

**ECUACIONES GENERALES DIÁMETRO-ALTURA PARA *Ochroma pyramidale*,  
REGIÓN COSTA-ECUADOR.****GENERAL HIGH-DIAMETER EQUATIONS FOR *Ochroma pyramidale*, COAST  
REGION-ECUADOR.**

Cañadas López Alvaro<sup>1\*</sup>, Rade Loor Diana<sup>2</sup>, Fernández Cevallos Galo<sup>1</sup>, Domínguez Andrade Juan Manuel<sup>3</sup>, Murillo Hernández Isabel<sup>4</sup>, Molina Hidrovo Carlos<sup>5</sup>, Quimiz Castro Henry<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Director Estación Experimental Portoviejo (INIAP/EEP), Km 12 vía Santa Ana.

<sup>2</sup> Escuela Superior Politécnica de Manabí (ESPAM-MFL), Centro de Investigación de las Carreras de la ESPAM-MFL (CICEM). Campus Politécnico Calceta, Sitio El Limón, Calceta, Ecuador.

<sup>3</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, ESPAE Graduate School of Management, Campus Las Peñas Malecón No. 100 y Loja, Guayaquil, Ecuador.

<sup>4</sup> Subdirectora General del INIAP. Av. Francisco Orellana y Justino Cornejo Edif. Gobierno Zonal de Guayaquil, Piso 6, Ofic. 610.

<sup>5</sup> Estación Experimental Tropical Pichilingue, (INIAP/EETP), km 5 vía Quevedo - El Empalme, cantón Mocache, Provincia Los Ríos.

\*Autor para correspondencia, correo electrónico: [alvaro.canadas@iniap.gob.ec](mailto:alvaro.canadas@iniap.gob.ec)

Carrera de Ingeniería Forestal,  
Universidad Nacional de Loja, Ecuador

---

---

Web: [www.bosqueslatitudcero.com](http://www.bosqueslatitudcero.com)  
Email: [bosqueslatitudcero@unl.edu.ec](mailto:bosqueslatitudcero@unl.edu.ec)

**Recepción:** 02 de marzo del 2016

**Aceptación:** 27 de julio del 2016

Cañadas, A, *et al.* 2016. Ecuaciones generales diámetro-altura para *ochroma pyramidale*, región costa-ecuador. Universidad Nacional de Loja.

## RESUMEN

Las exportaciones de Balsa del Ecuador se incrementaron en un 560% entre 2007-2012, no obstante, a nivel de campo existe una escasa información sobre plantaciones de Balsa. El objetivo de la presente investigación fue comparar y desarrollar varias ecuaciones generalizadas de diámetro-altura para rodales puros de Balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav.) Urb). Los datos usados para ajustar las ecuaciones provinieron de 926 observaciones de diámetro-altura obtenidas en 120 parcelas implantadas en plantaciones puras, con varias densidades, las cuales cubrieron un amplio y diverso rango de sitios forestales. Como primer paso, fueron empleadas regresiones no lineales para probar la bondad de ajuste de las ecuaciones diámetro altura. La función derivada de Richard y la otra ecuación de Schumacher, en los dos casos el análisis de residuos, no mostraron violaciones severas de los fundamentos estadísticos. Como segundo paso, se modificó la ecuación de Schumacher dando como resultado una nueva ecuación, la cual mostró un mejoramiento marginal. Finalmente las ecuaciones fueron validadas utilizando datos independientes, encontrado en la ecuación de Richard, Schumacher y su modificación una fuerte correlación entre valores observados y predichos. Así las ecuaciones Richard mostraron una eficiencia del 96%, Schumacher reveló una eficiencia del 94% y su modificación expresó una eficiencia del 91%, pudiendo ser empleadas para predecir fiablemente la altura individual de árboles de Balsa en la región Costa.

---

**Palabras Clave:** *Balsa, Altura Dominante, Función Richard, Función Schumacher, Regresión no lineal.*

## ABSTRACT

The Balsa exports of the Ecuador have registered an increment of 560% among the 2007-2012. Nevertheless, at field level there exist very little information on Balsa plantations. The object of the present investigation was to develop and compare generalized diameter-height equations for pure stand of Balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav.) Urb). The data used to fit the equations consisted of 926 diameter-height observations samples from 120 plots installed in pure, uniformly stoked stands covering a wide range of forest stand and site conditions. In a first step, nonlinear least square regression was used to test the performance of two published equations; one derived from Richards and the other one from Schumacher function with an efficiency of 94%. In both cases, the residuals indicated no severe violation of the fundamental statistical assumptions. In a second step, Schumacher equation was modified resulting a new equation which showed only a marginal improvement. Finally, the efficiency was evaluated for all equation using an independent data set. The strongest correlation between observed and predicted values was obtained with Richard equation. Richard showed a 96% of efficiency, Schumacher showed a 94% of efficiency and their modifications showed a 91% of efficiency could be used predict the individual Balsa tree in the Coast Region.

---

**Keywords:** *Balsa, Dominant Height, Nonlinear regression, Richards function, Schumacher function.*

## INTRODUCCIÓN

Entre la altura de un árbol y el diámetro a la altura del pecho existe una relación estocástica, no lineal y esta relación es empleada para la estimación del volumen de los árboles y la evaluación de la altura dominante (Vargas-Larreta *et al.*, 2010). Las actividades de operaciones forestales que más tiempo ocupan y por ende mayor recursos demanda está la medición de altura total de los árboles en pie (Cruz-Leyva *et al.*, 2010).

La estimación precisa de esta analogía diámetro-altura es fundamental, debido a que la altura es normalmente predicha mediante la determinación de esta relación (diámetro-altura) antes de ser medida (Gadow *et al.*, 2004). Como consecuencia de esto, los volúmenes individuales de los árboles son estimados a menudo de la medición del diámetro de todos los árboles. Mientras que, para la altura se instala subparcelas para la determinación de la altura (Cañadas *et al.*, 2016; Cañadas, 2005).

Los datos obtenidos de altura de los árboles muestreados son utilizados para establecer una regresión diámetro-altura, la cual a su vez se usa para estimar la altura de los árboles a los que únicamente se les ha medido los diámetros (López Sánchez *et al.*, 2003). Tal regresión para estimar la altura podría ser obtenida separadamente para cada rodal. No obstante, esta aproximación ocupa considerable cantidad de tiempo y dinero. Una alternativa práctica sería el desarrollo de una ecuación generalizada que describa la dependencia entre diámetro-altura basándose en una función que implique la altura dominante de un rodal o el diámetro medio cuadrático (Jayaraman y Lappi, 2001).

Las ecuaciones generalizadas de diámetro-altura no sólo son herramientas útiles para el propósito de inventario forestal. Normalmente, ellas también se usan con el tiempo como un elemento importante de muchos modelos de clase de tamaño para la simulación del desarrollo de alternativas de manejo silviculturales (Trincado y Leal, 2006). Adicionalmente, a veces estas se emplean con la finalidad de generar datos sobre el crecimiento de la altura de árboles individuales. En el modelaje de la relación altura-diámetro se están incorporando variables obtenidas de los rodales con la finalidad de mejorar su capacidad de estimación (López Sánchez *et al.*, 2003).

Esta incorporación de variables de los rodales hacen que la aplicación de las ecuaciones generales sean mayormente aplicadas en correspondencia a los modelos de tipo local (Soares y Tomé, 2002). De acuerdo a Trincado y Leal (2006) en su estudio sobre ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino (*Pinus radiata*) concluyen que, las ecuaciones locales con 2-parámetros son más precisas y estables en términos de convergencia en comparación a ecuaciones con 3-parámetros. En todas las evaluaciones realizadas las ecuaciones generalizadas presentan mejores valores de precisión y sesgo que las ecuaciones locales.

Por otro lado, el Ministerio del Ambiente del Ecuador MAE (2005) enfatiza que la superficie de bosques nativos en el Ecuador abarca aproximadamente 8,8 millones de hectáreas. De estas los manglares ocupan 227.300,00 ha y actualmente por su difícil accesibilidad únicamente 600 mil ha de bosques nativos presentan condiciones económicas para ser manejados silviculturalmente. Mientras que las tierras con potencial para ser forestadas alcanzan una extensión de más de 2 millones de

hectáreas y las plantaciones forestales tan sólo representan un total de 160.000,00 ha (MAGAP, 2008). MAGAP (2016) menciona que, los esfuerzos del Estado hasta el 2012 para incrementar las plantaciones forestales en el Ecuador fueron débiles. A partir del 2013 con la puesta en marcha del Programa de Incentivos para la Reforestación con Fines Comerciales se tiene avances significativos registrándose un total de 48.532,95 ha y las especies más reforestadas detrás de la Teca y la Melina fue la Balsa con un total de 8.518,02 ha de Balsa (*Ochroma pyramidale*).

Concomitantemente con esto, en los países tropicales se cree que, el recurso bosque es abundante y que está esperando ser explotado. De tal manera que la atención en el Ecuador se ha centralizado más sobre la explotación y utilización antes que sobre su plantación y crecimiento. Desde este último punto de vista, la tendencia en nuestro país se considera a la plantación de árboles como un arte.

Sin prestar atención a los costos involucrados y sin preocuparse menos aún de cuál va a ser el futuro preciso de su utilización (Cañadas, 2007; Cañadas y Vera, 2011; Cañadas y Rade, 2013). La reflexión sobre este argumento radica en que los productos forestales a diferencia de otras materias primas. Nunca se planifican para satisfacer las necesidades de una industria cada vez más creciente. Sino simplemente se establecen plantaciones amparadas en el supuesto de que de algún modo estas van a ser explotadas, aprovechadas y utilizadas (Cañadas *et al.*, 2012; Cañadas *et al.*, 2013).

De acuerdo a Cañadas (1983) señalaba las ventajas económicas del manejo de tierras de barbecho empleando la regeneración natural de especies secundarias como la Balsa o Laurel. Esto es o podría ser una alternativa saludable para el Ecuador, desde

el punto de vista del rápido crecimiento, amplia versatilidad y utilización de las características físicas de estas especies.

Los valores FOB en miles de dólares de las exportaciones de la madera de Balsa del Ecuador aumentan en un 560% para el período comprendido entre el 2007 al 2012 (BCE, 2012). Debido al incremento de las áreas ocupadas por las plantaciones de Balsa y la necesidad de generación información sobre los volúmenes de producción de la Balsa.

Las ecuaciones generalizadas entre altura y diámetro son de gran utilidad e importancia para determinación de volúmenes, biomasa así como la caracterización de las estructuras de los rodales de Balsa en la práctica en el campo forestal. Estas ecuaciones generales de diámetro-altura para la Balsa son inexistentes en el Ecuador. No obstante, la relación altura y diámetro han sido aplicadas para rodales coetáneos de diferentes especies y pueden ser ajustadas a varias funciones de segundo grado o ecuaciones polinómicas para la Balsa, demostrando ser mejores que las ecuaciones locales. Son estas funciones generales apropiadas para describir esta relación y presentan los mejores valores de precisión, sesgo y pueden ser validadas para los rodales de Balsa en las tierras bajas en la costa del Ecuador.

De ahí que, la presente investigación se ha planteado los siguientes objetivos: evaluar el ajuste de dos modelos generales diámetro y altura, generar dos nuevas funciones para describir esta relación y validar los modelos desarrollados para ser aplicados en la práctica para los rodales puros de Balsa (*Ochroma pyramidale*) en las tierras bajas en la costa del Ecuador.

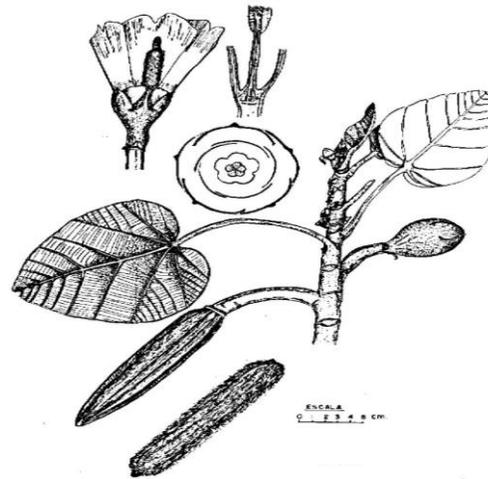
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción botánica de la Balsa

La Balsa pertenece a uno de los aproximadamente 25 géneros de la familia Bombacaceae y se ha clasificado dentro de la especie *Ochroma*. Sin embargo, para los propósitos prácticos existe una sólo especie *O. pyramidale* (Cav.) Urb y *O. lagopus* Sw. El área de distribución natural abarca desde los 19° N hasta los 20° S en regiones de Centro y Suramérica tropical desde el sur de México hasta Bolivia (Lamprecht, 1986). La Balsa es comúnmente conocida como Balsa, Boya, Corkwood, Down Tree, Bois o Korkholz (Fletcher, 1951). Este árbol de rápido crecimiento se reconoce fácilmente por una copa abierta de unas pocas ramas gruesas y extendidas, corteza lisa color gris rosado, hojas grandes casi redondas, acorazonadas de 20-40 cm de largo y de ancho (Figura 1). Posee 7-9 nervios principales saliendo de la base (venación palmada) y con peciolo largos, flores grandes en forma de campanas, blancuzcas y Little y Dixon, 1969.

La Balsa es la madera comercial más liviana del mundo (peso específico 0,09) pesa menos que el corcho y el Ecuador ha sido el principal productor mundial. La madera es blancuzca grisácea, pálida con lustre sedoso, la albura y el corazón no bien definidos, sin olor ni sabor distintivo, la médula gruesa de 1,5-2 cm de diámetro. La madera es muy blanda, débil y tiene el grano muy grueso, recto, uniforme, se deforma por compresión pero es fuerte considerando su peso. A menos que no sea tratada es absorbente, se seca al aire con rapidez moderada y los

verdosas, solitarias de 14-15 cm o más de largo (Little y Dixon, 1969). Con 5 pétalos y 5 cápsulas color café oscuro de forma particular, cilíndricas de 18-25 cm de largo y 2,5-4 cm de diámetro, cubiertas con una materia lanosa color café claro después de abrirse (Little y Dixon, 1969).

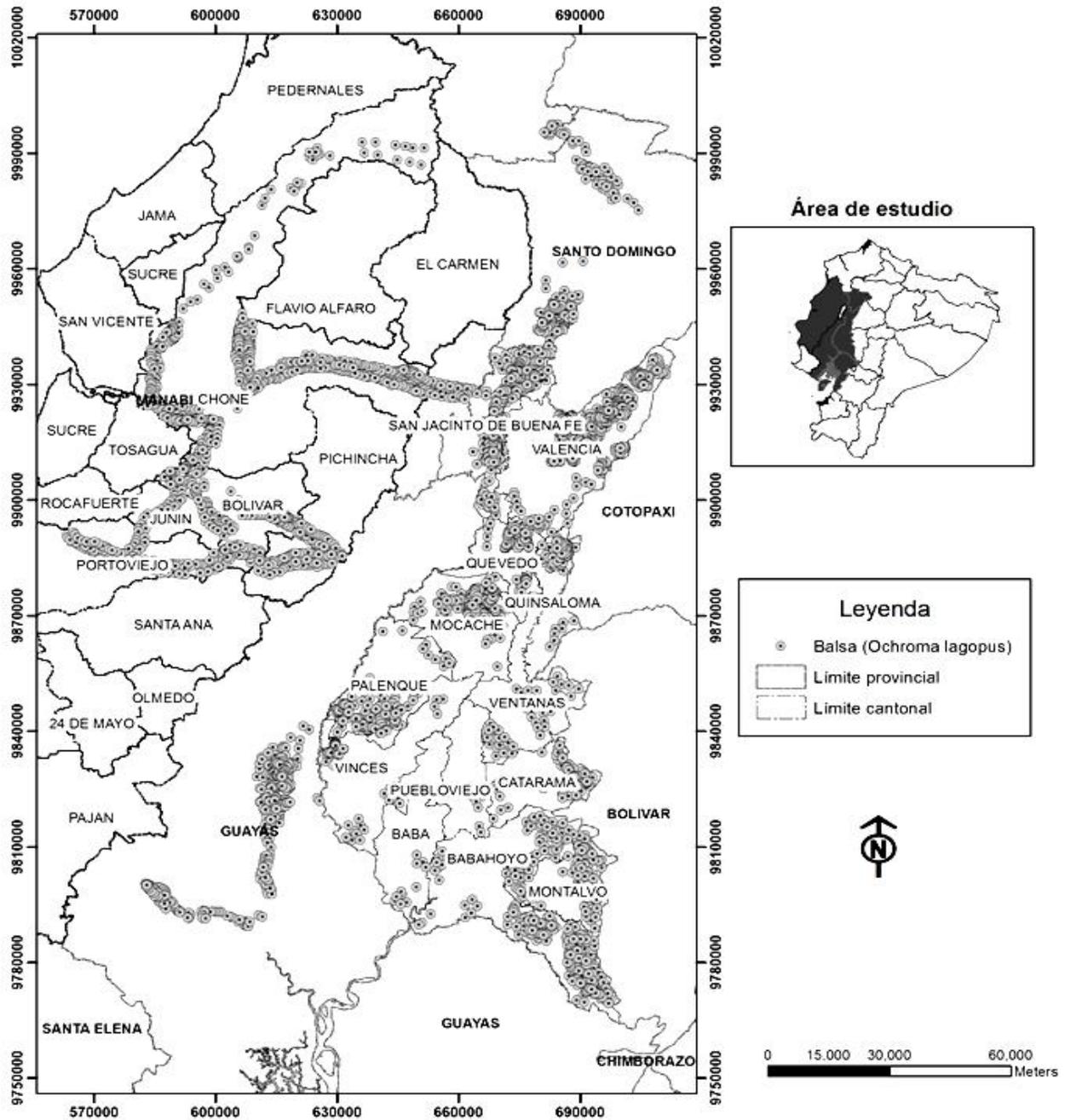


**Figura 1.** Representación gráfica de *Ochroma pyramidale*, Fuente:

defectos debido al secado son atenuados, de fácil cepillado, resistente a rajaduras, moldeado deficiente, lijado regular, el torneado, taladrado y escopleado son muy defectuosos (Little y Dixon, 1969).

### Ubicación del área de estudio

La presente investigación se realizó en las provincias de Esmeraldas, Sto. Domingo de los Tsáchilas, Los Ríos, Manabí, Santa Elena y Guayas los rodales son estudiados son representados mediante puntos en la Figura 2.



**Figura 2.** Distribución espacial de las plantaciones de Balsa para la obtención del primer set de datos, zona de investigación, Fuente: Cañadas *et al.* 2016.

**Datos**

Dos diferentes juegos de datos fueron empleados en esta investigación. Uno para el ajuste de los modelos y el otro para la

validación de los mismos. El primer juego fue medido en el 2009-2011 dentro del proyecto de investigación de la ITTO-INIAP. Estos rodales cubrieron un amplio rango de rodales forestales y diversas condiciones de sitios a lo largo de la zona de

estudio (Figura 2). El segundo juego para la validación de los modelos provino de 200 inventarios (2.293) en parcelas circulares temporales y permanentes instaladas en rodales coetáneos localizados en las provincias señaladas. El primer rango de

datos es menor debido a que abarcaron una amplia gama de condiciones ambientales de la mencionada provincia. La Tabla 1 resume las características de los árboles para el primer y segundo grupo de datos.

**Tabla 1.** Resumen de las características de los rodales para el primer grupo de datos (n= 926) y el segundo grupo (n= 2.293).

Variables	1 <sup>er</sup> Grupo de Datos			2 <sup>do</sup> Grupo de Datos		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Altura dominante de un rodal (m)	1,40	12,19	28,07	4,87	40,62	22,51
Diámetro medio cuadrático (cm)	3,06	22,68	49,41	5,00	24,08	92,59
Número de árboles (ha)	100,00	361,40	1.506,00	200,00	332,55	1.500,00
Área Basal (m <sup>2</sup> /ha)	1,90	12,19	28,07	1,17	13,52	26,89

En la presente investigación, el algoritmo DUD fue empleado, el cual puede ser encontrado en el procedimiento NLIN del programa SAS (SAS Institute, 1999). El supuesto de normalidad de residuos de los datos observados con los datos predichos fue

evaluada gráficamente utilizando gráficos Q-Q plots. En la Tabla 2 se resumen las formulas empleadas con la finalidad de la validación de los modelos. Esta metodología fue propuesta por Cañadas *et al.* (2014).

**Tabla 2.** Criterios de evaluación de los modelos ( $x_i$  = Valores Predichos;  $X_i$  = Valores Observados; n = Número de observaciones).

Criterio	Fórmula		Valor Ideal	
	Absoluto	Relativo	Absoluto	Relativo
<i>Distorsión</i> ( $\bar{e}$ , $\bar{e}$ %)	$\frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)}{n}$	$(\bar{e} \cdot 100) / \bar{X}$	0	0%
<i>Precisión</i> ( $s_e$ , $s_e$ %)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{e} - X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}}$	$(s_e \cdot 100) / \bar{X}$	0	0%
<i>Exactitud</i> ( $m_x$ , $m_x$ %)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2}{n-1}} = \sqrt{s_x^2 + \bar{e}^2}$	$(s_e \cdot 100) / \bar{X}$	0	0%
<i>Eficiencia</i> ( $E$ , $E$ %)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}_i)^2}$	$E \cdot 100$	1	100%

**Ubicación del área de estudio**

En la presente investigación se emplearon las ecuaciones resumidas en la Tabla 3, la misma que expresa la función matemática y autor (ecuaciones 1 y 2). Estas fueron utilizadas como base para desarrollar los modelos de diámetro-altura para la Balsa.

Dos variaciones del modelo 2 fueron probadas para obtener las ecuaciones 3 y 4 por los autores de la presente investigación. Con esta información se obtuvieron los parámetros de mejor ajuste para las características de diámetro-altura de la Balsa en la zona de estudio (Tabla 3).

**Tabla 3.** Funciones empleadas para el desarrollo de los modelos generales de diámetro-altura para la Balsa, en la región de estudio.

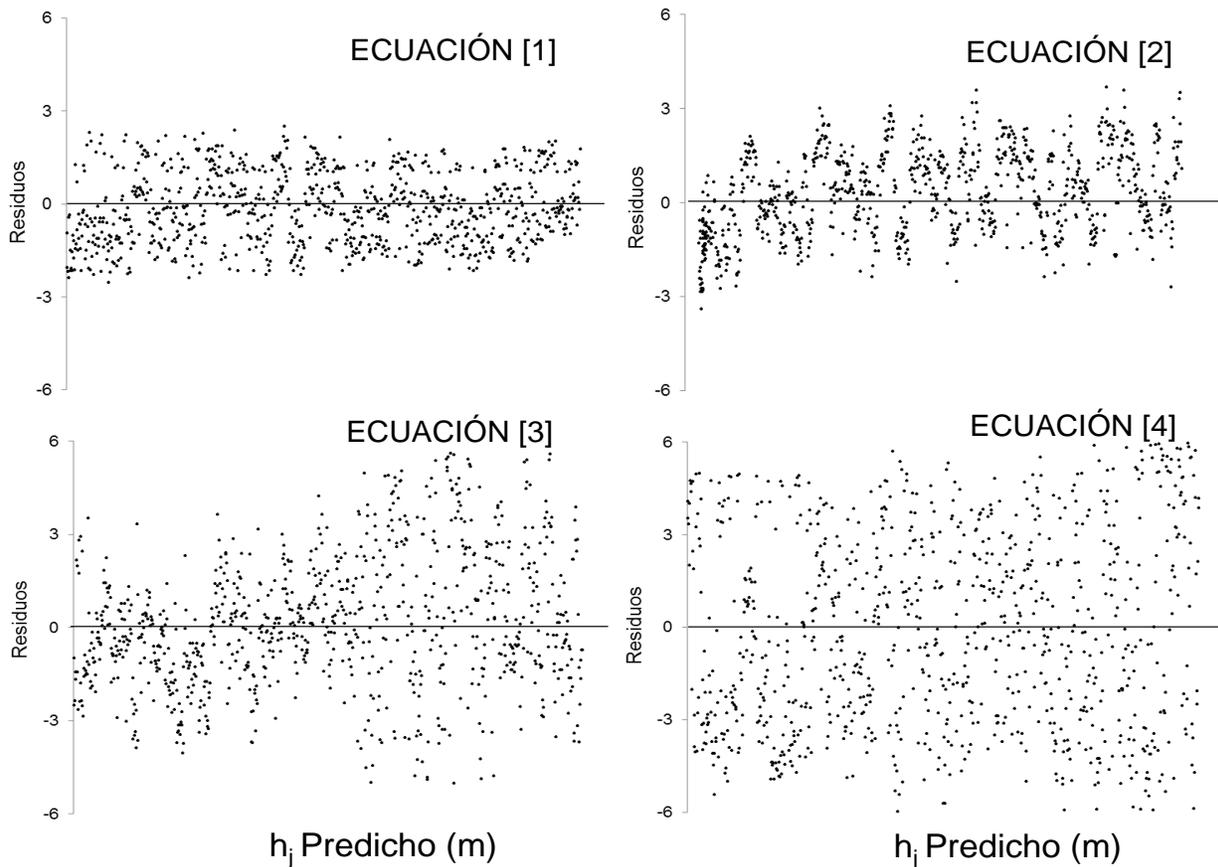
Función	Autor	Numeración
$h_j = \alpha_1 Ho \left( 1 - \alpha_2 e^{\frac{-\beta d_j}{D_g}} \right)^{\alpha_3}$	Pienaar (1991)	[1]
$h_j = 1,30 + \left( \alpha_1 + \alpha_2 Ho - \alpha_3 D_g \right) e^{\frac{-\beta}{d_j}}$	Mirkovich (1958)	[2]
$h_j = 1,30 + \left( \alpha_1 + \alpha_2 Ho - \alpha_3 D_g \right) e^{\frac{-\beta}{\sqrt{d_j}}}$	Modificaciones hechas por los Autores	[3]
$h_j = 1,30 + \left( \alpha_1 + \alpha_2 Ho - \alpha_3 D_g + \alpha_4 G \right) e^{\frac{-\beta}{\sqrt{d_j}}}$	Modificaciones hechas por los Autores	[4]

**RESULTADOS**

**Parametrización modelos diámetro-altura**

En la Figura 3 se presenta los residuos de las ecuaciones [1-4] en relación con los datos predichos por los modelos generales de

diámetro y altura. Es necesario resaltar que, en esta evaluación se utilizaron el primer grupo de datos descritos en la metodología. En la Figura 3 no existe una tendencia en la distribución de los residuos para las cuatro funciones empleadas.



**Figura 3.** Residuos de las ecuaciones [1-4] ploteados sobre los valores predichos, Provincia de Los Ríos, Fuente: Elaborado por los Autores, Fuente: Elaborado por autores.

Las estimaciones de los diferentes parámetros calculados y los criterios de evaluación de las modelos empleados para describir la relación general de diámetro-altura son presentados en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Criterios para la evaluación de las ecuaciones generales de diámetro y altura para Balsa.

Ecuación	Parámetro	Estimación	Distorsión Valor Ideal 0	Precisión Valor Ideal 0	Exactitud Valor Ideal 0	Eficiencia Valor Ideal 1
[1]	$\alpha_1$	1,0382	-0,31	0,97	1,02	0,96
	$\alpha_2$	0,3450				
	$\alpha_3$	0,2821				
	$\beta$	1,9812				
[2]	$\alpha_1$	1,0501	-0,04	1,38	1,38	0,94
	$\alpha_2$	1,0011				
	$\alpha_3$	0,1834				
	$\beta$	10,0139				

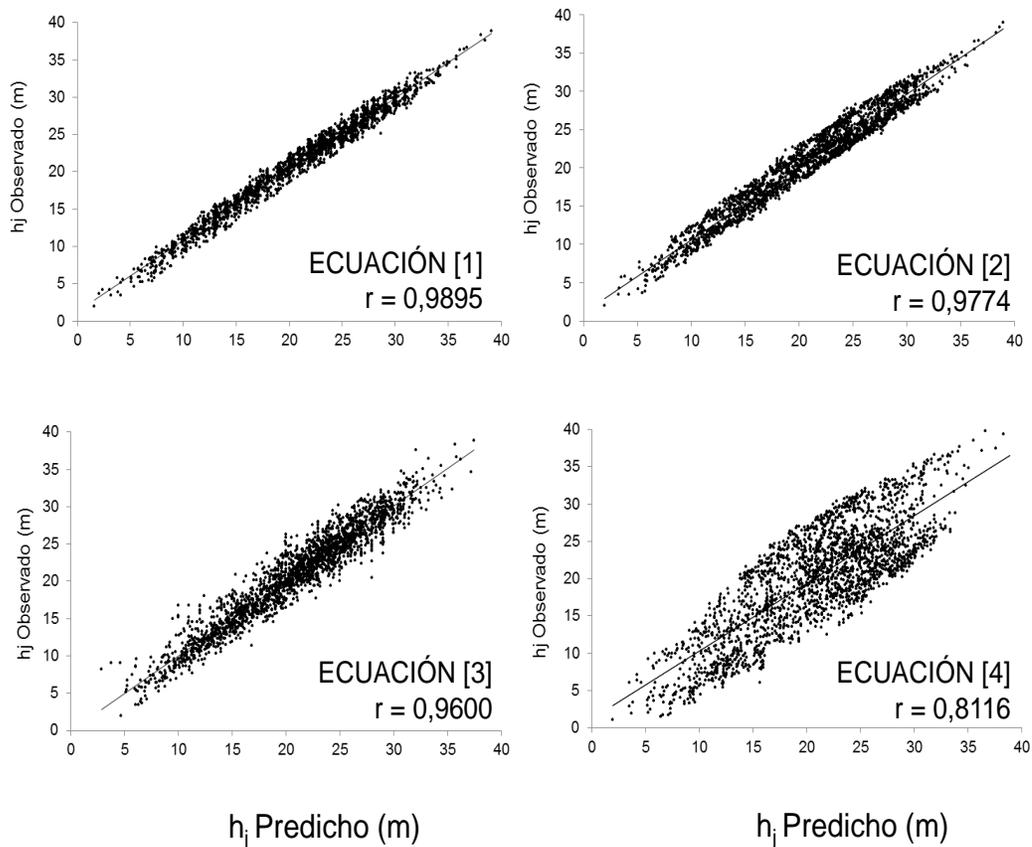
Continua...

[3]	$\alpha_1$	1,0521	-0,05	1,82	1,79	0,91
	$\alpha_2$	1,4999				
	$\alpha_3$	0,6791				
	$\beta$	5,0129				
[4]	$\alpha_1$	10,9000	-0,74	4,23	4,29	0,64
	$\alpha_2$	1,5981				
	$\alpha_3$	1,3333				
	$\alpha_4$	0,3782				
	$\beta$	12,9988				

### Validación de las ecuaciones diámetro-altura

Una vez que se ha obtenidos los parámetros de las cuatro ecuaciones generales de diámetro altura. El siguiente paso fue validar la información con el segundo set de datos independientes a la información para la

parametrización de las ecuaciones descritos en la metodología Tabla 1. En la Figura 4 se observan los datos predichos en confrontación con los observados se encuentran altamente correlacionados para las ecuaciones de la 1 a la 4.



**Figura 4.** Validación de ecuaciones [1-4] utilizando datos independientes (segundo grupo de datos), r = Coeficiente de correlación. Fuente: Elaborado por los Autores.

## DISCUSION

Como primer paso se probó el desempeño de dos ecuaciones generalizadas conocidas diámetro-altura, inicialmente la ecuación [1]

$$h_j = \alpha_1 Ho \left( 1 - \alpha_2 e^{\frac{-\beta d_j}{D_g}} \right)^{\alpha_3} \quad [1]$$

Esta ecuación fue derivada por Pienaar (1991) de la función de Richards para rodales de pino (*Pinus eliottii*) en el sureste de Estados Unidos (cp. Richards, 1959) y fueron adaptadas a los rodales de Balsa.

$$h_j = 1,30 + (\alpha_1 + \alpha_2 Ho^2 - \alpha_3 D_g) e^{\alpha_4}$$

En segundo paso, la ecuación [2], fue derivada por Mirkovich (1958) de la función de Schumacher para rodales de roble en Europa central (Michailoff, 1943; Schumacher, 1939). Igualmente, estas ecuaciones fueron aplicadas para las plantaciones de Balsa en la provincial de Los Ríos. La siguiente simbología fue empleada en las dos ecuaciones:  $h_j$  = altura del árbol  $j$  (m),  $d_j$  = árbol  $j$ 's diámetro a la altura del pecho (cm),  $Ho$  = Altura dominante (m) del rodal, el cual presentó el árbol  $j$ ,  $D_g$  = diámetro medio cuadrático de un rodal (cm),  $\alpha_1 \dots \alpha, \beta$  = parámetros a ser estimado y 1,3 = una constante comúnmente empleada, con la finalidad de evitar la predicción de alturas menores a 1,3 m, cuando  $d_j$  es muy pequeño. Debido a que las dos ecuaciones son intrínsecamente no lineales, la bondad de ajuste no-lineal fue requerida para la estimación de los parámetros de las ecuaciones propuestas (Draper y Smith, 1981). Los valores iniciales fiables para el inicio del procedimiento de estimación fueron

tomados de Hui y Gadow (1993), los cuales en un estudio previo probaron la bondad de ajuste de las ecuaciones [1] y [2] para *Cunninghamia lanceolata* en China. Un paso importante en la evaluación del ajuste de las ecuaciones es el análisis gráfico de los residuos con la finalidad de buscar dependencias o modelos que evidencien diferencias sistemáticas (Cañadas *et al.*, 2003).

Una técnica simple y eficaz es determinar la tendencia de los residuos (bias), basado en la determinación de regresión lineal de los residuos entre los valores observados y valores predichos (Soares *et al.*, 1995), como queda ilustrado en la Figura 3 (a) y (b) ambas ecuaciones mostraron únicamente una pequeña tendencia sistemática. Como siguiente paso se trató de mejorar la ecuación [2] una transformación de la raíz cuadrado de  $d_j$  se probó con la finalidad de obtener un nuevo modelo:

$$h_j = 1,30 + (\alpha_1 + \alpha_2 Ho^3 - \alpha_3 D_g) e^{\frac{\alpha_4}{\sqrt{d_j}}}$$

La dispersión de los residuos mostró la normalidad de los residuos Figura 3 (c). Tomando en cuenta que, un rodal con igual  $D_g$  puede tener diferente densidad es interesante preguntarse si el modelo propuesto por Schumacher puede ser mejorado con la incorporación de una variable adicional, la cual considere (a) la densidad de un rodal. Como el número de árboles por hectárea mostró una alta correlación con el diámetro medio cuadrático ( $D_g$ ) el área basal de un rodal  $G$  ( $m^2/ha$ ) fue incorporada con la finalidad de ver la bondad de ajuste, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$h_j = 1,30 + (\alpha_1 + \alpha_2 Ho^4 - \alpha_3 D_g + \alpha_4 G)$$

La dispersión de los residuos no mostró ninguna tendencia Figura 3 (d)

### **Validación**

De acuerdo a los valores estimados de Distorsión, Precisión Exactitud y Eficiencia mostrados para las ecuaciones [1] fueron cercanas a los valores ideales. De tal manera que la Eficiencia del modelo fue del 96% y fue la que menor valor de Exactitud mostró de 1,02. Seguida por la ecuación [2] Eficiencia de 94% y Exactitud de 1,38 y en tercer lugar la ecuación [3] Eficiencia de 91% y Exactitud de 1,79.

La validación de las cuatro ecuaciones fue evaluada prediciendo la altura individual de los árboles de la segunda secuencia de datos (no utilizados para el ajuste de las ecuaciones). En la Figura 4<sub>a,b,c,d</sub> se puede observar los valores predichos en confrontación con los valores observados. El coeficiente de correlación asociado entre los valores observados y predichos puede ser tomado como otro criterio de evaluación de las ecuaciones ajustadas. Una fuerte correlación ( $r = 0,9895$ ) fue observada para la ecuación [1] mientras que, para la ecuación [4] fue menor ( $r = 0,8116$ ). La diferencia entre los coeficientes de regresión de las ecuaciones fueron pequeñas [1, 2, 3] en tanto la ecuación [4] fue grande la diferencia.

### **CONCLUSIONES**

Los residuos obtenidos para las cuatro ecuaciones generalizadas de la relación diámetro-altura desarrolladas son probados en esta investigación, las cuales no muestran severas violaciones de los fundamentos estadísticos. De acuerdo a la validación metodológica, la ecuación [1] es la de mejor ajuste para predecir fiablemente la altura individual de la Balsa en la provincia de Los

Ríos (eficiencia de 96%), seguida por la ecuación [2] con una eficiencia del 94% y por la ecuación [3] que presenta el 91%. De estas, la ecuación [1] muestra una aceptable bondad de ajuste, debido a que los parámetros de Distorsión, Precisión y Exactitud son cercanos a los valores ideales (Cero) y puede ser empleada para describir la relación general de diámetro-altura (*Ochroma pyramidale*) en las tierras bajas en la Costa del Ecuador. Mientras que, la ecuación [4] no debe ser aplicada, ya que requiere de la determinación de tres variables independientes, demandando mayor tiempo de levantamiento de una variable adicional y muestra una eficiencia del 64% y un coeficiente de correlación de  $r = 0,8116$ .

### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de esta contribución agradecen a la Organización Internacional de las Maderas Tropicales (ITTO), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) por la disposición de fondos para el levantamiento de información de campo, base para los resultados de esta investigación.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Banco Central del Ecuador. (2012) Comercio Exterior, 2012. Quito: Ecuador. Recuperado en: [http://www.portal.bce.fin.ec/vto\\_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp](http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp)
- Cañadas, A., Rade, D., Domínguez, J. M., Murillo, I. & Molina, C. (2016). *Modelación forestal como Innovación tecnológica para el manejo silvicultural y aprovechamiento económico de la Balsa, Región Costa-Ecuador*. Ed. Abya-Yala, Quito (Ecuador).

- Cañadas, Á., Vilčko, F., Rade, D., Zambrano, C., & Molina, C. (2014). *Hacia una descripción de fuste para el Laurel Cordia alliodora en sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador*. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(1), 24-31.
- Cañadas, A., Rade, D., Zambrano, C., Molina, C., & Arce, L. (2013). *Evaluación y manejo de fuentes semilleras de Teca en la Estación Experimental Tropical Pichilingue-Ecuador*. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 5 (1), 64-75.
- Cañadas, A., & Rade, D. (2013). *Bases económicas y desarrollo sostenible como plataforma para la elaboración de proyectos sostenibles*. Ed. UTN, Ibarra, (Ecuador).
- Cañadas, A., Korol, M., Zambrano, C., & Camacho, B. (2012). *Modelos descriptivos de corona para Laurel (Cordia alliodora) bajo sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador*. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 4(2), 39-46.
- Cañadas, A., & Vera, L. (2011). *Forestería tropical al final del camino? Revisión del manejo sostenible de bosques nativos Tropicales*. *Revista ESPAMCIENCIA*, 2, 27-36.
- Cañadas, A. (2007). *Volumen y perfil de fuste para Cordia alliodora en sistemas agroforestales del bosque protector Sumaco*. *Bosque Latitud Cero*, 3, 15-20.
- Cañadas, Á. (2005). *Providing information about natural resources as a base to support the decentralization of the forest sector in Canton Loreto-Ecuador* (Doctoral dissertation, Forschungszentrum Waldökosysteme).
- Cañadas, A., Vilčko, F., & Gadow, K. v., (2003). *Management of Laurel (Cordia alliodora) within agroforestry system in the Canton Loreto, Ecuador*. p. 288. In: A. Wollny et al., (ed.) *Technological and Institutional Innovations for Sustainable Rural Development*. Deutscher Tropentag, Göttingen, (Germany).
- Cañadas, L. (1983). *El mapa bioclimático y ecológico del Ecuador*. Editores Asociados, Quito (Ecuador).
- Cruz-Leyva, I. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., & Santos-Posadas, H. M. D. L. (2010). *Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de Pinus patula y P. teocote en el ejido Atopixco, Hidalgo*. *Madera y Bosques*, 16(3), 75-97.
- Draper, N. R., Smith, H., & Pownell, E. (1981). *Applied regression analysis* (Vol. 3). New York: Wiley.
- Fletcher, M. I. (1951). *Balsa-production and utilization*. *Economic Botany*, 5(2), 107-125.
- Gadow v, K., & Hui, G. (1990). *Modelling forest development* (Vol. 57). Springer Science & Business Media.
- Gadow v, K., Sánchez Orois, S., & Aguirre Calderón, O. A. (2004). *Manejo forestal con bases científicas*. *Madera y Bosques*, 10(2), 3-16.
- Hui, G. Y., & Gadow, K. v. (1993). *Zur Entwicklung von Einheitshöhenkurven am Beispiel der Baumart Cunninghamia lanceolata*. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 164(12), 218-220.
- Jayaraman, K., & Lappi, J. (2001). *Estimation of height-diameter curves through multilevel models with special reference to even-aged teak stands*. *Forest Ecology and Management*, 142(1), 155-162.
- Lamprecht, H. (1989). *Silviculture in the tropics: tropical forest ecosystems and their tree species: possibilities and methods for their long-term utilization*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.
- Little, E. L., & Dixon, R. (1969). *Árboles comunes de la Provincia de Esmeraldas*:

- estudio de preinversión para el desarrollo forestal noroccidente*. Informe Final. Roma, Italia, FAO, 4, 53.
- López Sánchez, C., Gorgoso Varela, J., Castedo Dorado, F., Rojo Alboreca, A., Rodríguez Soalleiro, R., Álvarez González, J., & Sánchez Rodríguez, F. (2003). *A height-diameter model for Pinus radiata D. Don in Galicia (Northwest Spain)*. *Annals of Forest Science*, 60, 237-245.
- Michailoff, I. (1943). *Zahlenmäßiges verfahren für die Ausführung der bestandeshöhenkurven*. *Forstwissenschaftliches Centralblatt und Tharandter Forstliches Jahrbuch*, 6, 273-279.
- Mirkovich, D. 1958. *Normale visinske krive za chrast kinak i bukvu v NR Srbiji*. Zagreb. Glasnik Sumarskog Fakulteta.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2005). *Evaluación y actualización de las estrategias de desarrollo forestal sustentable del ecuador, estrategia para el desarrollo forestal sustentable del Ecuador*. Recuperado de: <http://web.ambiente.gob.ec/sites/default/files/archivos/PUBLICACIONES/FORESTAL/edfsi.pdf>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. (2008). *Plan de reactivación agropecuario 2007-2011*. Recuperado de: <http://es.scribd.com/doc/72871785/Plan-Nacional-de-Reactivacion-Agropecuaria-2008-2011>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. (2016). *La política agropecuaria ecuatoriana. Hacia el desarrollo territorial rural sustentable 2015-2025 Parte I*. MAGAP, Quito, (Ecuador).
- Michailoff, J. L. (1943). *Zahlenmässiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven*. Sonderdr. Fw. Cbl. u. Tharandter Forstl. Jb., 6, 273-279.
- Mirkovich, J. L. (1958). *Normale visinske krive za chrast kitnak i bukvu v NR Srbiji*. Zagreb. Glasnik Sumarskog Fakulteta, 13, 43-56.
- Pienaar, L. V., Harrison, W. M., & Rheney, J. W. (1991). *PMRC yield prediction system for slash pine plantations in the Atlantic coast flatwoods*. PMRC Techn. Rep., Athens.
- Richards, F. J. (1959). *A flexible growth function for empirical use*. *Journal of Experimental Botany*, 10(2), 290-301.
- Soares, P., Tomé, M., Skovsgaard, J. P., & Vanclay, J. K. (1995). *Evaluating a growth model for forest management using continuous forest inventory data*. *Forest Ecology and Management*, 71, 251-265.
- Soares, P., & Tomé, M. (2002). *Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal*. *Forest Ecology and Management*, 166, 99-109.
- Sas Institute. (1990). *SAS/STAT user's guide, version 8 (Vol. 2)*. Cary, NC: SAS institute.
- Schumacher, F. X. (1939). *A new growth curve and its application to timber yield studies*. *Journal Forestry*, 37, 819-820.
- Trincado, G., & Leal, C. (2006). *Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (Pinus radiata)*. *Bosque*, 27(1), 23-34.
- Vargas-Larreta, B., Corrales-Rivas, J., Aguirre-Calderón, O., & Nagel, J. (2010). *Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del Simulador BWINPro 7 Simulator*. *Madera y Bosques*, 16(4), 81-104.