

Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia

U. Diéguez Aranda^{1*}, M. Barrio Anta¹, F. Castedo Dorado²
y M. Balboa Murias¹

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Lugo.
Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario. 27002 Lugo. España

² Departamento de Ingeniería Agraria. Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria.
Universidad de León. Campus de Ponferrada. 24400 Ponferrada. España

Resumen

Cuando un árbol ha sido cortado y sólo permanece el tocón como indicador de sus dimensiones es necesario estimar su volumen a partir de las variables de aquél. Así, se puede predecir el diámetro normal y utilizar posteriormente una tarifa de cubicación local para estimar el volumen del tronco, o utilizar tarifas de volumen que dependen directamente de variables del tocón. Se han ajustado ambas relaciones (de diámetro normal y de volumen) para seis de las especies forestales de mayor interés comercial en Galicia (*Eucalyptus globulus* Labill., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus radiata* D. Don, *Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L. y *Betula alba* L.), utilizando una muestra de 1.450 árboles cortados en masas regulares de dichas especies, y empleando para ello modelos lineales y alométricos transformados mediante logaritmos. Los resultados obtenidos muestran una predicción adecuada de las relaciones indicadas, siendo el diámetro de tocón la variable más directamente relacionada con las mismas. La inclusión de la altura del tocón como variable explicativa no ha supuesto mejoras significativas en las estimaciones, salvo en el caso de *Betula alba*. Con este trabajo se pone una herramienta simple, aunque importante, a disposición tanto de los profesionales del sector como de la Administración Forestal y los propietarios privados.

Palabras clave: dimensiones del tocón, diámetro normal, ecuación de cubicación, Galicia.

Abstract

Estimating diameter at breast height and stem volume from stump dimensions for six timber species in Galicia (Northwestern Spain)

It becomes necessary to use stump dimensions to predict tree volume when a tree has been cut and only the stump remains as an indicator of tree size. Thus, diameter at breast height (dbh) can be predicted from stump measurements and an estimated volume can be obtained by the use of local volume equations, or stem volume can be estimated directly from stump dimensions with a specifically constructed volume equation. Regression equations for predicting dbh and stem volume from tree stump dimensions were adjusted for six of the main timber species in Galicia (Northwestern Spain) (*Eucalyptus globulus* Labill., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus radiata* D. Don, *Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L. and *Betula alba* L.), using data collected on 1,450 trees cut in even-aged stands, and fitting linear and multiplicative models transformed by taking natural logarithms. Results show that stump diameter is the most related variable with dbh and stem volume. Stump height did not improve significantly the predictions, except in *Betula alba*. With this work a simple and important tool is offered to forest sector professionals, private owners and public institutions.

Key words: stump dimensions, diameter at breast height, volume equation, Galicia.

* Autor para la correspondencia: udieguez@lugo.usc.es
Recibido: 18-11-02; Aceptado: 17-03-03.

Introducción

El diámetro normal es una variable muy utilizada en el campo forestal, tanto para calcular el volumen de los árboles como para definir la estructura de la masa, o simplemente para seleccionar los árboles a medir en un inventario de acuerdo a un determinado diseño de muestreo. En ocasiones, cuando un árbol ha sido cortado y sólo permanece el tocón como variable indicativa de sus dimensiones, es necesario utilizar el diámetro de éste como medida predictiva del diámetro normal (McClure, 1968), o incluso del volumen.

Conocer el diámetro normal o el volumen del árbol a partir del diámetro del tocón tiene, entre otras, las siguientes aplicaciones: (1) estimar el volumen de madera extraído en una corta final o en una corta de mejora (clareo o clara) ya realizada, (2) comprobar los resultados de las operaciones de aprovechamiento tras la extracción de los árboles, (3) evaluar el volumen de madera extraído ilícitamente en un lote previamente marcado para la corta, (4) evaluar las prácticas selvícolas realizadas reconstruyendo la composición previa de la masa cuando ésta no se ha medido antes, (5) evaluar los daños producidos por condiciones medioambientales adversas (nieve, fuego, viento) (Bylin, 1982a; Parresol, 1998).

La literatura disponible sobre la predicción del volumen del árbol en función del diámetro del tocón es relativamente escasa. La mayoría de los trabajos desarrollados elaboran tablas, gráficos o ecuaciones que predicen el diámetro normal, en vez del volumen, a partir del diámetro del tocón (McClure, 1968; Bylin, 1982a; Weigel y Johnson, 1997). En estos casos la estimación del volumen suele realizarse en dos fases: en primer lugar se predice el diámetro normal en función del diámetro del tocón y a continuación se obtiene el volumen del árbol utilizando una tarifa de cubicación local (Bylin, 1982b). Pero existen casos en los que esta tarifa no está disponible o no se puede elaborar (por ejemplo, en una corta a hecho de un rodal aislado), por lo que es necesario utilizar una herramienta más general que permita la estimación directa del volumen a partir del diámetro del tocón medido. Así, Myers (1963), Nyland (1975), Bylin (1982b) y Parresol (1998) han relacionado esta última variable con el volumen del árbol. Todos los estudios citados han trabajado con datos de diferentes especies forestales de Norteamérica.

El objetivo de este estudio es ajustar ecuaciones que relacionen tanto el volumen (con y sin corteza) como

el diámetro normal de un árbol con el diámetro y la altura de su tocón. Estas relaciones se han establecido para seis de las especies de mayor interés comercial en Galicia: eucalipto (*Eucalyptus globulus*), pino galego (*Pinus pinaster*), pino insigne (*Pinus radiata*), pino silvestre (*Pinus sylvestris*), roble (*Quercus robur*) y abedul (*Betula alba*).

Material y métodos

Datos

Los datos fueron recogidos en una red de parcelas de investigación que ha establecido el Grupo de Gestión Sostenible de la Universidad de Santiago de Compostela para elaborar modelos forestales de crecimiento. Dicha red está distribuida por toda Galicia y trata de cubrir las diferentes edades, densidades y calidades de estación de las seis especies consideradas en el estudio. Las parcelas se han establecido sobre masas puras y regulares, a excepción de algunas parcelas de roble en las que la especie *Quercus robur* aparece ligeramente mezclada con otras especies frondosas caducifolias. Se aparearon en total 1.450 árboles (ver distribución por especies en Tabla 1) proporcionalmente a la distribución diamétrica de cada masa, que fueron divididos en trozas de longitud comprendida entre 1 y 2,5 m, siendo en su mayoría de un metro. En cada árbol se midió con cinta métrica la altura del tocón (desde la parte ladera arriba del árbol) y la longitud de cada troza, aproximando al centímetro, y con forcípula dos diámetros con corteza perpendiculares en cada uno de sus extremos, así como sus respectivos espesores de corteza, aproximando al milímetro. El diámetro del tocón se consideró como el diámetro del extremo superior de la parte del tronco que permanece en pie tras la corta y se midió en cruz con aproximación al milímetro. Antes de la corta se midió el diámetro normal de los árboles (d , diámetro a 1,3 m sobre el terreno desde la parte ladera arriba del árbol).

Los volúmenes de las trozas se calcularon por la fórmula de Smalian. El raberón se cubió como un cono. El volumen total con y sin corteza se obtuvo sumando los respectivos volúmenes con y sin corteza de las trozas y el raberón.

En la Tabla 1 se presentan los estadísticos descriptivos más importantes de la muestra utilizada para cada especie.

Tabla 1. Valores de los estadísticos descriptivos de la muestra empleada

Variable	Estadístico	Especie					
		<i>E. globulus</i>	<i>P. pinaster</i>	<i>P. radiata</i>	<i>P. sylvestris</i>	<i>Q. robur</i>	<i>B. alba</i>
Número de datos		247	274	319	208	222	180
<i>d</i>	Mínimo	7,1	10,6	5,1	4,7	8,4	10,3
	Máximo	52,1	61,0	57,1	36,5	48,9	34,2
	Media	20,9	34,0	28,7	22,3	27,5	20,0
	Cv	38,6	32,3	44,0	28,0	29,7	25,2
<i>d_{st}</i>	Mínimo	9,6	14,5	5,9	10,7	10,3	14,8
	Máximo	59,2	77,3	74,2	42,5	62,4	44,5
	Media	27,2	41,8	35,4	27,7	35,1	26,1
	Cv	35,0	32,3	41,8	24,3	27,2	23,0
<i>h_{st}</i>	Mínimo	0,01	0,01	0,04	0,03	0,04	0,01
	Máximo	0,31	0,32	0,32	0,21	0,52	0,50
	Media	0,11	0,09	0,13	0,11	0,22	0,20
	Cv	42,8	45,3	36,5	33,9	44,7	44,8
<i>v</i>	Mínimo	12,4	33,8	5,8	8,6	27,4	28,0
	Máximo	2.409,2	3.380,5	3.395,9	829,1	2.490,5	704,6
	Media	488,3	927,0	809,8	249,3	504,0	211,3
	Cv	94,8	74,7	94,9	75,1	72,0	67,8
<i>v_u</i>	Mínimo	7,8	19,9	5,1	5,9	23,3	24,8
	Máximo	2.034,2	2.778,5	2.891,3	749,5	2.171,9	631,1
	Media	422,6	760,2	680,5	218,2	428,7	186,8
	Cv	96,5	77,2	95,3	78,1	73,1	69,0

Cv: coeficiente de variación en porcentaje.

Nomenclatura

La terminología empleada en la descripción de los modelos utilizados se basa en las recomendaciones de IUFRO (1959), y es la siguiente: d = diámetro normal medio con corteza en centímetros, d_{st} = diámetro medio del tocón con corteza en centímetros, h_{st} = altura del tocón en metros, v = volumen total del tronco del árbol con corteza en decímetros cúbicos, v_u = volumen total del tronco del árbol sin corteza en decímetros cúbicos, y b_i = coeficientes de regresión a determinar mediante el ajuste.

Modelos analizados

Se han utilizado cinco modelos diferentes (denotados con el prefijo TDN) para ajustar la relación entre el diámetro normal y el diámetro y/o la altura del tocón (ambos diámetros con corteza). En principio se consideró el análisis de dos modelos alométricos; sin embargo, en muchas relaciones de este tipo los errores se distribuyen siguiendo una distribución lognormal, por lo que se deci-

dió realizar una transformación logarítmica para ponderar las observaciones y corregir la heterocedasticidad y la falta de normalidad de los residuos (Baskerville, 1972; Beauchamp y Olson, 1973; Flewelling y Pienaar, 1981; Parresol, 1993). Las expresiones matemáticas de los modelos analizados aparecen en la Tabla 2.

Por otra parte, para la construcción de la tarifa de árbol individual a partir del diámetro y/o la altura del tocón, se han ensayado tres modelos diferentes (prefijo VDT), cuyas expresiones se exponen también en la Tabla 2, y en las que v representa genéricamente el volumen, que puede ser tanto con corteza como sin ella.

Metodología de ajuste y validación

La selección del mejor modelo se ha basado en el análisis de la capacidad de ajuste y de la capacidad predictiva, tanto por métodos analíticos como por métodos gráficos.

Todos los modelos descritos son lineales en los parámetros, por lo que su ajuste se ha realizado por mí-

Tabla 2. Modelos empleados para estimar el diámetro normal y el volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón

Modelo	Ecuación
TDN1	$d = b_0 + b_1 d_{st}$
TDN2	$d = b_0 + b_1 d_{st}^2$
TDN3	$\ln d = b_0 + b_1 \ln d_{st}$
TDN4	$d = b_0 + b_1 d_{st} + b_2 d_{st}^2$
TDN5	$\ln d = b_0 + b_1 \ln d_{st} + b_2 \ln h_{st}$
VDT1	$\ln v = b_0 + b_1 \ln d_{st}$
VDT2	$v = b_0 + b_1 d_{st}^2 + b_2 h_{st}$
VDT3	$\ln v = b_0 + b_1 \ln d_{st} + b_2 \ln h_{st}$

nimos cuadrados ordinarios empleando el procedimiento REG del programa estadístico SAS/STAT™ (SAS Institute INC., 1999).

La capacidad de ajuste se ha analizado mediante la obtención, a partir de los residuos, de cuatro estadísticos utilizados con frecuencia en modelización forestal (Prodan *et al.*, 1997; Gadow y Hui, 1999; Castedo y Álvarez, 2000): sesgo ($\bar{E}$), error medio cuadrático (EMC), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y criterio de información de Akaike (AIC). Sus expresiones son las siguientes:

$$\text{Sesgo: } \bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)}{N} \quad [1]$$

$$\text{Error medio cuadrático: } EMC = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N - p} \quad [2]$$

Coeficiente de determinación ajustado:

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \right) \left(\frac{N-1}{N-p} \right) \quad [3]$$

AIC en diferencias:

$$\Delta_{AICj} = N \ln \hat{\sigma}_j^2 + 2K_j - \min(N \ln \hat{\sigma}_j^2 + 2K_j) \quad [4]$$

donde Y_i , $\hat{Y}_i$ e $\bar{Y}$, son respectivamente los valores observado, predicho y promedio de la variable dependiente; N es el número total de datos empleado en el ajuste del modelo; p es el número de parámetros a estimar; K_j es el número de parámetros del modelo j más 1 ($K_j = p + 1$); y $\hat{\sigma}^2$ es el estimador de la varianza del error del modelo j , cuyo valor se obtiene como:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N} \quad [5]$$

El sesgo evalúa la desviación del modelo respecto de los valores observados; el error medio cuadrático analiza la precisión de las estimaciones; el coeficiente de determinación ajustado refleja la variabilidad total que es explicada por el modelo teniendo en cuenta el número total de parámetros a estimar; y el criterio de información de Akaike es un índice que se emplea para seleccionar el mejor modelo y se basa en minimizar la distancia de Kullback-Liebler. La fórmula empleada para su cálculo está especialmente indicada para ajustes por el método de mínimos cuadrados en los que los residuos se distribuyen normalmente. El AIC se presenta en diferencias (Δ_{AIC}), es decir, se ha relativizado su valor en función del menor AIC obtenido. De esta manera los valores son más fáciles de interpretar y permiten una rápida comparación de los modelos candidatos (Burnham y Anderson, 2000).

Al analizar modelos con distintas variables dependientes, y para hacer comparables los valores de los estadísticos correspondientes a cada uno de ellos, se ha considerado una misma variable dependiente para el cálculo de los residuos. En el caso de la relación entre el diámetro normal y el diámetro y/o la altura del tocón, se ha escogido d como variable dependiente, mientras que para la tarifa de cubicación la variable elegida ha sido el volumen, bien sea v o v_u . Además, en los modelos alométricos transformados, se ha incorporado un factor corrector del sesgo (c) que aparece como multiplicativo en la expresión alométrica y que se calcula como:

$$c = e^{\left(\frac{EMC}{2} \right)} \quad [6]$$

donde EMC es el error medio cuadrático del modelo logarítmico ajustado. Así, la transformación exponencial de un modelo logarítmico de la forma $\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + \dots + b_n \ln x_n$ quedaría expresada como $y = c e^{b_0} x_1^{b_1} \dots x_n^{b_n}$.

Esta corrección, debida a Meyer (1944), se puede obviar si el ajuste de la función es bueno; sin embargo, otros autores recomiendan su inclusión, sobre todo si el grado de precisión que se pretende obtener es elevado (Baskerville, 1972; Alder, 1980; Sterba, 2001).

Para analizar la capacidad predictiva de los modelos ajustados se ha realizado una validación cruzada (*cross-validation*), metodología que se basa en el empleo de los residuos eliminados y que se utiliza con frecuencia en la validación de modelos en el campo forestal (Tomé *et al.*, 2001; Soares y Tomé,

2002; López *et al.*, 2003). El residuo eliminado de la observación *iésima* es la diferencia que existe entre el valor real de la variable dependiente y el valor estimado por una función que se ha ajustado a todos los datos excepto a la observación *iésima*. En este procedimiento los datos de validación tienen siempre una observación y el resto de datos se usan para el ajuste.

Como en el caso de la fase de ajuste, se calcularon el sesgo, el error medio cuadrático, la eficiencia del modelo ajustada (MEF_{adj} , equivalente al coeficiente de determinación ajustado de la fase anterior) y el criterio de información de Akaike en diferencias, a partir de los valores de los residuos eliminados. Estos estadísticos se calculan de la manera indicada anteriormente por las fórmulas [1], [2], [3], [4] y [5], sustituyendo en este caso los valores de Y_i , $\hat{Y}_i$, $\bar{Y}_i$ y N por los de Z_i , $\hat{Z}_i$, $\bar{Z}$ y N' , que son respectivamente el valor de la observación *iésima*, los valores predicho, promedio y número de datos empleado cuando el ajuste del modelo se ha realizado sin dicha observación.

En sentido estricto, sin embargo, la validación de un modelo sólo se puede realizar con su empleo a lo largo del tiempo, por lo que esta metodología es en realidad un criterio más de decisión para la selección del modelo más adecuado.

Además, y como ayuda para la selección del mejor modelo, tanto en la fase de ajuste como en la de validación, se ha llevado a cabo una representación gráfica de los valores reales de las variables frente a los predichos, a los que se ha superpuesto la recta ideal 1:1, con el fin de inspeccionar de manera visual si las predicciones eran acordes con los valores reales. Por último, se ha analizado también el gráfico de residuos frente al valor predicho de la variable dependiente con la finalidad de detectar valores atípicos o tendencias extrañas en los datos. Este análisis gráfico es una herramienta muy útil para determinar si los ajustes se adecuan a los datos (Huang, 2002).

Resultados y Discusión

Se han identificado para cada variable dependiente los modelos con una y dos variables independientes que proporcionan mejor ajuste, basándose en los estadísticos de comparación definidos anteriormente y en los gráficos de valores observados frente a valores predichos. En la Tabla 3 se tabulan los modelos seleccionados y los valores de los estadísticos de comparación

asociados a ellos. Como ya se ha indicado en el apartado anterior, todos los estadísticos se han calculado considerando la misma variable dependiente, para lo cual se deshizo la transformación logarítmica y se aplicó la corrección del sesgo.

De la Tabla 3 se deduce que la inclusión de la altura del tocón no tiene influencia en la determinación del diámetro normal (incluso para tres especies las estimaciones son mejores prescindiendo de esta variable), salvo en el caso del abedul. La explicación a este hecho puede encontrarse en que el tronco de dicha especie presenta una sección basal con acanaladuras, lo que motiva que se aleje de la sección circular ideal (Villarino, 1983), por lo que la inclusión de la altura del tocón en este caso sí ayuda de forma significativa a explicar la variabilidad del diámetro normal (hasta un 6% más).

Una relación lineal sencilla entre el diámetro normal y el diámetro del tocón parece suficiente para explicar la variabilidad de los datos en la mayoría de las especies estudiadas, y aunque si bien el modelo parabólico presenta en ocasiones mejores resultados, en estos casos el parámetro que acompaña a la variable elevada al cuadrado toma valores muy pequeños.

En cuanto a los modelos de tarifas de una entrada que predicen el volumen del árbol a partir de las dimensiones del tocón, la inclusión de la altura del tocón como variable independiente tampoco aporta una mejora significativa con respecto a los modelos más simples que sólo consideran una variable independiente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Bylin (1982b), trabajando también con un rango de alturas de tocón relativamente reducido. De nuevo el abedul es una excepción, ya que en este caso los modelos que incluyen la altura del tocón explican también hasta un 6% más de la variabilidad total de los datos del volumen del tronco.

Esta manera de proceder parece adecuada siempre que las cortas se realicen dejando en monte tocones con alturas dentro de los rangos utilizados en este trabajo, tal y como sucede en la mayoría de los aprovechamientos madereros que se realizan en Galicia. Sin embargo, en el caso de especies que presenten particularidades en la base del tronco (acanaladuras, aletas, costillas) la inclusión de la altura del tocón es una variable a tener en cuenta en el análisis (Parresol, 1998).

En la Tabla 4 se presentan para cada especie y variable dependiente analizada (d , v y v_u) los valores es-

Tabla 3. Valores de los estadísticos de comparación para los modelos seleccionados en las fases de ajuste y validación

Especie	Modelo	Ajuste				Validación cruzada			
		$\bar{E}$	EMC	R^2_{adj}	Δ_{AIC}	$\bar{E}$	EMC	MEF_{adj}	Δ_{AIC}
<i>E. globulus</i>	TDN1	0,000	5,5	0,915	0,0	0,000	5,6	0,914	0,0
	TDN5	-0,016	5,5	0,915	3,3	-0,014	5,7	0,913	4,5
	VDT1	-5,053	25.184,1	0,882	0,0	-5,167	25.772,7	0,880	0,0
	VDT2	0,000	25.114,1	0,883	0,3	0,201	26.017,2	0,879	3,3
	VDT1 _u	-8,549	21.806,5	0,869	17,5	-8,728	22.350,0	0,866	15,1
	VDT2 _u	0,000	20.235,6	0,878	0,0	0,156	20.942,9	0,874	0,0
<i>P. pinaster</i>	TDN4	0,000	8,7	0,928	16,6	0,001	8,9	0,927	15,4
	TDN5	-0,024	8,2	0,932	0,0	-0,022	8,4	0,931	0,0
	VDT1	-11,032	76.253,2	0,841	24,6	-11,287	77.719,6	0,838	21,1
	VDT2	0,000	69.449,1	0,855	0,0	-0,074	71.700,8	0,850	0,0
	VDT1 _u	-14,129	68.058,3	0,802	30,0	-14,418	69.404,1	0,798	26,8
	VDT2 _u	0,000	60.787,4	0,823	0,0	-0,054	62.721,0	0,818	0,0
<i>P. radiata</i>	TDN4	0,000	5,9	0,963	0,0	-0,002	6,0	0,962	0,0
	TDN5	-0,010	5,9	0,963	2,2	-0,010	6,1	0,962	0,8
	VDT1	-14,472	64.284,1	0,891	85,9	-14,712	65.422,4	0,889	82,3
	VDT2	0,000	48.958,7	0,917	0,0	-0,057	50.395,3	0,915	0,0
	VDT1 _u	-17,246	54.340,8	0,871	97,4	-17,493	55.317,1	0,868	93,7
	VDT2 _u	0,000	39.913,1	0,905	0,0	-0,056	41.113,0	0,902	0,0
<i>P. sylvestris</i>	TDN4	0,000	2,7	0,930	0,0	0,000	2,8	0,928	0,0
	TDN5	-0,081	3,3	0,916	38,3	-0,084	3,4	0,913	37,7
	VDT1	2,153	3.570,6	0,898	0,0	2,188	3.637,6	0,896	0,0
	VDT3	2,137	3.569,6	0,898	0,9	2,186	3.668,9	0,895	2,8
	VDT1 _u	1,918	3.333,5	0,885	0,0	1,955	3.396,1	0,883	0,0
	VDT3 _u	1,915	3.319,1	0,886	0,1	1,972	3.414,2	0,882	2,1
<i>Q. robur</i>	TDN4	0,000	7,5	0,888	12,4	0,003	7,7	0,885	12,7
	TDN5	-0,044	7,1	0,894	0,0	-0,047	7,2	0,892	0,0
	VDT1	1,402	27.666,4	0,790	6,9	1,395	28.261,4	0,785	4,7
	VDT2	2,518	26.700,0	0,797	0,0	2,500	27.548,3	0,791	0,0
	VDT1 _u	2,064	21.391,8	0,782	5,9	2,085	21.849,2	0,778	3,9
	VDT2 _u	2,877	20.737,8	0,789	0,0	2,897	21.369,3	0,782	0,0
<i>B. alba</i>	TDN1	0,000	4,9	0,809	65,0	-0,001	4,9	0,806	62,8
	TDN5	-0,010	3,4	0,868	0,0	-0,013	3,5	0,864	0,0
	VDT1	-3,185	4.089,3	0,801	61,8	-3,278	4.181,7	0,796	58,6
	VDT2	0,000	2.885,7	0,860	0,0	-0,087	3.003,5	0,854	0,0
	VDT1 _u	-2,823	3.403,2	0,795	60,1	-2,896	3.477,9	0,790	56,9
	VDT2 _u	0,000	2.423,8	0,854	0,0	-0,073	2.520,8	0,848	0,0

timados de los parámetros y sus errores estándar asociados para el conjunto de modelos seleccionados. En la Figura 1 se muestran los gráficos de valores reales frente a valores predichos de las ecuaciones de una entrada para la estimación del diámetro normal y del volumen con corteza, en los que se aprecia la ausencia de sesgo y de tendencias anómalas de las estimaciones.

En general, las tarifas en función de las dimensiones del tocón deben construirse para cada rodal (o pa-

ra rodales muy similares), ya que el volumen en masas regulares depende también en gran medida de la altura, y la relación entre ésta y el diámetro normal varía con distintas variables del estado del rodal, como la densidad o la edad (García, 1995). Sería interesante en estos casos, por tanto, hacer acopio de datos en zonas concretas de trabajo para construir ecuaciones locales de este tipo, tomando datos de árboles en pie y considerando como altura de tocón la altura previsible de corta.

Tabla 4. Valores estimados y errores estándar de los parámetros para los modelos seleccionados

Especie	Modelo	Parámetros						c
		b_0	Error estándar	b_1	Error estándar	b_2	Error estándar	
<i>E. globulus</i>	TDN1	-1,1147	0,4520	0,8082	0,0157	—	—	—
	TDN5	-0,4934	0,0752	1,0676	0,0196	0,0019*	0,0140	—
	VDT1	-2,8064	0,1471	2,6427	0,0451	—	—	1,0336
	VDT2	-133,5835	28,2276	0,7496	0,0175	-15,9040*	214,4792	—
	VDT1 _u	-3,3244	0,1596	2,7494	0,0489	—	—	1,0396
	VDT2 _u	-126,3136	25,3380	0,6589	0,0157	6,2230*	192,5236	—
<i>P. pinaster</i>	TDN4	-2,5280*	1,6532	0,9727	0,0789	-0,0022	0,0009	—
	TDN5	0,0432*	0,0682	0,9646	0,0156	0,0489	0,0102	1,0036
	VDT1	-2,2038	0,1649	2,3730	0,0446	—	—	1,0316
	VDT2	-160,6425	42,2481	0,5221	0,0137	857,4684	390,0798	—
	VDT1 _u	-2,7460	0,1930	2,4597	0,0523	—	—	1,0435
	VDT2 _u	-140,2753	39,5258	0,4349	0,0128	656,8697*	364,9446	—
<i>P. radiata</i>	TDN4	-3,5399	0,7639	1,0000	0,0435	-0,0021	0,0006	—
	TDN5	-0,2765	0,0438	1,0472	0,0093	0,0527	0,0121	1,0030
	VDT1	-2,9252	0,1026	2,6049	0,0293	—	—	1,0303
	VDT2	-227,8519	38,0612	0,6377	0,0109	729,2359	257,1329	—
	VDT1 _u	-3,1862	0,1162	2,6272	0,0332	—	—	1,0391
	VDT2 _u	-216,2951	34,3657	0,5326	0,0099	834,7195	232,1670	—
<i>P. sylvestris</i>	TDN4	-6,1225	1,4118	1,1883	0,1079	-0,0055	0,0020	—
	TDN5	-0,7833	0,1116	1,1950	0,0262	0,0394	0,0193	—
	VDT1	-5,8233	0,1769	3,3454	0,0536	—	—	1,0227
	VDT3	-5,3551	0,2464	3,2825	0,0578	0,1145	0,0426	1,0220
	VDT1 _u	-6,3797	0,2047	3,4656	0,0621	—	—	1,0305
	VDT3 _u	-5,7740	0,2838	3,3844	0,0666	0,1481	0,0491	1,0293
<i>Q. robur</i>	TDN4	-4,8516	1,6581	1,0630	0,0961	-0,0037	0,0014	—
	TDN5	-0,1725*	0,1065	1,0159	0,0256	0,0846	0,0162	1,0051
	VDT1	-2,9661	0,2010	2,5353	0,0570	—	—	1,0355
	VDT3	-2,2000	0,2697	2,3942	0,0649	0,1675	0,0409	1,0331
	VDT1 _u	-3,0655	0,2082	2,5171	0,0590	—	—	1,0381
	VDT3 _u	-2,3848	0,2822	2,3918	0,0680	0,1488	0,0428	1,0363
<i>B. alba</i>	TDN1	0,2346*	0,7365	0,7592	0,0276	—	—	—
	TDN5	0,1275*	0,1087	0,9477	0,0313	0,1272	0,0137	1,0045
	VDT1	-3,8657	0,3400	2,7781	0,1049	—	—	1,0534
	VDT2	-119,4130	12,1155	0,3720	0,0122	347,5532	48,7128	—
	VDT1 _u	-4,0470	0,3535	2,7940	0,1090	—	—	1,0579
	VDT2 _u	-110,8533	11,1036	0,3319	0,0111	323,7971	44,6440	—

c: factor corrector del sesgo para la transformación exponencial de los modelos logarítmicos. * Parámetro no significativo a un nivel de significación del 5%.

No obstante, aunque de ámbito general, las relaciones obtenidas en este trabajo presentan buenos ajustes y, en ausencia de otra información, proporcionarán estimaciones razonables. De hecho, para todas las especies se consigue explicar alrededor de un 90 % de la variabilidad total de las variables dependientes estudiadas, tal y como muestran el coeficiente de determinación ajustado y la eficiencia del modelo (Tabla 3).

Por último, no se deben olvidar ciertas limitaciones de estas ecuaciones, como son la aplicación a árboles no trasmochados y dentro de los límites de utilización de las mismas, definidos por los valores máximo y mínimo de las variables independientes empleadas en el ajuste de los modelos. Las extrapolaciones a un rango de datos distinto al empleado en los ajustes pueden dar lugar a estimaciones erróneas.

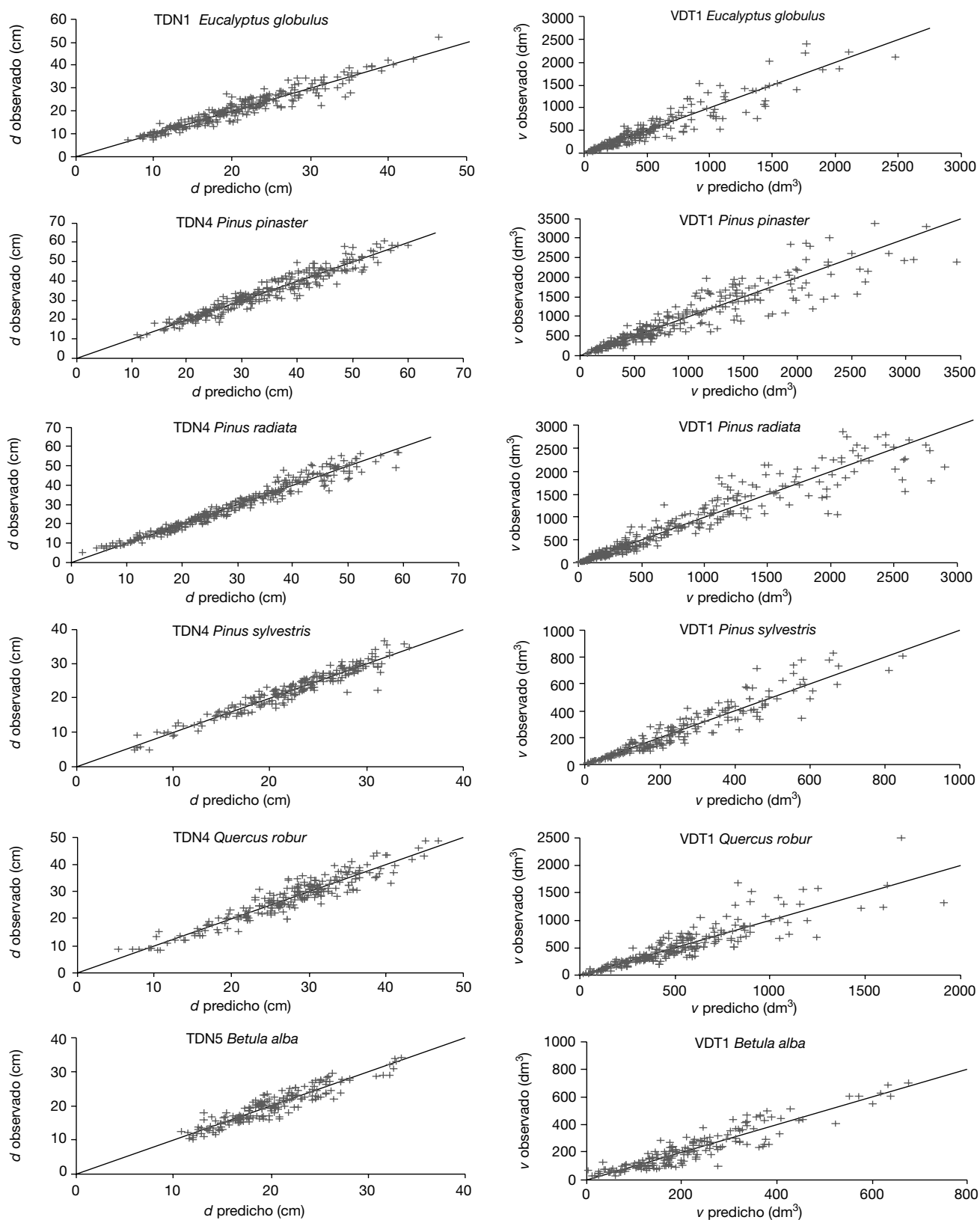


Figura 1. Valores observados frente a valores predichos de los modelos seleccionados para la estimación del diámetro normal (izquierda) y del volumen con corteza a partir del diámetro del tocón (derecha).

Conclusiones

En ausencia de tarifas locales, las tarifas generales que se presentan en este trabajo y que dependen de las dimensiones del tocón proporcionan estimaciones satisfactorias tanto del diámetro normal como del volumen del tronco. No obstante, hay que tener presente que se pudieran estar obviando defectos del árbol, por lo que la aplicación de estas tarifas debería realizarse con cautela.

La relación diámetro normal-diámetro de tocón se explica adecuadamente con modelos lineales, sin necesidad de utilizar modelos más complejos.

La altura del tocón no aporta un incremento significativo en la variabilidad explicada por los modelos, tanto en la relación anterior como en las tarifas de volumen obtenidas a partir de las variables del tocón, por lo que para las especies estudiadas y en rangos de valores similares a los de este trabajo no se recomienda su consideración. Sólo en el caso de especies con particularidades en la base del tronco (abedul) es conveniente considerar dicha variable.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la buena disposición y la cesión de parte de los datos utilizados en este trabajo a los miembros del Laboratorio de Dasometría, Inventariación y Ordenación de Montes de la Escuela Politécnica Superior de Lugo. Asimismo, a Roque Rodríguez por la revisión final del artículo.

Referencias bibliográficas

- ALDER D., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Estudios FAO Montes 22/2. Roma, 198 pp.
- BASKERVILLE G.L., 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Can. J. For. Res. 2, 49-53.
- BEAUCHAMP J.J., OLSON J.S., 1973. Corrections for bias in regression estimates after logarithmic transformation. Ecology 54, 1403-1407.
- BURNHAM K.P., ANDERSON D.R., 2000. Model selection and inference: a practical information-theoretic approach. Springer-Verlag, 353 pp.
- BYLIN C.V., 1982a. Estimating dbh from stump diameter for 15 southern species. USDA For. Ser. Res. Note SO-286, 3 pp.
- BYLIN C.V., 1982b. Volume prediction from stump diameter and stump height of selected species in Louisiana. USDA For. Ser. Res. Note SO-182, 11 pp.
- CASTEDO F., ÁLVAREZ J.G., 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. Invest. Agrar.: Sist. Recur. For. 9 (2), 253-268.
- FLEWELLING J.W., PIENAAR L.V., 1981. Multiplicative regression with lognormal errors. For. Sci. 27, 281-289.
- GADOW K.v., HUI G., 1999. Modelling Forest Development. Kluwer Academic Publishers, 205 pp.
- GARCÍA O., 1995. Apuntes de mensura forestal I. Estática. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, 65 pp.
- HUANG S., 2002. Validating and localizing growth and yield models: procedures, problems and prospects. Proceedings of IUFRO Workshop on Reality, models and parameter estimation: the forestry scenario. Sesimbra.
- IUFRO, 1959. Standardization of symbols in forest mensuration. IUFRO. Wien, 32 pp.
- LÓPEZ C.A., GORGOSO J.J., CASTEDO F., ROJO A., RODRÍGUEZ R.J., ÁLVAREZ J.G., SÁNCHEZ F.E., 2003. Comparison of generalized height-diameter models for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwestern Spain). Ann. For. Sci. 60 (3), 237-245.
- McCLURE J.P., 1968. Predicting tree dbh from stump measurements in the southeast. USDA For. Ser. Res. Note SE-99, 4 pp.
- MEYER H.A., 1944. A correction for systematic error occurring in the application of the logarithmic volume equation. Pennsylvania State University, Forest Research Paper 7.
- MYERS C.A., 1963. Estimating volumes and diameters at breast height from stump diameters, southwestern ponderosa pine. USDA For. Ser. Res. Note RM-9, 2 pp.
- NYLAND R.D., 1975. Estimating volume from stump measurements for hardwoods. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry. AFRI Res. Note 14, 2 pp.
- PARRESOL B.R., 1993. Modelling multiplicative error variance: an example predicting tree diameter from stump dimensions in baldcypress. For. Sci. 39, 670-679.
- PARRESOL B.R., 1998. Prediction and error of baldcypress stem volume from stump diameter. South. J. Appl. For. 22 (2), 69-73.
- PRODAN M., PETERS R., COX F., REAL P., 1997. Mensura Forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Costa Rica, 561 pp.
- SAS INSTITUTE INC., 1999. SAS/STAT™ User's guide, Release 8.0 Edition. Cary, NC, USA.
- SOARES P., TOMÉ M., 2002. Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. For. Ecol. Manage. 166, 99-109.
- STERBA H., 2001. Forest growth modelling. Curso impartido en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- TOMÉ M., RIBEIRO F., SOARES P., 2001. O modelo Globulus 2.1. Relatórios Técnico-Científicos do GIMREF, nº1/2001. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Departamento de Engenharia Florestal, 69 pp.
- VILLARINO J.J., 1983. El abedul en Galicia. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- WEIGEL D.R., JOHNSON P.S., 1997. Estimating dbh of southern Indiana oaks from stump diameter. USDA For. Ser. Tech. Brief TB-NC-4, 4 pp.