

Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Laurel-Lingue

Fitness and validation of volume equations for a relict forest of Roble-Laurel-Lingue

CHRISTIAN SALAS ELJATIB

Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera, Casilla 54-D, Temuco, Chile.
E-mail: csalas@ufro.cl

SUMMARY

Using a non-destructive method based on the Bitterlich mirror relascope, we determined the total volume of individual trees in a relict native forest named Rucamanque, which is located in the IX region of Chile. Based on these estimations, equations relating volume were fitted. The seven species were grouped using a covariance analysis. After this analysis, four groups were chosen: 1. Laurel (*Laurelia sempervirens*), Lingue (*Persea lingue*), Tapa (*Laureliopsis philipiana*); 2. Ulmo (*Eucryphia cordifolia*) with DBH ≤ 60 cm, Olivillo (*Aextoxicon punctatum*); 3. Roble (*Nothofagus obliqua*), and 4. Ulmo with DBH > 60 cm, Tineo (*Weinmannia trichosperma*). To obtain the best volume equation for each species group, the following four steps were taken: fulfillment of statistical assumptions, models ranked according to goodness of fit, models ranked according to prediction capabilities and, finally, an analysis of the prediction capabilities of the models within diameter classes. The quadratic mean error (ECM) presented by the selected equations ranged from 15% to 24%, mainly influenced by the amplitude of fit range and the large natural variability of the volume in the larger diameter classes.

Key words: Volume estimation, volume equations, native forest.

RESUMEN

Mediante un método no destructivo, basado en el empleo del relascope de espejos, se cubicaron árboles individuales de las especies nativas del bosque relicto del predio Rucamanque (IX Región, Chile). A partir de esta cubicación, se ajustaron ecuaciones estimadoras del volumen. Se agruparon especies mediante un análisis de covarianza, producto del cual se obtuvieron los siguientes cuatro grupos: 1. Laurel (*Laurelia sempervirens*), Lingue (*Persea lingue*), Tapa (*Laureliopsis philipiana*); 2. Ulmo (*Eucryphia cordifolia*) con DAP ≤ 60 cm, Olivillo (*Aextoxicon punctatum*); 3. Roble (*Nothofagus obliqua*), y 4. Ulmo con DAP > 60 cm, Tineo (*Weinmannia trichosperma*). La obtención de la mejor ecuación de volumen total para cada uno de los grupos de especies se realizó en las siguientes cuatro etapas: Prueba de violación de supuestos estadísticos, Ranking de modelos de acuerdo a la bondad de ajuste, Ranking de modelos de acuerdo a sus capacidades predictivas, y análisis de las capacidades predictivas dentro de rangos de clases diamétricas. Las ecuaciones seleccionadas presentan errores cuadráticos medios (ECM) entre el 15-24%, lo cual está influenciado principalmente por la amplitud del rango de ajuste y la gran variabilidad natural del volumen en los mayores DAP.

Palabras claves: Estimación de volumen, ecuación de volumen, bosque nativo.

INTRODUCCION

La Novena Región de la Araucanía, según el catastro de bosque nativo de 1997, posee 907.521 hectáreas de bosques naturales, de los cuales un 31,5% corresponden a bosques adultos, un 49,5%

a renovales y el 19,0% restante a bosques adultos-renovales y bosques achaparrados (CONAF *et al.* 1999).

La depresión intermedia, como elemento longitudinal del relieve de Chile Central, constituye la zona agrícola y ganadera por excelencia; por ello,

ha sido intervenida tempranamente desde los tiempos de la colonización y su vegetación original se encuentra alterada, a tal extremo que casi no es posible encontrar rodales de ella en su estado prístino (Donoso 1983). Sin embargo, en la actualidad sólo es posible encontrar dos retazos de bosques nativos adultos en el valle central de la IX Región, típicos de la vegetación reinante en el pasado. Estos son el Cerro Ñielol y el Predio Rucamanque, donde este último posee la mayor superficie y el menor impacto humano (Frank 1998), con 209 hectáreas cubiertas por bosques primarios.

Diversos estudios se han realizado en los relictos boscosos de la IX Región (Veblen *et al.* 1979, Magofke 1985, Hauenstein *et al.* 1988, Ramírez *et al.* 1989a, 1989b, Braunisch 1997, Bürgmann 1998, Frank 1998), no obstante, en ninguno de estos estudios se han evaluado los niveles de existencia que pueden alcanzar estas formaciones boscosas.

Tradicionalmente las ecuaciones de volumen son construidas mediante métodos destructivos, los que, conjuntamente con el volteo de los árboles necesarios para la muestra, tienen un alto costo operativo y en este tipo de bosques relictos presentan también un alto costo ecológico.

A través de este estudio se propone una metodología no destructiva para la toma de datos necesarios en la construcción de ecuaciones de volumen en bosques naturales mixtos y, además, se describe un procedimiento estadístico para la obtención de ecuaciones de volumen.

MATERIAL Y METODOS

Area de estudio. El estudio se llevó a cabo en el predio Rucamanque, de una superficie de 435,1 ha, situado en los 38° 39' latitud sur y 72° 35' longitud oeste, en la comuna de Temuco, provincia de Cautín, Novena Región de Chile (Salas 2001).

Rucamanque posee dos formaciones boscosas, el bosque adulto mixto de Olivillo (*Aextoxicon punctatum*), Roble (*Nothofagus obliqua*), Ulmo (*Eucryphia cordifolia*), Laurel (*Laurelia sempervirens*), Lingue (*Persea lingue*) y el renopal de Roble, que cubren 229,7 y 70,3 ha respectivamente. De acuerdo a la tipología propuesta por Donoso (1981), el bosque adulto mixto de Rucamanque pertenece al tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe, subtipo remanentes originales, mientras los renopales de Roble, aun cuando pertenecen al

mismo tipo forestal, corresponden al subtipo renopal y bosque puro secundario. El bosque adulto presenta una estructura multietárea y multiestratificada, compuesta principalmente por Olivillo, Roble, Laurel, Lingue, Tepa (*Laureliopsis philipiana*), Ulmo y Tineo (*Weinmannia trichosperma*), con una densidad promedio de 680 arb/ha y 97 m²/ha de área basal. En cambio, el renopal se encuentra dominado por Roble, y en una proporción inferior por especies tolerantes en los estratos intermedios, alcanzando, en promedio, 55 m²/ha en área basal con 1.006 arb/ha (Salas 2001).

OBTENCION DE VOLUMENES INDIVIDUALES

Selección de los árboles muestra. Se realizó en forma proporcional a la participación de las clases diamétricas en el área basal total del rodal. Se seleccionaron árboles al interior de 8 parcelas permanentes (de 1.000 m², 50x20m), establecidas previamente en el predio, en cada una de éstas se replantearon 4 puntos de muestreo puntual horizontal, a lo largo del eje central de la parcela. En cada punto de muestreo, y mediante el uso del relascopio, se procedió al conteo de árboles utilizando un FAB = 4 m²/ha, los cuales fueron seleccionados como árboles muestras. Posteriormente, para completar la muestra en cuanto a la distribución diamétrica y composición, se procedió a seleccionar en forma aleatoria árboles fuera de las unidades muestrales, siempre y cuando pertenecieran a los diámetros y especies de interés.

Medición de árboles muestra. A cada árbol identificado por su especie se le midió el diámetro a 1,3 m (d) y a 0,3 m (dtoc) con forcípula de brazos paralelos; la altura total (h), altura comienzo de copa (hcc), el diámetro comienzo de copa (dcc) y los diámetros fustales a 2, 4, 6, 8 y 10 m de altura se midieron con el relascopio de espejos de Bitterlich (Bitterlich 1958).

Todos los diámetros medidos con relascopio se efectuaron visando por un solo lado del fuste de cada árbol. Los volúmenes totales se obtuvieron mediante la cubicación por secciones, utilizando la fórmula del cilindro para el tocón, la de Smalian para las secciones entre el tocón y la hcc, y entre la hcc y la h, se cubicó asumiendo una forma cónica.

En los árboles que presentaban bifurcaciones o mayores divisiones del fuste principal (lo cual

constituye una situación bastante frecuente en bosques multietáneos que se han desarrollado en forma natural, sin intervención antrópica), con trozos de considerables diámetros y largos, se procedió a medir los diámetros basales y luego éstos se cubicaron como un cono.

Agrupación de especies. Debido a que el bosque de Rucamanque presenta siete especies forestales de interés (Laurel, Lingue, Olivillo, Roble, Tapa, Tineo y Ulmo), se determinaron, mediante el análisis de covarianza, especies homogéneas en términos del volumen total, para así establecer grupos de especies, a los cuales ajustar las ecuaciones de volumen, aumentando de esta manera el tamaño de la muestra por ecuación. A través del análisis de covarianza es posible examinar y determinar si las regresiones de volumen son las mismas para un par de especies. Según Snedecor y Cochran (1981), estas regresiones pueden diferir en las varianzas residuales, en pendiente o en su constante. Para comenzar este análisis se ajustó un

mismo modelo a cada una de las especies. Basándose en los resultados obtenidos por Kawas (1978), se utilizó el siguiente modelo logarítmico:

$$\ln(v) = b_0 + b_1 * \ln(d^2 * h) \quad (1)$$

donde:

\ln = logaritmo natural en base neperiana

v = volumen total con corteza (m^3)

d = diámetro con corteza a la altura del pecho o DAP (cm)

h = Altura total (m).

Como resultado de este análisis se obtuvo una matriz que identificó los pares de especies homogéneas en volumen (Salas 2000).

Ajuste de modelos. El proceso de ajuste se realizó para cada grupo identificado en el análisis de covarianza, mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. Se emplearon los modelos detallados en el cuadro 1.

CUADRO 1

Modelos de volumen total ajustados.
Total volume models fitted.

Modelo	Ecuación	Fuente
1	$v = b_0 + b_1 d d_6 h$	Salas (2000)
2	$v = b_0 + b_1 d^2 + b_2 d^2 h^2 + b_3 d_6^2$	Salas (2000)
3	$v = b_0 + b_1 d^2 h + b_2 d^2 h^2 + b_3 h^3 + b_4 d_6^2$	Salas (2000)
4	$d^2/v = b_0 + b_1(h)^{-1}$	Honer (1965)
5	$d^2/v = b_0 + b_1 \text{Log} h + b_2 \text{Log} d_6 + b_3 d^2 h$	Salas (2000)
6	$\text{Log}(v) = b_0 + b_1 \text{Log} d_6$	Salas (2000)
7	$\text{Log}(v) = b_0 + b_1 \text{Log} d + b_2 \text{Log} h + b_3 \text{Log} d_6$	Salas (2000)
8	$\ln(v) = b_0 + b_1 \ln d + b_2 \ln h$	Kawas (1978)
9	$\ln(v) = b_0 + b_1 \ln d^2 h$	Kawas (1978)
10	$\ln(v) = b_0 + b_1 \ln d_6 + b_2 \ln h + b_3 d^2 h$	Salas (2000)

donde:

v = Volumen total (m^3 scc);

d = diámetro con corteza a la altura del pecho (cm);

h = Altura total (m);

d_6 = Diámetro con corteza del fuste a los 6 metros de altura en el árbol (cm).

Selección de la ecuación. Se dividió en las siguientes cuatro etapas:

Violación de supuestos. El cumplimiento de los supuestos del análisis de regresión se verificó mediante las siguientes pruebas:

- Normalidad: Test de Kolmogorov-Smirnov (Canavos 1988)
- Homocedasticidad: Prueba de Levene (Visauta 1997)
- Autocorrelación: Test de Durbin y Watson (Canavos 1988)
- Multicolinealidad: Factor de inflación de la varianza (VIF) (Maddala 1996).

Los modelos que no cumplieron con algunos de estos supuestos fueron eliminados. La presencia de multicolinealidad se asumió para aquellas ecuaciones que presentaron VIF mayores a 10 para alguna de sus variables independientes (Kozak 1997, Salas 2000).

Bondad de ajuste. Se obtuvo el coeficiente de determinación ajustado (R^2_a), error estándar de la estimación (S_{yx}) y significación de los coeficientes de regresión. Aquellos modelos que presentaron, al menos, un coeficiente no significativo fueron eliminados. Además, se calculó el índice de Furnival (Furnival 1961) para comparar el error de ecuaciones con distintas variables dependientes.

Con el fin de seleccionar los mejores cinco modelos para la siguiente etapa de análisis, desde el punto de vista de la bondad de ajuste, se estableció, por grupo, una asignación de puntajes a los estadísticos R^2_a e IF de cada uno de los modelos ajustados, siguiendo la metodología empleada por Cao *et al.* (1980).

Capacidades predictivas. Fueron evaluadas para la totalidad de la muestra de ajuste (autovalidación) y así como también para rangos de clases de DAP las capacidades predictivas, con el fin de comparar los cinco modelos seleccionados anteriormente. Los estadísticos empleados son los siguientes:

Error cuadrático medio (ECM):

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Diferencia agregada (DA):

$$DA = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)}{n} \quad (3)$$

donde:

- n = número de observaciones de la muestra
- v_i = volumen observado para la “ i ”-ésima observación
- \hat{v}_i = volumen estimado para la “ i ”-ésima observación.

La elección de la mejor ecuación estimadora de volumen se efectuó a través de la asignación de puntajes a cada uno de los estadísticos probados. El valor 1 fue asignado a la ecuación ajustada que presentó el menor valor de ECM, hasta completar la asignación de puntajes con el total de modelos (= 5). En el caso de la DA, el mejor ranking (1) fue asignado a la ecuación que presentó el valor más cercano a cero. Posteriormente, se obtuvo la sumatoria de estos puntajes para cada modelo, donde los menores puntajes finales indican ecuaciones más exactas. En caso de que hubiera ecuaciones con el mismo puntaje se optó por la expresión matemática más sencilla.

Análisis de capacidades predictivas dentro de clases de validación. Finalmente, se calcularon la media y la desviación estándar del ECM y DA en los rangos de validación por ecuación, donde la mejor es la de una menor media y una menor dispersión en todos los rangos. Nuevamente se efectuó una asignación de puntajes a los valores de la media y desviación estándar de los estadísticos de validación para obtener la mejor ecuación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Agrupación de especies. A través del relascopio se midieron 384 árboles de las distintas especies en estudio (25 de Laurel, 29 de Lingue, 141 de Olivillo, 107 de Roble, 44 de Tapa, 13 de Tineo y 25 de Ulmo). El análisis de covarianza entregó la siguiente matriz (cuadro 2) de homogeneidad de especies en cuanto al volumen total individual.

Luego de evaluar el análisis de covarianza, en conjunto con la autoecología, la tendencia gráfica y los niveles de volumen que alcanzan las espe-

CUADRO 2

Matriz del análisis de covarianza.

Covariance analysis matrix.

	Laurel	Lingue	Olivillo	Roble	Tepa	Tineo	Ulmo
Laurel	1						
Lingue	1	1					
Olivillo	1	1	1				
Roble	0	1	0	1			
Tepa	1	0	1	0	1		
Tineo	0	0	0	0	0	1	
Ulmo	1	1	1	1	0	0	1

donde:

1: especies homogéneas en términos del volumen total individual;

0: especies no homogéneas en términos del volumen total individual.

cies, se formaron cuatro grupos homogéneos (Salas 2000). En el cuadro 3 se muestran los grupos homogéneos de especies en términos del volumen total y su respectiva estadística descriptiva.

Destaca el amplio rango de la muestra en diámetro, altura y especialmente en volumen, con un coeficiente de variación superior al 50% para todos los grupos. La muestra está constituida por las especies presentes en el bosque adulto y también en el renewal, con el objetivo de cubrir toda la amplitud diamétrica de las especies, pues, en definitiva, la autoecología de crecimiento de los individuos es la misma. La especie que hace la diferencia, en estos grupos, es el Ulmo, que a diámetros superiores a 60 cm presenta una notable mayor variación y niveles de volumen que el Olivillo, y por sus grandes envergaduras y condición de semitolerante alcanza volúmenes individuales similares al Tineo, especie que en este tipo de bosques se encuentra restringida a las mayores clases diamétricas y ocupando el dosel emergente y dominante.

Selección de la ecuación de volumen. Para cada uno de los grupos de especies (cuadro 3) se realizó el proceso de selección de ecuaciones de volumen.

Violación de supuestos. La mayoría de los modelos que emplean como variable dependiente directamente al volumen no cumplen con los supuestos de normalidad ni tampoco el de homocedasticidad. Sin embargo, la transformación de la variable dependiente de los modelos 4 al 10 logra normalizar la distribución de los residuos y la homogeneidad de la varianza.

Gran parte de los modelos que ocupan más de dos variables independientes (modelos 2, 3 y 7) no superan el supuesto de multicolinealidad, ya que presentan variables independientes correlacionadas entre sí y redundan sobre el modelamiento de la variable dependiente. Además, en los modelos que poseen como variables independientes a expresiones que implican a los mismos parámetros forestales (ya sean el DAP, altura o diámetro en altura), pero transformados (como los modelos 2 y 3), por lo general alguno de los coeficientes ajustados de estas variables independientes no son significativos (Salas 2000).

Bondad de ajuste. Para cada uno de los modelos que pasaron la etapa de cumplimiento de supuestos se estableció una asignación de puntajes en base al R^2_a y el IF, del cual se obtuvo el ranking del cuadro 4. En general, los modelos 8 y 10

CUADRO 3

Estadística descriptiva de los árboles muestra por grupos homogéneos de especies (n = 384).
Descriptive statistic of sampled trees by homogeneous group species (n = 384).

Grupo	Especie(s)	Condición	Estadígrafo	Variable				
				<i>d</i> [cm]	<i>h</i> [m]	<i>hcc</i> [m]	<i>dcc</i> [cm]	<i>v</i> [m³scc]
1 (n = 98)	Laurel-Lingue-Tepa	Ninguna	Mínimo	14,0	10,0	6,0	5,0	0,072
			Máximo	100,0	46,5	25,5	70,0	10,218
			Media	46,3	26,3	15,3	27,9	2,480
			C.V. (%)	41,4	29,3	30,3	50,0	93,1
2 (n = 149)	Olivillo-Ulmo	Ulmo con DAP ≤ 60 cm	Mínimo	13,0	10,8	6,0	6,0	0,104
			Máximo	86,0	48,0	29,5	63,0	6,645
			Media	45,9	26,3	14,7	27,7	2,220
			C.V. (%)	33,8	23,7	25,7	46,0	71,1
3 (n = 107)	Roble	Ninguna	Mínimo	11,5	9,8	6,0	5,0	0,044
			Máximo	121,0	53,5	30,5	70,0	18,515
			Media	44,7	27,1	15,2	24,4	2,79
			C.V. (%)	56,8	37,1	36,1	64,4	139,7
4 (n = 30)	Tineo-Ulmo	Ulmo con DAP > 60 cm	Mínimo	63,0	25,0	8,0	20,0	2,851
			Máximo	176,0	52,5	36,5	135,0	20,124
			Media	91,5	34,4	16,5	59,9	8,89
			C.V. (%)	30,7	22,4	32,7	43,3	54,0

se presentaron como los dos mejores en todos los grupos, salvo en el grupo 4, donde el modelo 8 fue desplazado por el modelo 6.

El modelo 5 (no logarítmico) presentó en los grupos 1, 2 y 4 los valores más bajos del IF; sin embargo, la correlación entre las variables transformadas es notoriamente menor que la correlación que se obtiene con modelos logarítmicos, por lo cual en dichos grupos siempre ocupó el tercer lugar (Salas 2000).

Capacidades predictivas. El cuadro 4 presenta el ranking de posiciones de los cinco mejores modelos al analizar sus capacidades de predicción.

El modelo 10 resulta ser el mejor modelo para todos los grupos de especies analizadas. Este modelo, de acuerdo a la bondad de ajuste, también ocupa la primera posición para los grupos 1 y 4, y en los otros grupos se encuentra dentro de los tres mejores.

Análisis de las capacidades predictivas dentro de rangos de clases diamétricas

Grupo 1 (La-Li-Te). Al analizar el comportamiento de las tres mejores ecuaciones dentro de los rangos de validación (figura 1), se observa un comportamiento relativamente homogéneo del ECM porcentual para las clases de validación.

CUADRO 4

Ranking de modelos de volumen según bondad de ajuste (a) y capacidades predictivas (b) por grupos de especies.

Ranking of volume models according to goodness of fit (a) and prediction capacities (b) by group species.

Modelo Nº	Grupo 1 (La-Li-Te)		Grupo 2 (Ul ≤ 60 y Ol)		Grupo 3 (Ro)		Grupo 4 (Ul > 60 y Ti)	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
5	3°	2°	3°	2°	4°	4°	3°	2°
6	5°	5°	5°	5°	5°	5°	2°	3°
8	2°	4°	1°	3°	1°	3°	4°	5°
9	4°	3°	4°	4°	2°	2°	5°	4°
10	1°	1°	2°	1°	3°	1°	1°	1°

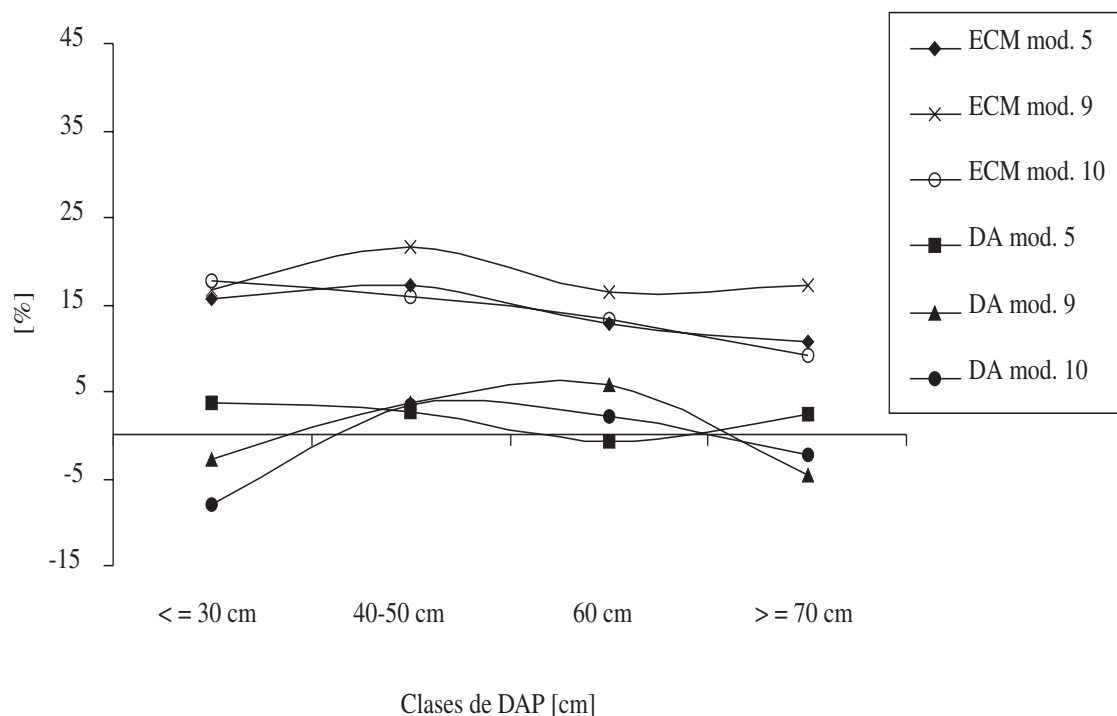


Figura 1: Estadísticos de error y de sesgo por clases de DAP en las estimaciones de volumen total de Laurel-Lingue-Tepa.

Error and bias statistics by DBH class for prediction of total volume for Laurel-Lingue-Tepa.

Casi todos los modelos presentan sesgos variables para todos los rangos, sin embargo, para las clases diamétricas extremas, los modelos 9 y 10 sobreestiman el volumen, en cambio, el modelo 5 subestima. Luego de asignar puntajes a los valores medios y desviaciones estándar de los estadísticos de validación de cada modelo, el modelo 10 presentó la mejor evaluación, comportándose con ECM que presentan la menor variación para todos los rangos estudiados y además el menor error general.

Grupo 2 ($Ul \leq 60$ y Ol). Se observa un leve aumento del ECM para las mayores clases diamétricas (figura 2). En cambio la DA presenta un comportamiento más estable, en comparación con el grupo 1, para los tres primeros rangos de validación.

En comparación con el grupo 1, tanto el ECM como la DA presentan menor dispersión. El modelo 5, entre tanto, posee el comportamiento más estable de todas las ecuaciones, lo cual es posible de apreciar en la figura 2.

Este último hecho sitúa, en el primer lugar de elección, al modelo 5 como el mejor estimador del volumen total de Ulmo con DAP menor o igual a 60 cm y Olivillo.

Grupo 3 (Ro). Los ECM de los modelos 8, 9 y 10 presentan una tendencia similar, aunque el modelo 10 posee mayores errores en la menor clase de validación.

Este grupo presenta los mayores niveles de error así como también una mayor dispersión en el comportamiento de la estimación de los volúmenes, aumentando claramente para el tercer rango de validación (figura 3), alcanzando ECM superiores a 1 m^3 por árbol en el caso de las mayores clases diamétricas. No obstante, es importante destacar que árboles de Roble alcanzan los 18 m^3 . Otro aspecto a destacar es que al comparar dichos errores con otros obtenidos para Roble, se debe considerar el rango de ajuste que las presentes ecuaciones presentan, abarcando toda la dispersión natural de Roble, siguiendo su funcionamiento natural dentro de estos ecosistemas boscosos, vale decir, desde cuando domina en bosques puros y luego en condición de emergente en rodales multietáneos y multiespecíficos.

En general, todos los modelos subestiman hasta la clase diamétrica 70 cm, no obstante, el modelo 10 presenta un alto sesgo para las clases de DAP de 60 y 70 cm, siendo prácticamente el doble que los otros modelos. Siguiendo la tendencia de los otros grupos de especies, los modelos 8, 9 y 10 sobreestiman para los DAP superiores.

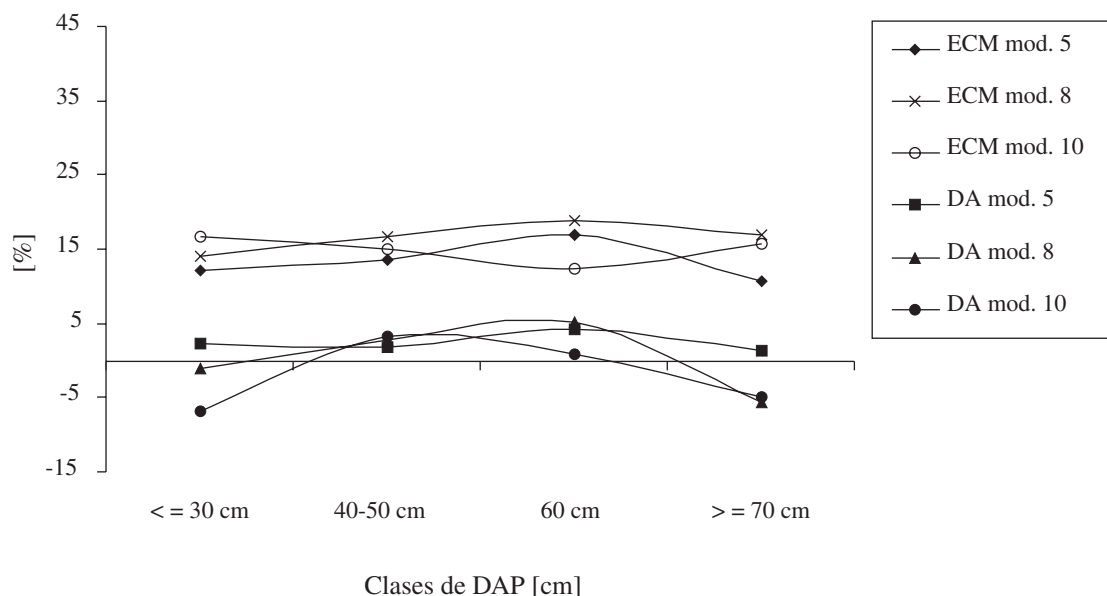


Figura 2: Estadísticos de error y de sesgo por clases de DAP en las estimaciones de volumen total de Ulmo con DAP ≤ 60 y Olivillo.

Error and bias statistics by DBH class for prediction of total volume for Ulmo (DBH ≤ 60) and Olivillo.

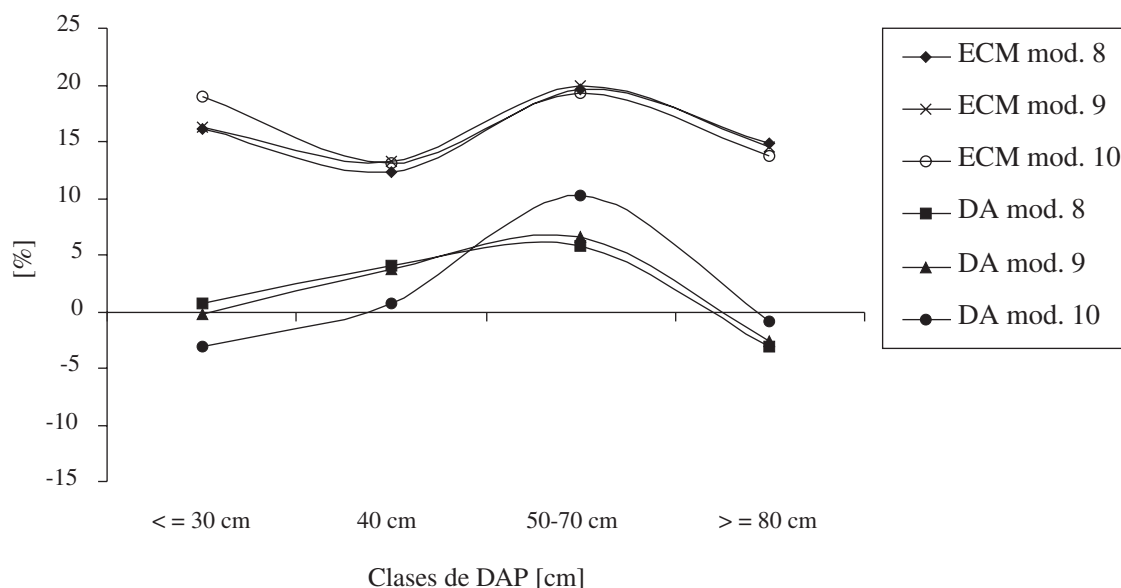


Figura 3: Estadísticos de error y de sesgo por clases de DAP en las estimaciones de volumen total de Roble.
Error and bias statistics by DBH class for prediction of total volume for Roble.

El resultado final de la asignación de puntajes da como superiores a los modelos 9 y 10; sin embargo, la marcada subestimación en una clase de validación del modelo 10 permite recomendar como mejor modelo al número 9. Además, se prefiere el uso del primer modelo, ya que no requiere de la estimación de un diámetro medido a 6 m de altura y, además, presenta un sesgo menor y menos variable que el modelo 10 (Salas 2000).

Grupo 4 (Ulmo con DAP > 60 cm y Tineo). Los ECM dentro de las clases diamétricas superiores, a pesar de ser las mayores de todos los grupos de especies analizadas, presentan poca variación, sin embargo, el modelo 6 tiene ECM mayores a 2 m³/árbol (figura 4).

Los mayores niveles de error encontrados en el último rango de validación se deben principalmente a la gran dispersión natural de los individuos de Tineo y Ulmo, que son posibles de encontrar en el bosque adulto de Rucamanque, así como también a los grandes volúmenes totales de estos individuos, cercanos a los 20 m³.

Para la clase 60, en general las ecuaciones presentan buenas estimaciones, incluso mejores que para algunos modelos de los restantes grupos de especies. El análisis de los estadísticos de validación dentro de los rangos señala como el mejor estimador al modelo 10.

En el cuadro 5 se indican las ecuaciones de volumen recomendadas para su uso en el bosque de Rucamanque, según la especie de interés.

A través de estas ecuaciones es posible conocer con mayor precisión la potencialidad silvícola de las especies que conforman el bosque de Rucamanque. Sin embargo, para conocer los niveles de existencia neta, es necesario recurrir al volteo de árboles y realizar un estudio de dichos defectos, en donde se determinen coeficientes o factores de reducción del volumen bruto a volumen neto de acuerdo a la sanidad y forma de los árboles.

CONCLUSIONES

Es posible establecer ecuaciones que permitan estimar el volumen individual de especies nativas mediante métodos no destructivos a un satisfactorio nivel de exactitud. La utilización del relascopio de espejos, en la obtención de las mediciones necesarias para cubicar los árboles, permitió estimar con un alto poder de significancia el volumen total de los árboles.

A pesar de que la medición de diámetros con el relascopio depende del grado de entrenamiento del observador, los resultados obtenidos de las medi-

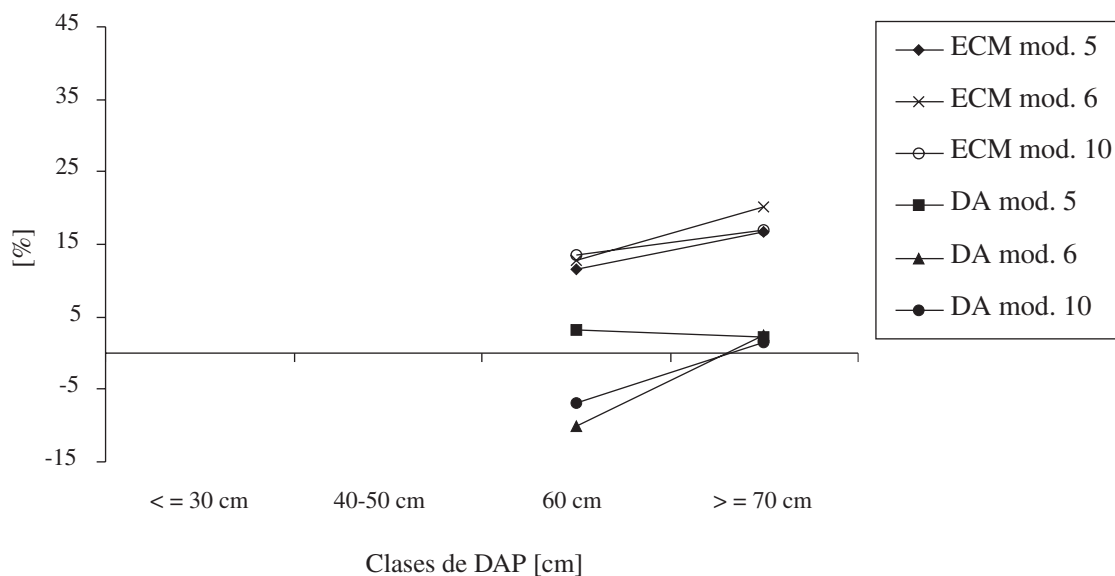


Figura 4: Estadísticos de error y de sesgo por clases de DAP en las estimaciones de volumen total de Ulmo con DAP > 60 y Tineo.

Error and bias statistics by DBH class for prediction of total volume for Ulmo (DBH > 60) and Tineo.

CUADRO 5

Ecuaciones de volumen total de las especies de Rucamanque.

Total volume equations for Rucamanque species.

Especie	Ecuación	R^2_a	IF	ECM [%]	DA [%]
Laurel, Lingue y Tapa	$\ln v = b_0 + b_1 \ln d_6 + b_2 \ln h + b_3 d^2 h$ Parámetros del modelo; $b_0 = -7,821416$ $b_1 = 1,7702$ $b_2 = 0,602463$ $b_3 = 0,0000011126$	0,983	0,224	14,65	0,148
Ulmo con DAP ≤ 60 y Olivillo	$d^2/v = b_0 + b_1 \text{Log } h + b_2 \text{Log } d_6 + b_3 d^2 h$ Parámetros del modelo; $b_0 = 5,261,096868$ $b_1 = -2,018,629615$ $b_2 = -867,4756800,$ $b_3 = 0,001910$	0,699	0,245	16,36	-2,364
Roble	$\ln v = b_0 + b_1 \ln d^2 h$ Parámetros del modelo; $b_0 = -9,918535$ $b_1 = 0,95733$	0,985	0,193	24,66	-0,688
Ulmo con DAP > a 60 cm y Tineo	$\ln v = b_0 + b_1 \ln d_6 + b_2 \ln h + b_3 d^2 h$ Parámetros del modelo; $b_0 = -7,671853$ $b_1 = 1,79194$ $b_2 = 0,595026$ $b_3 = 0,000000182$	0,918	1,216	17,55	0,902

ciones con este instrumento son auspiciosos y demuestran la viabilidad de su uso en el estudio de las especies forestales del bosque nativo chileno, evitando el volteo de árboles.

El análisis de covarianza en conjunto con el conocimiento de la estructura y dinámica de las especies que participan dentro de cualquier bosque permiten realizar una adecuada asignación de grupos homogéneos de especies forestales, a los cuales se puede ajustar, además de modelos de volumen, cualquier variable de interés.

Las ecuaciones que empleaban como variable dependiente directamente al volumen no superaron los supuestos de normalidad de los residuos ni tampoco la homogeneidad de la varianza. Estos modelos no son recomendables para usarlos en bosques nativos de gran dispersión diamétrica, en cambio, tienen un buen comportamiento en renovales con diámetro medio del rodal menor a 30 cm.

La etapa de violación de supuestos estadísticos y significancia de los coeficientes fue superada en todos los grupos por los modelos 5, 6, 8, 9 y 10.

Al evaluar las capacidades predictivas de las ecuaciones ajustadas, el mejor modelo para cada uno de los grupos fue el 10; sin embargo, al analizar el comportamiento de los modelos separando los datos de cada grupo en cuatro rangos de clases diamétricas, en dos grupos este modelo fue superado por otro.

A mayor DAP de los árboles todas las ecuaciones poseen mayores errores en términos del volumen. Sin embargo, estos errores que oscilan entre un 14 al 24%, a pesar de ser altos al compararlos con estudios realizados en bosques homogéneos (ya sean plantaciones o renovales), sólo superan 1 m³ para árboles de grandes dimensiones, con más de 10 m³ en volumen total, lo que estaría indicando el buen comportamiento estimador de las ecuaciones ajustadas en la presente investigación.

BIBLIOGRAFIA

BITTERLICH, W. 1958. "Das Neu Relaskop", *Allg. Forstztg.* 69 (23/24): 295-299.

BRAUNISCH, S. 1997. Verinselungseffekte an Waldfragmenten und ihre Konsequenzen für einen Biotopverdunstung; vegetationskundliche und ornithologische Untersuchungen im Raum Temuco (IX Región, Südkile). Diplomarbeit, Universität Bayreuth. Bayreuth, Deutschland. 111 p.

BÜRGMANN, H. 1998. *Soil Quality Changes under Pinus radiata Plantations in the IXth Region of Chile; applicability of soil microbial activity and nutrient analysis for the evaluation of sustainability*. Diplomarbeit, Universität Bayreuth. Bayreuth, Deutschland. 128 p.

CANAVOS, G. 1988. *Probabilidad y Estadística; Aplicaciones y Métodos*. Trad. por E. Urbina. Editorial McGraw-Hill. 1ª edición. México D.F., México. 651 p.

CAO, Q., BURKHART, H., T. MAX. 1980. "Evaluation of Two Methods for Cubic-Volume Prediction of Loblolly Pine to any Merchantable Limit", *Forest Science* 26 (1): 71-80.

CONAF/CONAMA/BIRF. 1999. *Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile, Informe Nacional con Variables Ambientales*. Santiago, Chile. 89 p.

DONOSO, C. 1981. *Tipos Forestales de los Bosques Nativos de Chile. Investigación y Desarrollo Forestal* (CONAF/PNUD/FAO) Documento de Trabajo N° 38. (Publicación FAO Chile). Santiago, Chile. 82 p.

DONOSO, C. 1983. Modificaciones del paisaje forestal chileno a lo largo de la historia. I Encuentro Científico Medio Ambiente Chileno. *Versiones Abreviadas* 1: 109-113.

FRANK, D. 1998. *Umweltauswirkungen des Landnutzungswandels in der IX. Region Chile; Untersuchung von Waldökosystemen und forstlichen Monokulturen am Beispiel der Umgebung Temuco*. Mensch & Buch Verlag. Berlin, Deutschland. 222 p.

FURNIVAL, G. 1961. "An Index for Comparing Equations Used In Constructing Volume Tables", *Forest Science* 7 (4): 337-341.

HAUENSTEIN, E., C. RAMIREZ, M. LATSAGUE, D. CONTRERAS. 1988. "Origen fitogeográfico y espectro biológico como medida del grado de intervención antrópica en comunidades vegetales", *Medio Ambiente* 9 (1): 140-142.

HONER, T. 1965. "A New Total Cubic Foot Volume Function", *The Forestry Chronicle* 41 (4): 475-493.

KAWAS, N. 1978. Estimación de volumen cúbico por árbol con base muestral restringida, para especies forestales nativas. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 98 p.

KOZAK, A. 1997. "Effects of multicollinearity and autocorrelation on the variable-exponent taper equations", *Can. J. For. Res.* 27: 619-629.

MADDALA, G. 1996. *Introducción a la Econometría*. Trad. por J. Jolly. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. 2ª edición. México D.F., México. 715 p.

MAGOFKE, J. 1985. "Rucamanque: Un relicto de bosque nativo en Temuco, Chile", *Frontera* 4: 65-72.

RAMIREZ, C., E. HAUENSTEIN, J. SAN MARTIN, D. CONTRERAS. 1989a. "Study of the Flora of Rucamanque, Cautín Province, Chile", *Ann. Missouri Bot. Gard.* 76 (2): 444-453.

RAMIREZ, C., J. SAN MARTIN, E. HAUENSTEIN, D. CONTRERAS. 1989b. "Estudio fitosociológico de la vegetación de Rucamanque, (Cautín, Chile)", *Svudia Botanica* 8: 91-115.

SALAS, C. 2000. Construcción de ecuaciones de volumen para las especies del bosque adulto mixto y del renoval de Roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) del Predio Rucamanque, IX Región de la Araucanía. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad de La Frontera. Temuco, Chile. 112 p.

SALAS, C. 2001. "Caracterización básica del relicto de biodiversidad Rucamanque", *Bosque Nativo* 29: 3-9.

- SNEDECOR, G., W. COCHRAN. 1981. *Métodos Estadísticos*. Trad. por J. Reinos. Compañía Editorial Continental S.A. 8ª edición. México D.F., México. 703 p.
- VEBLEN, T., D. ASHTON, F. SCHLEGEL. 1979. "Tree Regeneration Strategies in a Lowland Nothofagus Dominated Forest in South-Central Chile", *Journal of Biogeography* 6: 329–340.
- VISAUTA, B. 1997. *Análisis Estadístico con SPSS para Windows, Estadística Básica*. Editorial McGraw-Hill. Madrid, España. 304 p.