33762 * \ln h$, en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst en la provincia de Camagüey; Silva y Navar (2009), el modelo $Bf = 0,192 * D^{2,3231}$, para *Pinus spp*, en Durango, México; Montes de Oca **et al.**, (2009), el modelo $Bf = 7,790 + H_t^{0,004z} + D_b^{2,7188}$, para *Pinus durangensis* Méndez **et al.**, (2011), el modelo $Bfs = \left[\exp(5,5910) + \left(-19,6455 / E \right) \right]$, para *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus*

Biomasa de la corteza seca:

Benítez (2006), obtuvo el modelo $LnPCs = -5,94470 + 2,07569 * \ln d_{tocón} + 0,82816 * \ln h$, para plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst en la provincia de Camagüey.

CONCLUSIONES

- El modelo sigmoideo resultó ser el que mejor representa el comportamiento de los componentes de la biomasa (tronco, ramas, hojas, corteza y raíces) en las plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* para las dos calidades de sitio (I y II) en la EFI Macurije, cuya ecuación general es de la forma siguiente:

$$y = e(b_o - \frac{b_1}{x})$$

- El modelo sigmoideo es el más preciso para estimar los distintos componentes de la biomasa (tronco, ramas, hojas, corteza y raíces) para las plantaciones de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI Macurije.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBAGAHADUWA, I. M. et. al. Estimation of above ground biomass of a *Pinus caribaea* Morelet stand in lower Hantana. *J. Natn. Sci. Foundation*, 2009, **37**(3), 195-201.
- BENÍTEZ, J. Y. *Estimación de la biomasa total en plantaciones de Casuarina equisetifolia Forst de la provincia de Camagüey*. Tesis doctoral inédita, Universidad de Pinar del Río y la Universidad de Alicante, 2006.
- FASSOLA, H. E. et. al. Modelos regionales de biomasa aérea de *Pinus taeda* para misiones y de corrientes, Argentina: 14^{ta} Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales, 2010. [en línea]. Disponible en: http://inta.gob.ar/documentos/modelos.../042111_1Fassola_Modelos_biomasa.pdf [Consulta 1 de octubre 2012].
- FLORES, P. et. al. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham., en proceso de declinación. *Rev. Mex. Cien. For.*, 2012, **2**(8). Disponible en: www.revistasinifap.org.mx/index.php/.../197 [Consulta 30 de mayo 2013].

- GARCÍA, I. *Bases para el control y planificación del Pinus caribaea Morelet var. caribaea Barret y Golfari en la provincia de Pinar del Río*. Tesis de Maestría inédita, Universidad de Pinar del Río, 2004.
- GONZÁLEZ, E. *Un modelo para ralea Pinus caribaea var. caribaea en Pinar del Río, Cuba*. Pinar del Río: V SIMFOR, 2008, ISBN 978-959-16-0655-6.
- HERRERO, G. 2001. *Nutrición de plantaciones de Pinus caribaea var. caribaea: Respuesta a la fertilización y métodos de diagnóstico*. Tesis doctoral inédita, INCA. La Habana, 2001.
- HERRERO, J. et. al. *Manejo del Pinus caribaea var. caribaea en las zonas de "Alturas de Pizarras" provincia de Pinar del Río*. Boletín de Reseñas, 1985.
- KADEBA, O. Biomass equations for even aged stands of Caribbean Pine (*Pinus caribaea*) planted as an exotic in Nigeria. *Journal of Tropical Forest Science*, 1989, **1**(4), 346-355.
- KHADKA, M. *Aboveground biomass of Pinus caribaea- a study from Hantana forest, Sri Lanka*. Vienna: Dissertation of University of Natural Resources and Applied Life Science (Boku), 2005.
- KIMMINS, J. P.; MAILLY, D. and SEELY, B. Modelling forest ecosystem net primary production: the hybrid simulation approach used in FORECAST. *Ecol. Model.*, 1999, **122**, 195-224.
- MARRERO, A.; RENDA, A. Y CALZADILLA, E. Comportamiento de *Pinus caribaea* Morelet en diferentes tipos de suelos. *Revista Cuba Forestal*, 1998, **1**, 39-40.
- MÉNDEZ, J. et. al. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*, 2011, **45**, 4-7.
- MINAG. *Programa de desarrollo económico forestal 1997-2015*. La Habana, 1996.
- Montes de Oca, E. et. al. Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la región de el salto, Durango. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2009, **15**(1), 65-71.
- OJEDA, M.. *La modelación estadística*. [en línea] México: Universidad de Veracruz, 1993. Disponible en: <http://www.eio.upc.esresearchgresafilestfilesmodelacion.pdf> [Consulta mayo 2013].

- SILVA, F. M. Y NAVAR, J. DE J. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2009, **15**(2), 155-160.
- VIDAL, A. et. al.. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea var. caribaea* en la EFI La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho*, 2004, **11**, 60-66.
- VIDAL, A. et. al. *Compendio de tablas para la determinación de la biomasa de copa de especies forestales*. 5to. Congreso Forestal de Cuba Abril, 2011 [en línea] Disponible en: http://bva.fao.cu/pub_doc/FORESTALES/Revista_Espec_2011. [Consulta mayo 2013].
- VIDAL, A. et. al. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus tropicalis* Morelet en la Empresa Forestal Integral Macurije de la provincia de Pinar del Río. *Revista Floresta*, 2002, **32**(2), 261-265.
- WILSON, B. AND S. WANG. *Sustainable forestry--the policy prescription in British Columbia*. In: Yoshimoto, A and K. Yukutake, Eds.). *Global Concerns for Forest Resource Utilization--Sustainable Use and Management*. London: Kluwer Academia, Publisher, 1999, p. 35-45.

Aceptado: 20/10/2014