

# Ecuación de volumen total para *Populus deltoides* de plantaciones del Bajo Delta del Paraná

FERNÁNDEZ TSCHIEDER, E.<sup>1</sup>; FASSOLA, H. E.<sup>2</sup>; GARCÍA CORTÉS, M.<sup>3</sup>

## RESUMEN

Las ecuaciones de volumen son una herramienta eficaz para la estimación del volumen del árbol individual, información que es esencial para la planificación y la gestión de rodales forestales. Las ecuaciones de volumen para *Populus* spp. (álamo) en el Delta del Paraná son escasas y no existen para clones ampliamente difundidos en la actualidad. El objetivo de este trabajo fue ajustar una ecuación estándar de volumen total, con y sin corteza, para los clones 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' de *Populus deltoides*. Se trabajó con árboles de plantaciones localizadas en campos protegidos contra las inundaciones por diques perimetrales de la región Islas del Río Carabelas. Se evaluó la capacidad de predicción de ecuaciones de volumen publicadas para la especie y se ajustaron seis ecuaciones de volumen, mediante técnicas de regresión lineal y no lineal ponderada, que fueron analizadas estadística y gráficamente. La estimación del volumen de los clones "australianos" a partir de modelos publicados resultó poco precisa. Todas las ecuaciones ajustadas presentaron muy buenos estadísticos de ajuste. Se seleccionó el modelo de Schumacher y Hall para la estimación del volumen total con y sin corteza. El rango de aplicación de los modelos va desde 11,1 cm hasta 55,1 cm de diámetro a 1,3 m de altura y desde 11,9 m hasta 37,5 m de altura total. El error medio obtenido en la autovalidación resultó -1,2% (0,001 m<sup>3</sup>) para el volumen total con corteza y -1,3% (0,000 m<sup>3</sup>) para el volumen total sin corteza, mientras que el error absoluto promedio fue 6,8% (0,041 m<sup>3</sup>) y 6,6% (0,034 m<sup>3</sup>) para el volumen total con y sin corteza, respectivamente.

**Palabras clave:** tabla de volumen, álamo, clon Australiano 129/60, clon Australiano 106/60, manejo forestal.

## ABSTRACT

Volume equations are a useful tool for individual tree volume estimate, which is essential information for forest stand planning and management. Volume equations for poplar in the delta of the Paraná River are scarce and do not exist for very widespread clones currently. The purpose of this work was to fit a standard total volume equation outside and inside bark for the clones 'Australiano 129/60' and 'Australiano 106/60' of *Populus deltoides*. The trees were sampled in plantations protected against floods by a dike located in the region Carabelas River Island. The prediction capacity of published volume equations for the species was evaluated and six volume equations were fitted by weighted linear and no linear regression, which were analyzed statistically and graphically. The "australianos" clones volume estimate from published equations resulted inaccurate. All the equations presented very good fit statistics. The Schumacher and Hall model was selected for the estimate of the total

1 INTA, EEA Delta del Paraná, cc 14, CP 2804 Campana, Buenos Aires, Argentina. Tel./fax: 54-03489-460075/460076. Correo electrónico: ezfernandez@correo.inta.gov.ar

2 INTA, EEA Montecarlo, Av. Libertador 2472. CP 3384. Montecarlo, Misiones, Argentina. Tel./fax: 54-03751-480057/480512. Correo electrónico: hfassola@montecarlo.inta.gov.ar

3 INTA, EEA Delta del Paraná, cc 14, CP 2804 Campana, Buenos Aires, Argentina. Tel./fax: 54-03489-460075/460076. Correo electrónico: mgarciacortes@correo.inta.gov.ar

Recibido 23 de diciembre de 2010 // Aceptado 09 de junio de 2011 // Publicado online 06 de julio de 2011

outside and inside bark volume. The models applicability ranges from 11.1 to 55.1 cm in diameter at 1.3 m height and from 11.9 to 37.5 m in total height. The average error obtained at the self-validation was -1.2% ( $0.001 \text{ m}^3$ ) to the outside bark volume and -1.3% ( $0.000 \text{ m}^3$ ) to the inside bark volume, while the average absolute error was 6.8% ( $0.041 \text{ m}^3$ ) and 6.6% ( $0.034 \text{ m}^3$ ) to the outside bark and inside bark volume respectively.

**Keywords:** volume tables, poplar, clone Australiano 129/60, clone Australiano 106/60, forest management.

## INTRODUCCIÓN

En la planificación y la gestión de rodales forestales es vital la posibilidad de contar con una herramienta simple que permita la obtención de valores precisos sobre la producción y productividad de madera (Finger, 1992; Prodan *et al.*, 1997). En general, el volumen de los árboles se estima utilizando ecuaciones de volumen que permiten estimarlo a partir de mediciones sencillas como el diámetro a 1,3 m de altura ( $d$ ), altura total ( $h$ ) o altura del fuste hasta su bifurcación y alguna expresión de la forma ( $f$ ) (Clutter *et al.*, 1983; Finger, 1992; Friedl *et al.*, 1991; Prodan *et al.*, 1997). Estas ecuaciones pueden ser *ecuaciones locales* (donde el volumen está en función de una sola variable, como el  $d$ ) o *estándares* (donde el volumen está en función de dos o más variables, usualmente el  $d$  y  $h$ ).

La región del Delta del Paraná constituye la tercera región forestal de Argentina y la principal región forestada con sauces (*Salix* spp.) y álamos (*Populus* spp.) del país (SAGPyA 2001). Sin embargo, a pesar de la importancia de la actividad en la región (Borodowski, 2006), los antecedentes de desarrollo de ecuaciones de volumen para álamo son escasos. Denegri y Marlats (1991) y Suárez y García Volonté (1993) ajustaron ecuaciones de volumen para distintos clones de *Populus deltoides* en el delta Bonaerense. Pece *et al.* (2002) realizaron un trabajo similar para *P. deltoides* y *P. canadensis* en la zona de riego de Santiago del Estero. Para la estimación de los parámetros de las ecuaciones, ninguno de estos trabajos han utilizado los clones 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' de *P. deltoides* ampliamente difundidos en el núcleo forestal del delta Bonaerense.

Este trabajo tuvo como principal objetivo aportar ecuaciones que, a partir de mediciones sencillas (diámetro y altura total), permitan estimar el volumen de individuos de *P. deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' para la zona Islas del Río Carabelas del Delta Bonaerense. En primer lugar se evaluó la capacidad de predicción de las ecuaciones de volumen ajustadas con otros clones y para otras regiones. En segundo lugar, se ajustaron ecuaciones de volumen con datos de los clones 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' para la zona Islas del Río Carabelas del delta Bonaerense. De esta manera, se pretende brindar herramientas que permitan cuantificar el volumen en las plantaciones de álamo para un manejo más objetivo de las mismas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio y base de datos

El estudio se llevó a cabo en la zona del delta Bonaerense localmente denominada "núcleo forestal". Esta zona se corresponde con la subunidad A2 "Islas del Río Carabelas" (Kandus, 1997) del delta del Río Paraná, y es donde se concentran las forestaciones con álamo bajo manejo intensivo.

La base de datos estuvo compuesta por árboles de *P. deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' ("australianos" de aquí en adelante) provenientes de plantaciones localizadas en campos protegidos contra inundaciones por diques perimetrales. Estos clones se consideraron como una unidad sistemática debido a que la identificación a campo entre ambos resulta dificultosa. En total se seleccionaron 120 árboles distribuidos entre 11,1 y 55,1 cm de diámetro a 1,3 m de altura (media: 27,3 cm) y de 11,9 a 37,5 m de altura (media: 24,5 m) (tabla 1). En cada árbol seleccionado se midió el diámetro a 1,30 m de altura ( $d$ ), la altura total ( $h$ ) y se estimó volumen total del fuste, con y sin corteza ( $V_{tcc}$ ,  $V_{tsc}$  respectivamente), sin considerar el volumen del tocón. La altura total se obtuvo como la suma del largo del fuste y la altura del tocón de cada individuo (altura promedio: 20 cm, mín.: 5 cm y máx.: 40 cm).

Los volúmenes con y sin corteza se obtuvieron como la sumatoria del volumen contenido en secciones del fuste incluido el ápice. Se apeó y trozó cada árbol en secciones de 2,20 ó 2,68 m largo según el destino industrial (chipeado, aserrado o debobinado) de la misma. En cada individuo se midieron dos diámetros cruzados con y sin corteza a las alturas de 0,30, 0,7, 1,0, 1,3, 2,5 ó 3 m desde suelo y luego cada 2,2 ó 2,68 m hasta alcanzar un diámetro con corteza de 5 cm y la distancia desde este punto hasta el ápice del árbol. El volumen de cada sección se calculó con la fórmula de Smalian hasta los 5 cm de diámetro con corteza y se aplicó la fórmula del cono para el ápice (Prodan *et al.*, 1997).

### Validación de modelos ajustados por otros autores

Se evaluó el comportamiento de las ecuaciones de volumen ajustadas por Denegri y Marlats (1991), Suárez y García Volonté (1993) y Pece *et al.* (2002). Para cada modelo

Clases de diámetro (cm)	Clases de altura total (m)										Total
	10-13	13-16	16-19	19-22	22-25	25-28	28-31	31-34	34-37	37-40	
10-15	2	1									3
15-20	1		5	8	1						15
20-25			3	5	20	7	1				36
25-30				3	19	7	2				31
30-35					5	7	4				16
35-40					2	1	6	3	1		13
40-45								1			1
45-50									1	1	2
50-55									2		2
55-60									1		1
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>47</b>	<b>22</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>120</b>

**Tabla 1.** Distribución por clases diamétrica y altura total de la muestra de árboles de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' utilizada para el ajuste de ecuaciones de volumen.

se calculó el error promedio ( $E = \sum (y_i - \hat{y}_i) / n$ ), error absoluto promedio ( $\overline{EA} = \sum |y_i - \hat{y}_i| / n$ ), error porcentual promedio ( $E\% = 100 * \sum (y_i - \hat{y}_i) / y_i$ ) y el error absoluto porcentual promedio ( $EA\% = 100 * \sum |y_i - \hat{y}_i| / y_i$ ) donde  $y_i$ : volumen observado del árbol  $i$  ( $m^3$ ),  $\hat{y}_i$ : volumen estimado del árbol  $i$  ( $m^3$ ),  $n$ : número de observaciones (Soares *et al.*, 1995; Vancley, 1994). Además, con los valores de volumen observados y estimados se ajustó el modelo lineal  $y_i = a + b \cdot \hat{y}_i$  se realizó la prueba de F simultánea para la hipótesis intercepto=0 y pendiente=1 (Huang *et al.*, 2003; Piñeiro *et al.*, 2008).

### Modelos ajustados

En el presente trabajo se ajustaron seis modelos clásicos de la literatura forestal del tipo estándar o de doble entrada (Clutter *et al.*, 1983; Prodan *et al.*, 1997) (tabla 2). El ajuste de los modelos se realizó mediante técnicas de regresión lineal, lineal múltiple y no lineal según la expresión matemática de cada modelo. En primer lugar, los ajustes se realizaron sin ponderación, sin embargo, debido a que se observó un aumento de la varianza a lo largo del rango dia-

Nº del modelo	Expresión matemática del modelo	Nombre del modelo
1	$v = b_1 d^2 h$	Factor de forma constante
2	$v = b_0 + b_1 d^2 h$	Variable combinada
3	$v = b_0 + b_1 d^2 + b_2 h + b_3 d^2 h$	Variable combinada generalizada
4	$v = b_1 d^{b_2} h^{b_3}$	Logarítmico o Schumacher y Hall
5	$v = b_0 + b_1 d^{b_2} h^{b_3}$	Logarítmica generalizada
6	$v = \frac{d^2}{(b_0 + b_1 h^{-1})}$	Variable transformada de Honer

**Tabla 2.** Ecuaciones de volumen utilizadas para la estimación del volumen total de árboles de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' de plantaciones del delta del Paraná.

d: diámetro a 1,30 m de altura (m); h: altura total (m);  $b_j$ : parámetros de las ecuaciones de volumen.

métrico se utilizó la metodología de regresión ponderada para el ajuste de los modelos (Cailliez, 1980). Se utilizó la inversa de la variable  $d^2h$  como factor de ponderación (Cailliez, 1980). Con ésta variable de ponderación se obtuvieron mejores ajustes (menor cuadrado medio del error) en comparación a las variables  $1/d$ ,  $1/d^2$  y  $1/dh$  como factor de ponderación. En el caso de los modelos no lineales el método de estimación utilizado fue el algoritmo de Gauss-Newton y los valores iniciales en el proceso de ajuste fueron:  $b_0=0$ ;  $b_1=0,2$ ;  $b_2=2$  y  $b_3=1$ , excepto el modelo 6 para el cual se utilizaron los valores:  $b_0=0$  y  $b_1=3$ . En primer lugar, las ecuaciones de volumen fueron ajustadas utilizando los datos de volumen total con corteza. De estos ajustes se seleccionó el modelo de mejor comportamiento estadístico para ser ajustado con los datos volumen total sin corteza.

**Evaluación estadística y selección de la ecuación de volumen**

La evaluación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza (homocedasticidad) se realizó mediante el análisis gráfico de los residuos de cada modelo. El supuesto de normalidad se evaluó a partir de un gráfico cuantil-cuantil (Q-Q plot), usando como distribución teórica la Normal, y el de homocedasticidad a partir un gráfico de residuos estudentizados vs. valores estimados (*r.e.* vs. *v.e.*) (Myers, 1986).

La evaluación de la bondad de ajuste de los modelos se basó en la obtención del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_a$ ), cuadrado medio residual (CMR) y el error estándar de la estimación en porcentaje ( $S_{yx}\%$ ). Además, se tuvo en cuenta el error estándar de las estimaciones de los parámetros ( $EE_i$ ), la significancia de los mismos ( $\alpha=0,05$ ) y el número de parámetros del modelo (principio de simplicidad) (Finger, 1992; Myers, 1986). Según estos criterios, se busca que el  $R^2_a$  sea lo más elevado posible, y el CMR,  $S_{yx}\%$ ,  $EE_i$  y el número de parámetros sean lo menores posible.

La evaluación de la capacidad predictiva de las ecuaciones de volumen ajustadas se llevó a cabo utilizando la muestra con la cual se realizaron los ajustes (autovalidación). Se calcularon el error promedio ( $\bar{E}$ ), error absoluto promedio ( $\bar{EA}$ ), error porcentual promedio ( $\bar{E}\%$ ) y el error absoluto porcentual promedio ( $\bar{EA}\%$ ). Además, se evaluó el error promedio porcentual por clases diamétricas (Soares *et al.*, 1995; Vanclay, 1994). Según estos criterios, un modelo será mejor que otro si presenta menor valor de  $\bar{E}$  (sin considerar el signo) y  $\bar{EA}$  expresados en unidades o porcentaje y una distribución uniforme del  $\bar{E}\%$  a lo largo de las clases diamétricas.

La evaluación de la capacidad predictiva de las ecuaciones de volumen ajustadas se llevó a cabo utilizando la muestra con la cual se realizaron los ajustes (autovalidación). Se calcularon el error promedio ( $\bar{E}$ ), error absoluto promedio ( $\bar{EA}$ ), error porcentual promedio ( $\bar{E}\%$ ) y el error absoluto porcentual promedio ( $\bar{EA}\%$ ). Además, se evaluó el error promedio porcentual por clases diamétricas (Soares *et al.*, 1995; Vanclay, 1994). Según estos criterios, un modelo será mejor que otro si presenta menor valor de  $\bar{E}$  (sin considerar el signo) y  $\bar{EA}$  expresados en unidades o porcentaje y una distribución uniforme del  $\bar{E}\%$  a lo largo de las clases diamétricas.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Validación de modelos ajustados por otros autores**

Las ecuaciones de volumen ajustadas por otros autores presentaron errores porcentuales promedio que variaron entre 10 y 18%, y en valor absoluto entre 15% y 20% (tabla 3). En general, los modelos ajustados para el Delta del Paraná (Denegri y Marlats, 1991; Suárez y García Volonté, 1993) mostraron errores menores que el modelo ajustado para Santiago del Estero (Pece *et al.*, 2002). El modelo ajustado por Pece *et al.* (2002) y Denegri y Marlats (1991) subestimaron el volumen total con corteza, mientras que el modelo ajustado por Suárez y García Volonté (1993) sobreestimó el volumen (tabla 3). En los tres casos se rechazó la hipótesis intercepto=0 y pendiente=1 (prueba de

Fuente	$\bar{E}$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{E}\%$	$\bar{EA}$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{EA}\%$	p-valor prueba de F simultánea*
Pece et al. (2002)	0,092	17,6	0,104	19,7	<0,0001
Denegri y Marlats (1991)	0,104	10,1	0,116	15,8	<0,0001
Suárez y García Volonté (1993)	-0,087	-14,6	0,089	15,0	<0,0001

**Tabla 3.** Validación de ecuaciones de volumen con corteza ajustadas para *Populus* spp. por otros autores (Denegri y Marlats, 1991; Suárez y García Volonté, 1993) para la estimación del volumen con corteza de individuos de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' de plantaciones del Delta del Paraná.

\*Prueba de F simultánea para la hipótesis intercepto=0 y pendiente=1 del modelo lineal  $y_i = a + b \cdot \hat{y}_i$  donde  $y_i$ : volumen observado del árbol  $i$  (m<sup>3</sup>),  $\hat{y}_i$ : volumen estimado del árbol  $i$  (m<sup>3</sup>).  $\bar{E}$ : error promedio;  $\bar{E}\%$  error porcentual promedio;  $\bar{EA}$  error absoluto promedio y  $\bar{EA}\%$  el error absoluto porcentual promedio.

F simultanea) (tabla 3). La magnitud de los errores observados y las pruebas estadísticas muestran que la estimación del volumen de los clones "australianos" a partir de los modelos anteriores será poco precisa.

### Modelos ajustados

En general las variables predictoras del volumen resultaron significativas. Sin embargo, el parámetro  $b_1$  del modelo 3 y  $b_0$  del modelo 5 resultaron no significativos, por lo que fueron eliminados de cada modelo. Por lo tanto, el modelo 3 fue reajustado sin la variable predictora  $d^2$  (modelo 3'), y el modelo 5 fue descartado del análisis ya que sin el parámetro  $b_0$  es idéntico al modelo 4 (tabla 4). En la evaluación gráfica de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza (figura 1) no se detectaron evidencias que hicieran suponer un incumplimiento de los supuestos.

Los modelos obtenidos permiten estimar el volumen total del fuste con corteza con un grado de precisión muy similar. Las diferencias observadas en los estadísticos de bondad de ajuste entre los modelos resultaron mínimas, siendo el modelo 4 levemente superior al resto. El CMR varió entre 0,001 y 0,002, el  $R^2_a$  entre 98,9 y 97,7% y el  $S_{yx}\%$  entre 5,7 y 7% (tabla 5, estadísticos de ajuste). Por otro lado, al igual que los estadísticos de ajuste, los indicadores de autovalidación de las ecuaciones fueron muy similares y, nue-

vamente, el modelo 4 presentó una leve superioridad. El valor  $\bar{E}$  varió entre 0,000 y 0,001 m<sup>3</sup>, el  $\bar{E}\%$  entre -0,9 y 2,1%, el  $\bar{EA}$  entre 0,041 y 0,054 m<sup>3</sup> y el  $\bar{EA}\%$  entre 6,8 y 8,6%. En términos absolutos ( $\bar{E}$ ) todos los modelos superestimarón el volumen, mientras que en términos relativos ( $\bar{E}\%$ ) únicamente el modelo 1 (tabla 5, indicadores de autovalidación).

Si bien todos los modelos permiten estimar con similar precisión el volumen total con corteza (tabla 5), el análisis del error porcentual promedio ( $\bar{E}\%$ ) por clases diamétricas mostró que algunos de ellos tuvieron errores de importancia en determinadas clases diamétricas (figura 2). En la clase diamétrica menor, los modelos 2 y 3' superaron el 20 % de  $\bar{E}\%$  y el modelo 6 tuvo un  $\bar{E}\%$  de 9%. Asimismo, los modelos 1 y 2 presentaron un  $\bar{E}\%$  mayor al 10% en la clase diamétrica mayor. En cambio, el modelo 4 no superó el 6% de  $\bar{E}\%$  y mostró un comportamiento estable a lo largo de todas las clases diamétricas.

Con base en los resultados obtenidos se seleccionó al modelo de Schumacher y Hall (modelo 4) para ser ajustado con los datos de volumen total sin corteza ( $V_{tsc}$ ). Los parámetros obtenidos para el modelo de  $V_{tsc}$  fueron:  $b_1$ : 0,06020;  $b_2$ : 1,67846 y  $b_3$ : 1,29960. Los estadísticos de bondad de ajuste fueron: CMR: 0,001;  $R^2_a$ : 98,4 % y  $S_{yx}\%$ : 5,5%, mientras que los indicadores de autovalidación resultaron:  $\bar{E}$  0,000 m<sup>3</sup>,

Nº del modelo	Número de Parámetros	Parámetro			
		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
1	1	-	0,27108 <sup>s</sup> (0,00257)	-	-
2	2	0,02252 <sup>s</sup> (0,00603)	0,26078 <sup>s</sup> (0,00368)	-	-
3	4	-0,08308 <sup>s</sup> (0,02026)	0,14029 <sup>ns</sup> (0,62460)	0,00662 <sup>s</sup> (0,00121)	0,23991 <sup>s</sup> (0,01837)
3'	3	-0,08410 <sup>s</sup> (0,01967)	-	0,00655 <sup>s</sup> (0,00116)	0,23597 <sup>s</sup> (0,00549)
4	3	-	0,06263 <sup>s</sup> (0,02300)	1,63496 <sup>s</sup> (0,06004)	1,31769 <sup>s</sup> (0,09012)
5	4	-0,01810 <sup>ns</sup> (0,01026)	0,07812 <sup>s</sup> (0,02893)	1,60567 <sup>s</sup> (0,05965)	1,24983 <sup>s</sup> (0,09358)
6	2	0,02877 <sup>s</sup> (0,00627)	2,89250 <sup>s</sup> (0,17461)	-	-

**Tabla 4.** Número de parámetros, parámetros estimados, significancia estadística y error estándar (entre paréntesis) de los parámetros de las ecuaciones de volumen total con corteza ajustadas para *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' de plantaciones del Delta del Paraná.

$b_i$ : parámetros del modelo; s=significativo, parámetros que fueron significativamente diferentes de cero ( $\alpha=0,05$ ; p-valor<0,05); ns=no significativo, parámetros que no fueron significativamente diferentes de cero ( $\alpha=0,05$ ; p-valor>0,05). Entre paréntesis se indica el error estándar de las estimaciones de los parámetros.

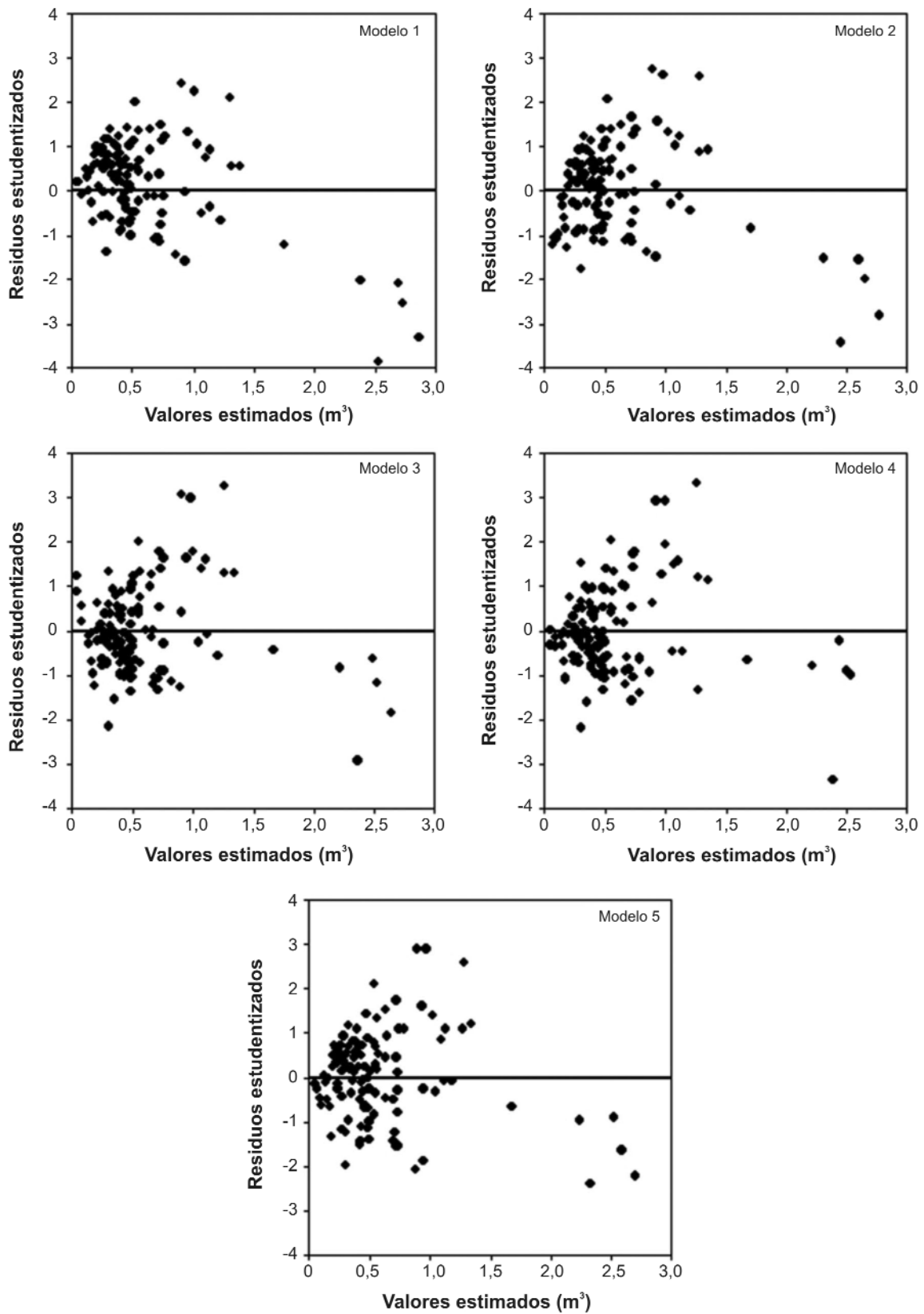
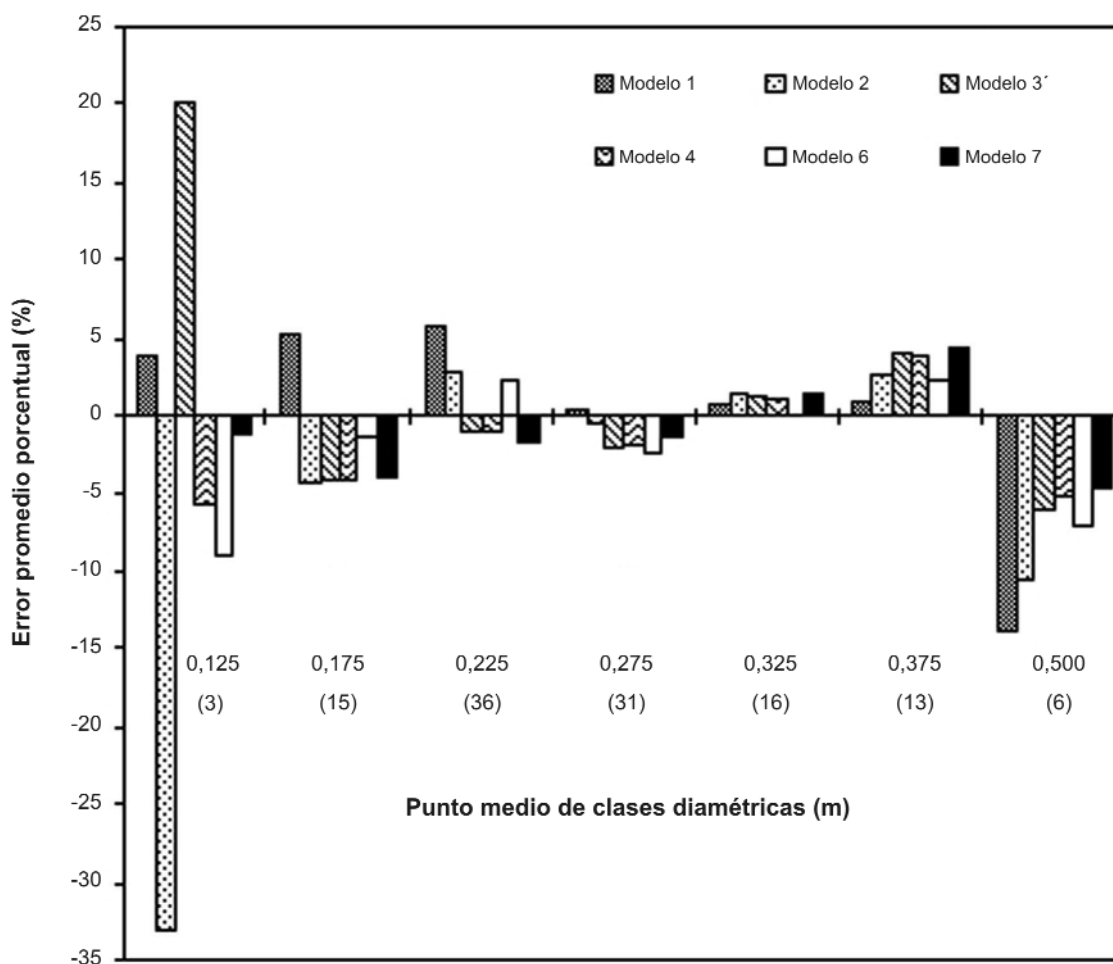


Figura 1. Relación entre los residuos estudentizados y valores estimados de volumen total (m³) a partir de las ecuaciones de volumen ajustadas.

Nº del modelo	Indicadores de Ajuste (n=120)			Indicadores de Autovalidación (n=120)			
	CMR	R <sup>2</sup> <sub>a</sub>	S <sub>yx</sub> %	$\bar{E}$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{E}$ %	$\bar{EA}$ (m <sup>3</sup> )	$\bar{EA}$ %
1	0,002	98,9	7,0	0,001	2,1	0,054	8,3
2	0,002	97,7	6,7	0,000	-0,7	0,050	8,6
3'	0,001	98,2	5,9	0,001	-0,5	0,043	7,4
4	0,001	98,3	5,7	0,001	-1,2	0,041	6,8
6	0,001	97,9	6,4	0,001	-0,5	0,047	8,1

**Tabla 5.** Estadísticos de bondad de ajuste e indicadores de autovalidación de las ecuaciones de volumen total con corteza ajustadas para *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' en el Delta del Paraná.

n: tamaño muestral; CMR: cuadrado medio residual; R<sup>2</sup><sub>a</sub>: coeficiente de determinación ajustado, S<sub>yx</sub>%: error estándar de la estimación en porcentaje;  $\bar{E}$ : error promedio;  $\bar{E}$ %: error porcentual promedio;  $\bar{EA}$ : error absoluto promedio y  $\bar{EA}$ %: el error absoluto porcentual promedio.



**Figura 2.** Error porcentual promedio por clases diamétricas para las ecuaciones de volumen total con corteza ajustadas para *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' en el Delta del Paraná. Entre paréntesis se indica el número de árboles en cada clase diamétrica.

$\bar{E}\%$ : -1,3 %,  $\bar{EA}$ : 0,034 m<sup>3</sup> y el  $\bar{EA}\%$ : 6,6 %. El modelo de Schumacher y Hall cumple las recomendaciones resumidas por Vanclay (1994): tener pocos parámetros, permitir una interpretación biológica, ser flexible brindando buenos resultados ante escenarios distintos y ser simple de aplicar. Además, cuando el objetivo es la estimación del volumen total, se recomienda que el modelo pase a través del origen (Avery y Burkhart, 1994). Es lógico pensar que los modelos de volumen pasan a través del origen, dado que si las variables independientes son cero, el volumen también es nulo (Prodan *et al.* 1997).

## CONCLUSIONES

Las ecuaciones de volumen total para *P. deltooides* en plantaciones ubicadas en el Delta del Paraná son escasas y no se encuentran en la bibliografía modelos para los clones 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' ampliamente difundidos en la actualidad (Borodowski, 2006). Los modelos publicados para otros clones de *P. deltooides* en el Delta del Paraná (Denegri y Marlats, 1991; Suárez y García Volonté, 1993) y en Santiago del Estero (Pece *et al.*, 2002) mostraron baja capacidad de estimación del volumen para los clones "australianos" con errores porcentuales promedio mayores al 10% (tabla 3).

Por otro lado, las ecuaciones de volumen ajustadas en el presente trabajo permiten mejorar la estimación del volumen de los individuos de *P. deltooides* 'Australiano 129/60' y 'Australiano 106/60' en la zona del río Carabelas del Delta del Paraná. Esto permite una mejor estimación de la producción de plantaciones de álamo con estos clones en el delta del Paraná Bonaerense. El modelo propuesto por Schumacher y Hall resultó ser el más conveniente para predecir el volumen del fuste. Las expresiones matemáticas del modelo para estimar el volumen total del fuste con corteza [1] y sin corteza [2] sin considerar el tocón son:

$$V_{tcc} = 0,06263 * d^{1,63496} * h^{1,31769} \quad [1]$$

$$V_{tsc} = 0,06020 * d^{1,67846} * h^{1,29960} \quad [2]$$

donde  $V_{tcc}$ : volumen total con corteza (m<sup>3</sup>),  $V_{tsc}$ : volumen total sin corteza (m<sup>3</sup>),  $d$ : diámetro a 1,30 m de altura (m) y  $h$ : altura total (m).

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a empresas y productores que han puesto a disposición sus plantaciones para la obtención de los datos, entre ellos al Sr. José Luis Cosentino, familia Ensunza, familia Gómez y a la empresa EDERRA. Además, el apoyo recibido por Dario S. Ceballos y Javier A. Álvarez en las tareas de campo y a Federico Letourneau por las sugerencias hechas al manuscrito. Este trabajo fue financiado por el proyecto Nacional de INTA "Desarrollo de modelos

de producción y crecimiento forestal que permita cuantificar la producción maderera y otros bienes y servicios".

## BIBLIOGRAFÍA

- EVERY, T.E. y BURKHART, H.E. 1994. Forest measurements. McGraw-Hill, New York.
- BORODOWSKI, E.D. 2006. Álamos y sauces en el Delta del Paraná: situación del sector y silvicultura. Jornadas de Salicáceas. Buenos Aires, Argentina.
- CAILLIEZ, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: estimación del volumen. Vol 22/1. Estudio FAO: Montes, Roma.
- CLUTTER, J.L.; FORSTON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H. y BAILEY, R.L. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons, New York.
- DENEGRI, G. y MARLATS, R.M. 1991. *Populus deltooides*: modelo matemático aplicado a la construcción de una tabla de volumen para el Delta Bonaerense. VI Jornadas Técnicas: inventarios, modelos de producción y crecimiento forestales. Eldorado, Argentina, pp. 49-56.
- FINGER, C.A.G. 1992. Fundamentos de biometría florestal. UFSC/CEPEF/FATEC, Santa Maria, Brasil.
- FRIEDL, R.A.; COSTAS, R.A.; MAIOCCO, D.C.; GRANCE, L.A. y PALAVECINO, J.A. 1991. Construcción de tablas de volúmenes estándares para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., VI Jornadas Técnicas: inventarios, modelos de producción y crecimiento forestales. Eldorado, Argentina, pp. 57-68.
- HUANG, S.; YANG, Y. y WANG, Y. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. En: AMARO, A.; REED, D. y SOARES, P. (Eds.), Modelling Forest Systems. CABI Publishing, Guildford, UK, pp. 271-293.
- KANDUS, P. 1997. Análisis de patrones de vegetación a escala regional en el Bajo Delta Bonaerense del Río Paraná (Argentina). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, p. 241.
- MYERS, R.H. 1986. Classical and modern regression with applications. PWS, Boston.
- PECE, M.G.; GAILLARD DE BENÍTEZ, C.; DE GALÍNDEZ, M.J. y RÍOS, N.A. 2002. Tabla de volumen de doble entrada para álamos de la zona de riego de Santiago del Estero, Argentina. Quebracho 9, 95-105.
- PIÑEIRO, G.; PERELMAN, S.; GUERSCHMAN, J.P. y PARUELO, J.M. 2008. How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed? Ecological Modelling 216(3-4), 316-322.
- PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F. y REAL, P. 1997. Mensura forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, San José, Costa Rica.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA GANADERÍA PESCA Y ALIMENTACIÓN (SAGPYA). 2001. Inventario nacional de plantaciones forestales. SAGPYA, p. 63.
- SOARES, P.; TOMÉ, M.; SKOVSGAARD, J.P. y VANCLAY, J.K. 1995. Evaluating a growth model for forest management using continuous forest inventory data. Forest Ecology and Management 71(3), 251-265.
- SUÁREZ, E.A. y GARCÍA VOLONTÉ, R. 1993. Tablas de volumen para álamos del Delta Bonaerense. Primer Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Comisión 4: ciencia y técnica aplicada. Paraná, Argentina, pp. 266-272.
- VANCLAY, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, UK.