

Incorporación de la altura dominante y la clase de sitio a ecuaciones estándar de volumen para *Nothofagus antarctica* (Forster f.) Oersted

Incorporation of dominant height and site class in standard volume models for *Nothofagus antarctica* (Forster f.) Oersted

MARIA VANESSA LENCINAS¹, GUILLERMO MARTINEZ PASTUR¹, JUAN MANUEL CELLINI¹, RICARDO VUKASOVIC², PABLO PERI^{3,4}, MARIA CECILIA FERNANDEZ¹.

¹Centro Austral de Investigaciones Científicas, cc 92 (9410) Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina.

²Consultora "Servicios Forestales", Río Grande, Tierra del Fuego, Argentina.

³Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina.

⁴Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina.

E-mail: cadicforestal@arnet.com.ar; cadicforestal@gmx.net.

SUMMARY

The estimation of forest productivity is carried out using the tree volume, which is estimated directly or by using relationships or equations. Foresters must design methodologies that increase the precision and diminish the costs of carrying out a forest inventory. For these reasons, the objectives of this study were, first, to define new standard volume models (total and stem) and, secondly, to analyze their behavior in comparison to traditional models (local and standard) through their statistics and residual analysis (according to site and diameter classes). Two hundred and fifty-one specimens of *Nothofagus antarctica* throughout Tierra del Fuego (Argentina) were used, having the diameter at breast height (DBH) 7.5-61.0 cm and total height 3.5-15.0 m. Local functions ($V = f(\text{DBH})$), traditional standard equations ($V = f(\text{DBH}, \text{TH})$), non-traditional standard equations ($V = f(\text{DBH}, \text{site class})$) and a new proposal ($V = f(\text{DBH}, \text{dominant height})$) were fitted. All functions gave a good fit. Total volume models presented average percentage errors varying between 1.0% and -3.8%, and absolute values between 15% and 17%. Stem models showed average percentage errors of -1.1% to -4.1%, and absolute ones of 19% to 24%. The traditional equations result in lower absolute error while the non-traditional volume equations have lesser average percentage errors and show different behavior when site and diameter gradients were analyzed. If one considers the effort required for data capture during the forest inventory and the precision of the model for volume calculation, the non-traditional volume equations are the most suitable for this purpose. These avoid the necessity of measuring the total height of individual trees during the inventory, diminishing the costs while maintaining acceptable error levels in the estimation of volume.

Key words: Volume models, residual analysis, forest inventory, Tierra del Fuego.

RESUMEN

El cálculo de la productividad se realiza a través del volumen, que se estima por árboles tipo, relaciones o modelos. Es prioritario diseñar metodologías más precisas y de menor costo durante el inventario forestal, por lo que los objetivos fueron: a) definir nuevos modelos estándares de volumen (total y fuste), y b) analizar su comportamiento frente a modelos tradicionales (locales y estándares) a través de sus estadísticos y residuales (según clases de sitio y diámetro). Se utilizaron 251 árboles de *Nothofagus antarctica* a lo largo de Tierra del Fuego (Argentina) (DAP entre 7,5-61,0 cm y HT entre 3,5-15,0 m). Se ajustaron funciones locales ($V = f(\text{DAP})$), ecuaciones estándares tradicionales ($V = f(\text{DAP}, \text{HT})$) y no tradicionales ($V = f(\text{DAP}, \text{sitio})$), y una nueva propuesta ($V = f(\text{DAP}, \text{altura dominante})$). Todos los modelos presentaron un buen ajuste. Los de volumen total presentaron errores porcentuales

promedio que variaron entre 1,0% y -3,8%, y en valor absoluto entre 15% y 17%. Los modelos de fuste tuvieron errores porcentuales promedio que variaron entre -1,1% y -4,1%, y en valor absoluto entre 19% y 24%. Las ecuaciones estándares tradicionales son las que presentan el menor error en valor absoluto, mientras que las no tradicionales tienen los menores errores porcentuales promedio, observándose comportamientos diferentes al realizar el análisis en gradientes de clases de sitio y diámetro. Si analizamos el esfuerzo en la captura de datos durante el inventario forestal y la precisión obtenida en los modelos, se observa que las funciones no tradicionales son las más adecuadas. Las mismas evitan la medición de las alturas totales individuales, disminuyendo los costos y manteniendo niveles aceptables de error durante la estimación de los volúmenes.

Palabras claves: Modelos de volumen, análisis de residuales, inventario forestal, Tierra del Fuego.

INTRODUCCION

El cálculo de la productividad forestal se realiza usualmente a través del volumen total o el volumen aprovechable, o de alguna de las variables correlacionadas de densidad u ocupación, como el área basal. Los datos para el cálculo de la productividad se obtienen durante el inventario forestal, donde se conjugan la eficiencia en el muestreo y la precisión en los resultados, y representa la mayor parte de los gastos para este tipo de estudios.

El volumen puede estimarse a través de árboles tipo, relaciones matemáticas o modelos biométricos. Estos últimos pueden ser ecuaciones *locales* (donde el volumen está en función de una sola variable, como el diámetro) o *estándares* (donde el volumen está en función de dos o más variables, usualmente el diámetro y la altura total). El volumen de cosecha o aprovechable se calcula usualmente como un porcentaje del volumen total, o mediante complejas y engorrosas metodologías donde intervienen numerosas variables y estimaciones visuales (diámetro, clase de sitio, clase de copa, sanidad, forma, producción de trozas) (Chauchard y Carabelli 1992, Chauchard y González Peñalba 1993, Martínez Pastur *et al.* 1997a). Sin embargo, también puede estimarse mediante ecuaciones que poseen menor ajuste, pero de mayor simplicidad.

La problemática de los modelos de volumen podría resumirse como:

1. Si se incluye un mayor número de variables relacionadas en un modelo, mejor será el ajuste del mismo.
2. Cuantas más variables posea un modelo, mayor será el costo del trabajo de campo durante la toma de datos.
3. Si las variables son de difícil medición o estimación, aumentará la imprecisión del modelo.

Sin embargo, la mayor problemática relacionada con el cálculo del volumen se relaciona con el mal uso de los modelos locales. Estos modelos deben ajustarse para cada calidad de sitio en particular, ya que varía fuertemente lo que se quiere estimar (en este caso el volumen) de un lugar a otro, y se incorporan enormes errores de cálculo si se utiliza en forma extensiva una ecuación diseñada para un sitio determinado.

La bibliografía es muy amplia en lo que se refiere a modelos de volumen en *Nothofagus* para la región andino-patagónica, desde tablas y modelos locales (Mutarelli *et al.* 1968, Schmidt y Urzúa 1982, Orfila 1987, Chauchard 1991, Uriarte y Groose 1991, Carabelli 1991, Fernández *et al.* 1995, Fucaraccio *et al.* 1999) hasta modelos estándares tradicionales (Martínez Pastur *et al.* 1993, 1995, Peri 1995, Fucaraccio *et al.* 1999) y no tradicionales (Peri *et al.* 1997), realizados principalmente para *N. pumilio*.

Uno de los mayores retos de los investigadores forestales es diseñar metodologías y modelos biométricos que aumenten la precisión del cálculo de la productividad y disminuyan los costos en la toma de datos durante el inventario forestal, por lo que los objetivos del presente trabajo fueron: a) definir nuevos modelos estándares de volumen (total y de fuste), y b) analizar su comportamiento frente a modelos tradicionales (locales y estándares) a través de sus estadísticos y del análisis de sus residuales, según clases de sitio y de diámetro.

MATERIAL Y METODOS

Especie seleccionada. Los bosques de Tierra del Fuego poseen tres especies de *Nothofagus*, entre las cuales se destaca *N. antarctica* (Forster f.) Oersted (ñire, ñirre) por su amplitud ecológica y los morfotipos que presenta. Se lo puede encon-

trar en diversos ambientes, formando comunidades discontinuas al nivel del mar (Canal Beagle) hasta el límite vegetacional (Valle de Andorra) (Fernández 1993), acompañando a *N. betuloides* (Mirb.) Oersted y *N. pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser en bordes de turberas o zonas anegadas, o en forma continua en comunidades puras dominando el ecotono. En Tierra del Fuego existen 178 mil hectáreas (Collado 1999) de bosques de *N. Antarctica*, encontrándose mayormente dentro de establecimientos rurales dedicados a la ganadería ovina en la parte central de la Isla Grande. De acuerdo a los morfotipos de fiere que Ramírez *et al.* (1985) establecen para Chile, el arborescente es el más representativo para Tierra del Fuego, con un DAP que puede superar los 125 cm, alturas totales superiores a los 15 metros y anillos de crecimiento de hasta 1 cm (Martínez Pastur y Fernández 1997). Se han publicado varios trabajos sobre biometría de *N. antarctica* sobre modelos de volumen tradicionales (Fernández *et al.* 1995, Martínez Pastur *et al.* 1995), sobre crecimiento diamétrico (Martínez Pastur y Fernández 1997) e índices de sitio (Martínez Pastur y Fernández 1995).

Toma de la muestra. La toma de datos se realizó en 15 sitios a lo largo del rango de distribución de *N. antarctica* en el sector central de la Isla Grande

de Tierra del Fuego (Argentina) (figura 1), abarcando un rango de alturas dominantes de 5,6 a 14,5 metros. Se muestrearon entre 15 y 20 individuos por sitio cubriendo el rango diamétrico y de alturas de cada rodal seleccionado (Clutter *et al.* 1983, Fernández *et al.* 1993). Los árboles muestra fueron elegidos cuando no presentaron un deterioro exterior evidente (rajaduras, desprendimiento de corteza o pérdida parcial de la copa), lo cual debe tenerse en cuenta al definir la aplicación de los modelos. A cada individuo se le midió el diámetro normal a 1,3 m de altura (DAP), la altura total (HT), y diámetros en cruz cada un metro, con y sin corteza. También se calculó la altura dominante del rodal (HD) como el promedio de la altura total de los 60 árboles más altos por hectárea de cada rodal, muestreados mediante parcelas circulares. Con el rango de las alturas dominantes de la muestra se elaboró una clasificación por clases de sitio para *N. antarctica* que quedó definida como:

- Sitio I: $HD > 12,0$ m
- Sitio II: $HD > 10,0$ m y $\leq 12,0$ m
- Sitio III: $HD > 8,0$ m y $\leq 10,0$ m
- Sitio IV: $HD > 6,0$ m y $\leq 8,0$ m
- Sitio V: $HD \leq 6,0$ m

El volumen total (VTCC) incluyó la corteza, el tocón y una punta fina de hasta 5 cm. El volumen



Figura 1: Ubicación de los sitios muestreos (puntos negros) en Tierra del Fuego (Argentina). Location of the sampling areas (black marks) along Tierra del Fuego (Argentina).

comercial o aprovechable (VFSC) se midió considerando el fuste sin corteza de extracción hasta un diámetro mínimo de 15 cm, imitando la posible selección que realizaría un motosierrista durante las faenas de campo. Los posibles destinos de la madera podrían ser aserrado de madera corta, carbón, leña, postes y varas. La determinación de los volúmenes parciales se realizó mediante la fórmula de Smalian (Cailliez 1980, Clutter *et al.* 1983). Se muestreó un total de 251 árboles en total a lo largo de un gradiente de DAP de 7,5 a 61,0 cm y un rango de HT de 3,5 a 15,0 m (cuadro 1).

Modelos ensayados. Se analizaron los siguientes modelos y familia de ecuaciones, entre los clásicos citados en la literatura y aquellos no tradicionales:

- Una familia de ecuaciones locales (una ecuación por rodal muestreado), utilizando como modelo base al sugerido por Fernández *et al.* (1995), ajustado por técnicas de regresión no lineal. Este modelo es un polinomial de grado 2 llamado *Bertkhout* (Loetsch 1973) que se ca-

racteriza por responder favorablemente a una gran variedad de sitios y mantener las propiedades biológicas, al representar el DAP² al área basal y el coeficiente ajustado a la forma y la altura del árbol. El mismo se expresa como:

$$V = \frac{a}{10.000} \cdot DAP^2 \tag{1}$$

donde *a* es el coeficiente del modelo, V el volumen en m³ (VTCC o VFSC) y DAP el diámetro a la altura del pecho (cm).

- Una ecuación estándar tradicional, representada por el modelo de Schumacher-Hall, que fue seleccionado por responder favorablemente a un gran número de especies forestales (Lenhart *et al.* 1987, Shiver y Brister 1992, Pimentel Gomes y García 1993), incluyendo a *N. antarctica* (Martínez Pastur *et al.* 1995). Sus propiedades matemáticas lo asemejan en su comportamiento al biológico teórico (Pimentel Gomes y García 1993), donde la forma está representada por el coeficiente *a*, el coeficientes *b* potencia al DAP

CUADRO 1

Distribución de la muestra a lo largo de los gradientes de diámetro (DAP), altura total (HT) y clases de sitio (CS) (I a V).

Sample distribution along diameter (DAP), total height (HT) and site classes (CS) (I to V).

HT (m)	DAP (cm)					Total
	< 10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	> 40,0	
<5,0	3	16	2	0	0	23
5,1-7,5	6	40	29	8	0	83
7,6-10,0	4	25	27	12	5	74
10,1-12,5	1	5	15	22	11	54
>12,5	0	0	4	6	7	17
CS						251
I	6	16	18	21	14	75
II	1	15	14	11	6	47
III	5	22	23	8	3	61
IV	2	27	21	8	0	58
V	0	9	1	0	0	10
Total	14	89	77	48	23	251

con un valor cercano a 2, y el coeficiente c potencia a la HT con un valor cercano a 1. De este modo, el producto de las unidades de las variables dependientes se acerca a la expresión de la variable independiente (m^3). El modelo se ajustó mediante técnicas de regresión no lineal, y se expresa como:

$$V = \frac{a}{10.000} \cdot DAP^b \cdot HT^c \quad (2)$$

donde a , b , c son los coeficientes del modelo, V es el volumen en m^3 (VTCC o VFSC), DAP el diámetro a la altura del pecho (cm) y HT la altura total del árbol (m).

- Una ecuación estándar no tradicional, donde se utilizó el modelo propuesto por Peri *et al.* (1997) para *N. pumilio*. En su forma original utiliza una clasificación de clases de sitio desarrollada para *N. pumilio* (Martínez Pastur *et al.* 1997b), por lo que en este caso se utilizó la clasificación de clases de sitio propuesta para *N. antarctica* en el punto anterior. El modelo se resolvió mediante regresión no lineal, y se expresa como:

$$V = \frac{a}{10.000} \cdot (6-S)^b \cdot DAP^{c \cdot (6-S)^d} \quad (3)$$

donde a , b , c , d son los coeficientes del modelo, V es el volumen en m^3 (VTCC o VFSC), DAP el diámetro a la altura del pecho (cm) y CS la clase de sitio (de I a V incorporándose en la ecuación como números arábigos).

- Una nueva propuesta de ecuación estándar no tradicional basada en los resultados obtenidos a partir de la familia de ecuaciones locales. Se propone como metodología realizar una regresión no lineal entre los coeficientes a del modelo (1) y la altura dominante (HD) de cada rodal muestreado, de acuerdo a la siguiente función:

$$a = \frac{a'}{10.000} \cdot HD^{b'} \quad (4)$$

donde a' y b' son los parámetros de la ecuación, y a es el nuevo coeficiente de la ecuación (1) para una determinada altura dominante (HD) (m).

De esta forma la ecuación local utilizada para el modelo (1) se transforma en una ecuación estándar, ya que incorpora la HD como variable predictor. Por lo tanto, el modelo final queda definido como:

$$V = \left(\frac{a'}{10.000} \cdot HD^{b'} \right) \cdot DAP^2 \quad (5)$$

Estadísticos y validación de los modelos. La evaluación estadística se llevó a cabo a través del coeficiente de determinación (r^2), la significancia de los coeficientes de la ecuación, la relación error/modelo (R), la desviación residual estándar (DRE), el residual promedio y el análisis de sus residuales. Con los modelos ajustados se llevó a cabo una autovalidación utilizando la misma base de datos, realizando un análisis de los errores porcentuales promedio ($\% \bar{e}$) y en valor absoluto ($\% |\bar{e}|$) a través de rangos de frecuencia de diámetros y calidades de sitio. Estos últimos estadísticos se expresan de la siguiente forma:

$$\bar{e} = \left(\left(\sum_{i=1}^n e_i \right) / n \right)$$

$$|\bar{e}| = \left(\left(\sum_{i=1}^n |e_i| \right) / n \right)$$

donde n es el número de datos utilizados en el ajuste del modelo, e_i el residuo (valor observado – valor predicho) y \bar{e} el valor promedio.

RESULTADOS Y DISCUSION

AJUSTE Y ESTADISTICOS DE LOS MODELOS ENSAYADOS

Familia de ecuaciones locales (modelo 1). Los modelos locales de VTCC presentaron un buen ajuste (cuadro 2), variando sus r^2 entre 0,73 y 0,98, el DRE entre 0,01 y 0,14 m^3 , el residual promedio entre -0,001 y 0,012 m^3 y las R entre 322 y 1.672. El análisis de los residuales no presentó tendencias, estando los mismos distribuidos homogéneamente. Sin embargo, cabe destacar que los residuales promedios para todos los modelos menos uno, presentaron valores negativos, por lo que existió una subestimación para la familia de ecuaciones desarrollada.

Los modelos locales de VFSC presentaron ajustes variables de acuerdo a cada rodal muestreado (cuadro 3). Los r^2 variaron entre 0,43 y 0,98, el DRE entre 0,02 y 0,14 m^3 , el residual promedio entre $-0,057$ y $0,0037 m^3$ y las R entre 35 y 1142. En algunos sitios la variabilidad encontrada en el volumen de los fustes fue muy grande, y se vio reflejada directamente en sus estadísticos. Si bien algunos residuales fueron de gran magnitud, los mismos no presentaron tendencias durante su análisis. Finalmente, y al igual que en los modelos de VTCC, los residuales promedios para casi todas las ecuaciones presentaron valores negativos, por lo que también existió una subestimación dentro de la familia de ecuaciones desarrollada.

Ecuaciones estándares. Los parámetros y estadísticos obtenidos para las tres ecuaciones ajustadas se presentan en el cuadro 4. En el caso del modelo 2 (ecuación estándar tradicional), se observó un excelente comportamiento para *N. antarctica*. Los errores totales promedios obtenidos y el comportamiento de los residuales fueron pequeños, demostrando una vez más la adaptabili-

dad del modelo, tanto frente al volumen total como al de volumen de fuste. Cabe destacar que los residuales promedios de ambos modelos fueron sustancialmente menores que los respectivos errores promedios de los modelos locales. En la figura 2 se presenta la modelización de la ecuación a lo largo del gradiente de DAP y HT muestreados, donde puede apreciarse el comportamiento exponencial de la ecuación. Dicho comportamiento se correspondió al del volumen de un árbol frente a las variables muestreadas, tanto en el plano teórico como en el práctico.

La ecuación estándar no tradicional (modelo 3) también presentó excelentes estadísticos. Esta ecuación habría resultado de gran aplicación para *N. pumilio* (Peri *et al.* 1997) y también se presentó como un modelo alternativo importante para esta especie. El análisis de los residuales no tuvo tendencias ni desviaciones de importancia, estando influenciados principalmente por la distribución en la toma de los datos discriminados de acuerdo a las calidades de sitio planteadas. En la figura 2 se presenta el gráfico del modelo con las mismas calidades planteadas para la anterior ecuación.

CUADRO 2

Parámetros y estadísticos para los modelos locales de volumen total con corteza (VTCC) (m^3).
Parameter and statistics for the local total over-bark volume models (VTCC) (m^3).

HD	CS	Coefficiente a	r^2	DRE	Residual Promedio	R
14,5	1	5,98292105	0,940	0,1285	-0,0254	631,5
8,1	3	5,06231448	0,944	0,0486	-0,0115	571,9
6,6	4	3,54604087	0,876	0,0426	-0,0066	619,6
11,9	2	6,03820641	0,965	0,0738	-0,0212	1108,3
7,4	4	3,68371675	0,932	0,0384	-0,0047	499,4
8,0	3	3,63703298	0,935	0,0381	-0,0018	582,0
10,9	2	4,27911754	0,975	0,0498	0,0125	1196,8
12,9	1	5,74137931	0,860	0,1371	-0,0189	365,2
12,5	1	5,52727772	0,943	0,0935	-0,0050	728,8
5,6	5	2,77684219	0,732	0,0154	-0,0011	322,9
11,6	2	6,80811229	0,949	0,1343	-0,0584	534,4
12,6	1	5,94917719	0,964	0,1117	-0,0278	881,7
9,7	3	4,94805652	0,924	0,0552	-0,0149	391,1
6,0	4	3,23552216	0,928	0,0228	-0,0048	596,2
8,6	3	3,91269001	0,982	0,0411	-0,0081	1672,4

HD = altura dominante del rodal (m); CS = clase de sitio; DRE = desviación residual estándar; R = relación error/modelo.

HD = dominant height of the stand (m); CS = site class; DRE = standard residual deviation; R = ratio error/model.

CUADRO 3

Parámetros y estadísticos para los modelos locales de volumen de fuste sin corteza (VFSC) (m³).
Parameter and statistics for the local inside-bark stem volume models (VFSC) (m³)

HD	CS	Coefficiente a	r ²	DRE	Residual Promedio	R
14,5	1	4,34131814	0,888	0,1334	-0,0255	308,7
8,1	3	3,07652981	0,945	0,0279	-0,0074	623,9
6,6	4	3,05142506	0,825	0,0452	-0,0216	121,0
11,9	2	3,69660722	0,863	0,0832	0,0052	352,9
7,4	4	2,53436194	0,950	0,0225	-0,0062	633,1
8,0	3	2,18047637	0,519	0,0732	0,0037	48,3
10,9	2	2,09179434	0,963	0,0458	-0,0088	665,1
12,9	1	3,61975477	0,940	0,0525	-0,0082	983,9
12,5	1	3,39611889	0,937	0,0610	-0,0105	627,3
5,6	5	1,35753750	0,426	0,0205	-0,0019	35,3
11,6	2	4,69566992	0,925	0,1207	-0,0570	302,0
12,6	1	4,06299450	0,891	0,1452	-0,0446	234,8
9,7	3	3,05142506	0,825	0,0589	-0,0216	121,0
6,0	4	1,96650535	0,837	0,0526	-0,0045	247,8
8,6	3	2,95588642	0,977	0,0348	-0,0155	1142,3

HD = altura dominante del rodal (m); CS = clase de sitio; DRE = desviación residual estándar; R = relación error/modelo.

HD = dominant height of the stand (m); CS = site class; DRE = standard residual deviation; R = ratio error/model.

CUADRO 4

Parámetros y estadísticos de los modelos estándares.
Parameters and statistics of standard models.

Ecuación estándar tradicional	Modelo 2		
Coeficientes	a	VTCC	VFSC
	b	0,59330761	0,20379745
Estadísticos	c	2,16326966	2,32092575
	r ²	0,68172248	0,71495048
	DRE	0,943	0,930
	residual promedio	0,0928	0,0749
	R	0,0019	0,0005
		2523,5	1742,9
Ecuación estándar no tradicional	Modelo 3		
Coeficientes	a	VTCC	VFSC
	b	1,72014988	1,02362901
Estadísticos	c	0,28013192	-0,11404844
	d	2,12825251	2,17733441
	r ²	0,02393790	0,06351707
	DRE	0,932	0,912
	residual promedio	0,1014	0,0836
		-0,0018	-0,0020
		1568,6	1033,3
Nueva ecuación estándar no tradicional	Modelo 4		
Coeficientes	a	VTCC	VFSC
	b	0,83503407	0,40442818
Estadísticos	r ²	0,75505870	0,87955504
	DRE	0,829	0,860
	residual promedio	0,4535	0,3014
		-0,0018	-0,0022
			695,0

VTCC = volumen total con corteza (m³); VFSC = volumen de fuste sin corteza (m³); DRE = desviación residual estándar; R = relación error/modelo.

VTCC = total over bark volume (m³); VFSC = inside bark stem volume (m³); ERD = standard residual deviation; R = ratio error/model.

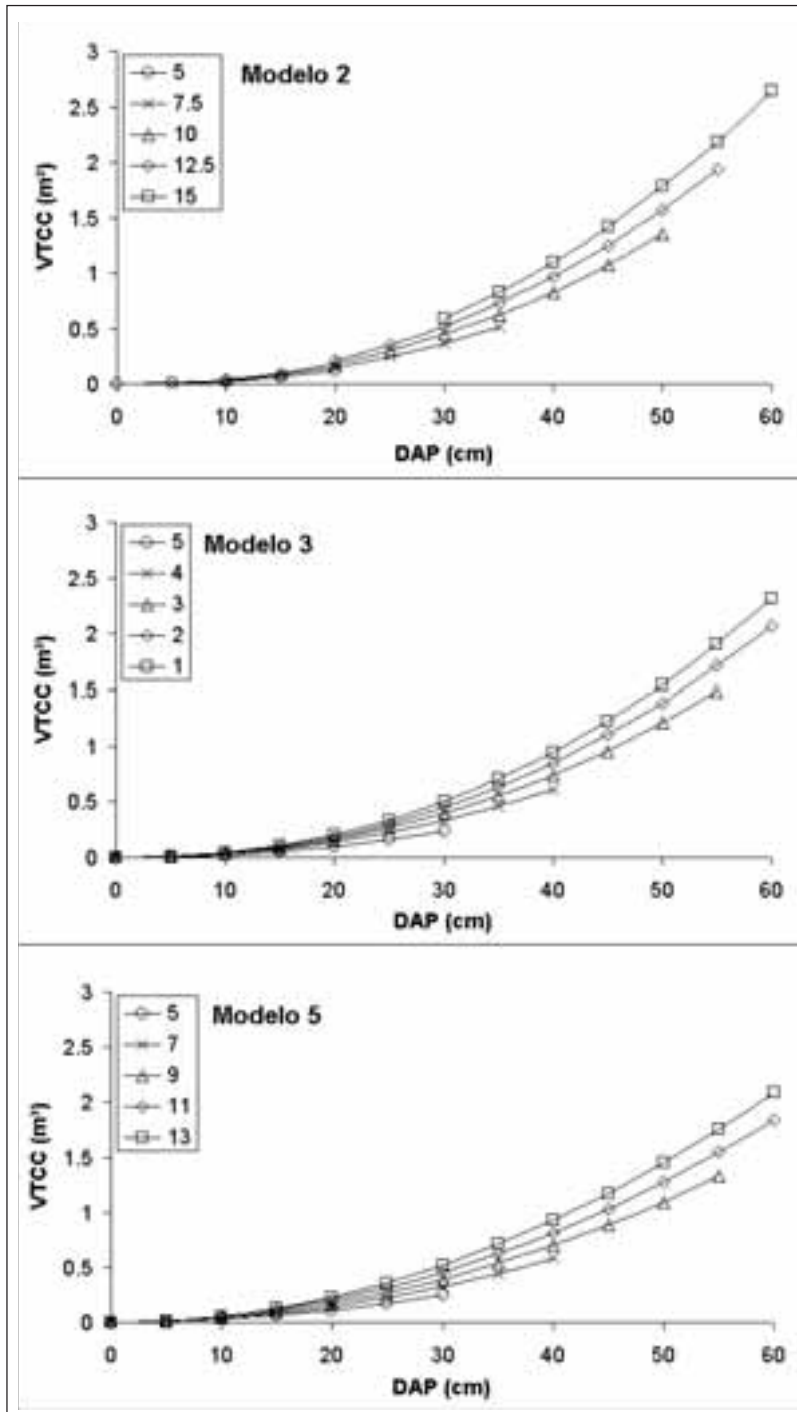


Figura 2: Modelos de volumen total con corteza (VTCC) ajustados: estándar tradicional (Modelo 2), donde los valores del cuadro representan diferentes alturas totales individuales; estándar no tradicional (Modelo 3), donde los valores del cuadro representan diferentes clases de sitio, y nuevo modelo estándar no tradicional (Modelo 5), donde los valores del cuadro representan alturas dominantes de rodal. Fitted models of total over-bark volume (VTCC): traditional standard model (Model 2) for different individual total height; non-traditional standard model (Model 3) for different site classes; and new non-traditional standard model (Model 5) for different dominant height of the stands.

La última ecuación ensayada (modelos 4 y 5) se compone de la unión de los dos modelos, siendo presentados en el cuadro 4 los parámetros y estadísticos del primero de ellos. Los estadísticos no se pueden comparar con los de las ecuaciones anteriores, por la naturaleza distinta en el ajuste, ya que en los primeros se evalúa el comportamiento del volumen frente a las variables correlacionadas, mientras que en el segundo se examina el ajuste de los coeficientes del modelo 1 con las alturas dominantes de los rodales. En la figura 2 se presenta el comportamiento del modelo 5, siendo el mismo biológica y biométricamente adecuado para un modelo de volumen. Los residuales de la unión de ambas funciones (el modelo 4 integrado al modelo 5) no presentaron tendencias significativas, siendo las mismas una consecuencia del número de muestras para cada fracción del rango de alturas dominantes muestreadas, como lo planteado para el anterior modelo.

ANALISIS DE LOS RESIDUALES

De los residuos totales. La familia de ecuaciones locales (modelo 1) fue la que presentó los mayores desvíos relativos con una subestimación aproximada del 4% (figura 3). En contraposición a esto, las ecuaciones estándares presentaron valores menores: entre $-0,9\%$ y $1,0\%$ para el volumen total y entre $-2,6\%$ y $-1,1\%$ para el volumen de fuste. Para el cálculo del volumen total con corteza (VTCC) el modelo estándar no tradicional (modelo 3) presentó el menor error promedio ($-0,1\%$), pudiendo considerarse al mismo como despreciable, mientras que en el cálculo del volumen de fuste (VFSC) el estándar tradicional (modelo 2) resultó más adecuado (errores promedios de $-1,1\%$).

El empleo de los desvíos absolutos resultó de gran utilidad para este tipo de análisis, ya que puso en evidencia la dispersión total de los datos. Si bien este análisis magnifica el error obtenido (en-

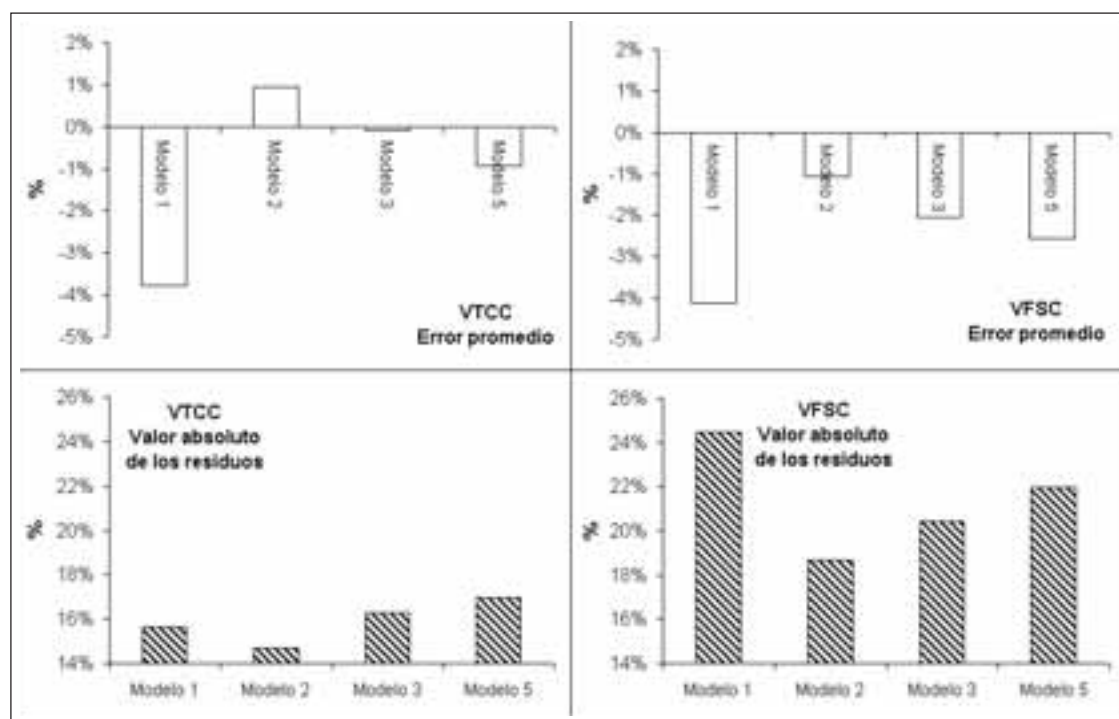


Figura 3: Errores porcentuales promedio y en valor absoluto para los modelos de volumen total con corteza (VTCC) y volumen de fuste sin corteza (VFSC) para la familia de funciones locales (Modelo 1), el modelo estándar tradicional (Modelo 2), el no tradicional (Modelo 3) y el nuevo no tradicional (Modelo 5) ajustados para *Nothofagus antarctica*.

Average error in percentage terms and absolute values for total over-bark volume models (VTCC) and inside-bark stem volume (VFSC) for the local family functions (Model 1), traditional standard model (Model 2), non-traditional standard model (Model 3) and new non-traditional standard model (Model 5) fitted to *Nothofagus antarctica*.

tre 14,7% y 24,5%) (figura 3), no cambian significativamente las apreciaciones hechas precedentemente sobre el comportamiento de los modelos frente a los desvíos totales porcentuales.

Del análisis por clases de sitio. Un análisis más detallado de los errores puede realizarse discriminando a los mismos en categorías mediante los rangos de las variables utilizadas. Muchas veces, un modelo puede presentar un muy buen comportamiento general, pero uno muy malo en forma particular, sobre todo en los extremos de los rangos considerados. Al analizar el comportamiento del modelo de VTCC a lo largo del rango de sitios considerados (figura 4) se observó que el nuevo modelo estándar no tradicional (modelo 5) presentó los menores desvíos promedios para tres de las cinco clases de sitio consideradas, siguiéndole en calidad el estándar tradicional (modelo 2). Sin embargo, al considerar los errores absolutos, los papeles se invirtieron siendo este último mucho más adecuado.

Por otra parte, al analizar el comportamiento de los modelos que estiman el VFSC (figura 5), la calidad fue mucho más heterogénea, estando los menores desvíos promedios dispersos entre los diferentes modelos. Pero al considerar los desvíos absolutos, se destacaron el modelo estándar tradicional (modelo 2) y la familia de ecuaciones locales (modelo 1). Finalmente, cabe destacar que si bien algunos modelos presentaron pequeñas mejoras en los estadísticos parciales, el comportamiento general no presentó grandes variaciones. En la figura 4 puede observarse cómo todos los modelos presentan un mismo patrón de desvíos, siendo la clase de sitio más baja la que mayor error aporta para el cálculo del volumen total. Lo mismo se observa en el cálculo del VFSC (figura 5), pero no ocurre en el caso de los modelos locales.

Del análisis por clases diamétricas. Este análisis presentó un comportamiento similar al antes enunciado para las clases de sitio, pero aportó pequeños nuevos detalles. En el cálculo del VTCC el

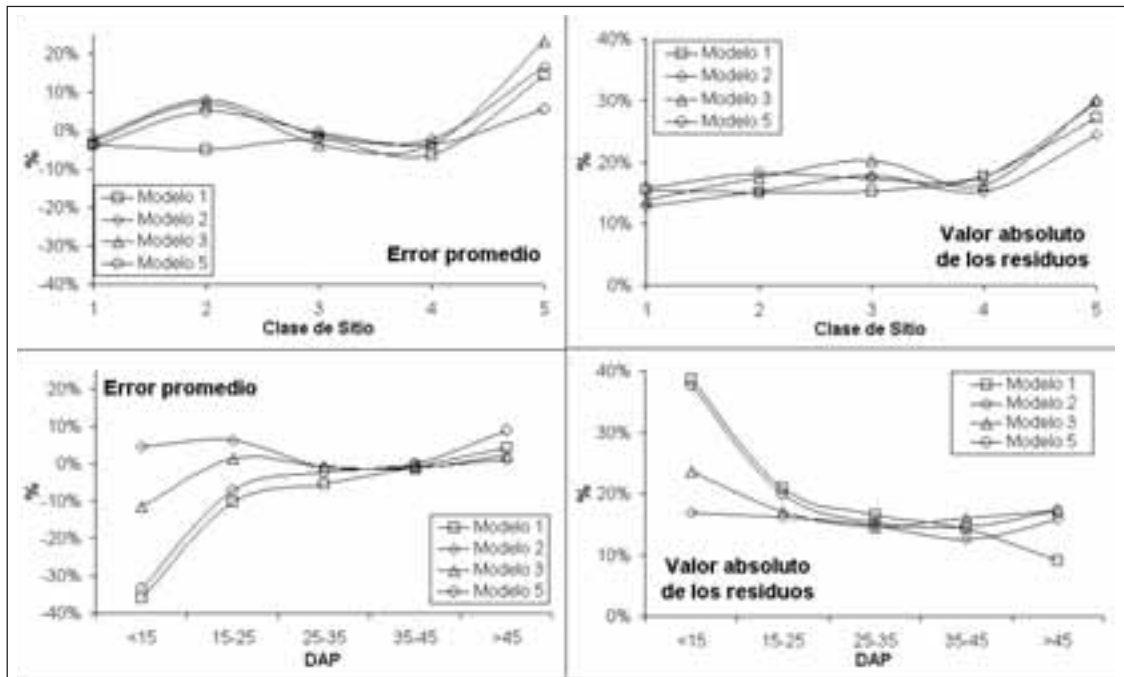


Figura 4: Errores porcentuales promedio y en valor absoluto para diferentes clases de sitio y diámetro para los modelos de volumen total con corteza (VTCC) para la familia de funciones locales (Modelo 1), el modelo estándar tradicional (Modelo 2), el no tradicional (Modelo 3) y el nuevo no tradicional (Modelo 5) ajustados para *Nothofagus antarctica*.

Average error in percentage terms and absolute values for total over-bark volume models (VTCC) and inside-bark stem volume (VFSC) for the local family functions (Model 1), traditional standard model (Model 2); non-traditional standard model (Model 3) and new non-traditional standard model (Model 5) fitted to *Nothofagus antarctica*.

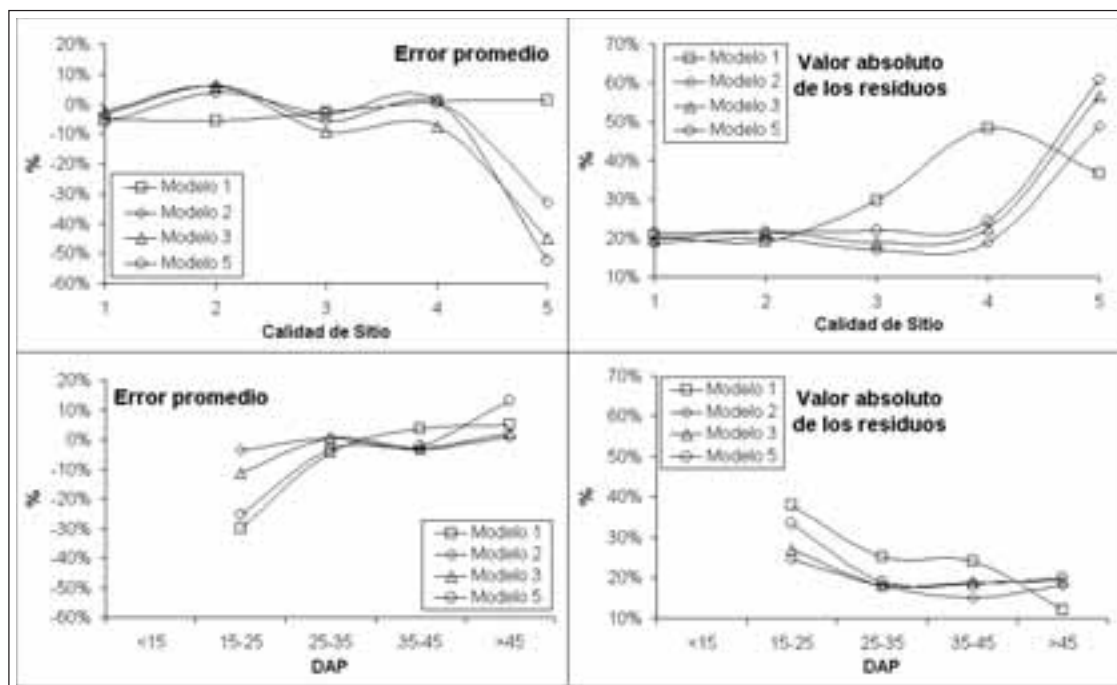


Figura 5: Errores porcentuales promedio y en valor absoluto para diferentes clases de sitio y diámetro para los modelos de volumen de fuste sin corteza (VFSC) para la familia de funciones locales (Modelo 1), el modelo estándar tradicional (Modelo 2), el no tradicional (Modelo 3) y el nuevo no tradicional (Modelo 5) ajustados para *Nothofagus antarctica*.

Average error in percentage terms and absolute values for different site classes and diameter for inside-bark stem volume (VFSC) for the local family functions (Model 1), traditional standard model (Model 2); non-traditional standard model (Model 3) and new non-traditional standard model (Model 5) fitted to *Nothofagus antarctica*.

modelo estándar tradicional (modelo 2) y el no tradicional (modelo 3) fueron los que presentaron los menores desvíos promedios (4 de las 5 clases diamétricas consideradas) (figura 4), evitando el enorme sesgo que presentaron los otros modelos para la clase de diámetro inferior (< 15 cm de diámetro). Sin embargo, el primero superó al segundo si se consideran los residuos absolutos, siendo mayor que los demás modelos en 4 de las 5 clases consideradas. Este mismo comportamiento se observó al realizar el análisis con el VFSC (figura 5).

Comparación de los modelos por precisión, costo en la toma de datos y facilidad de utilización. Los resultados de los análisis de los errores fueron variados y heterogéneos, pero se observó una clara superioridad del modelo de Schumacher-Hall (modelo 2) por encima de los demás. Sin embargo, esta superioridad en el ajuste no siempre ocurrió, y muchas veces los modelos estándares no

tradicionales lo superaron, ya que otro punto a tener en cuenta es el costo en la toma de datos a campo durante la realización del inventario forestal y la facilidad en la utilización de los modelos a desarrollar.

Los modelos locales (modelo 1) poseen las siguientes desventajas:

- Debe realizarse un modelo local para cada rodal o grupo de rodales de similares características.
- Se hace imposible su utilización si el área es muy heterogénea respecto del sitio, aportando enormes cuotas de error. Esto sucedió principalmente en bosques nativos de Argentina y Chile, donde el abuso en la utilización de este tipo de modelos ha hecho que los resultados volumétricos de los inventarios sean imprecisos e inservibles. El 63% de los modelos de volumen desarrollados en bosques de Argentina son locales (Fucaraccio *et al.* 1999) y usualmente han sido mal utilizados en forma extensiva.

En el caso del modelo estándar tradicional (modelo 2), sobresalieron su precisión y plasticidad, adaptándose a un gran número de especies y condiciones de rodal. Posee un bajo costo de realización, no requiriendo de grandes tamaños de muestra, pero posee las siguientes desventajas:

- Es preciso y muy útil cuando se lo utiliza en especies que poseen grandes variaciones en las variables independientes (amplios rangos diamétricos y de altura de los individuos), pero pierde sus cualidades cuando los rangos son estrechos.
- La toma de datos durante el inventario forestal y la utilización posterior es muy costosa, ya que requiere de la medición de alturas individuales a campo y el engorroso procesamiento de los datos.
- La medición de alturas individuales es muy imprecisa (sobre todo en bosques densos), lo que influye directamente sobre el error total (que no fue analizado en el presente trabajo – error de medición). Por otra parte, esta metodología se presta para que los operarios de campo midan algunos árboles y estimen el resto por comparación durante la realización del inventario forestal.
- Otra alternativa es medir sólo los diámetros a campo y estimar las alturas por medio de una función, para luego ser incorporadas al modelo estándar. Esto no es recomendable ya que introduce importantes errores (Gregoire y Williams 1992), por lo que no es una alternativa válida de uso.

CONCLUSIONES

Las desventajas antes enunciadas son cubiertas y salvadas por los modelos estándares no tradicionales, que disminuyen enormemente los costos en la toma de datos y facilitan la utilización de los mismos, sin perder mucha precisión. La principal ventaja reside en que se evita la toma de la totalidad de las alturas individuales durante la realización del inventario forestal, necesiéndose solamente la altura dominante del rodal (siempre que éste sea de fases de desarrollo avanzadas, como el envejecimiento o el desmoronamiento). Al ser unos pocos árboles los que se necesitan medir, la toma de datos será mucho más precisa. El nuevo modelo propuesto (modelo 5) posee la ventaja adicional

de poder utilizar en su construcción la enorme disponibilidad de ecuaciones locales ya realizadas (siempre y cuando coincidan con el modelo utilizado o se cuente con los datos originales para obtener el parámetro a). Sin embargo, cabe destacar que sólo el 2,5% de los modelos de volumen desarrollados en bosques de Argentina se corresponden a dicho modelo (Fucaraccio *et al.* 1999).

Las ecuaciones de volumen que se formulen en el futuro deberán estar orientadas al desarrollo de ecuaciones de rodal (Naesset 1994, 1995, Naesset y Tveite 1999), ya que son más precisas en términos globales y se acoplan a la utilización creciente de los muestreos por puntos por conteo angular (método de Bitterlich). Sin embargo, estos modelos son extremadamente costosos en su construcción. Por lo tanto, el desarrollo actual de los modelos de volumen debe apuntar a la construcción de ecuaciones estándares de amplio espectro y del tipo de las no tradicionales, por las ventajas que fueron aquí enumeradas y analizadas.

AGRADECIMIENTOS

A los establecimientos que permitieron el libre acceso a sus establecimientos, al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Argentina) por el financiamiento y, en especial, al Ing. Ftal. Mario Alloggia por el apoyo y gestión durante la realización del mismo.

BIBLIOGRAFIA

- CAILLIEZ, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: Estimación del volumen. Vol. 22/1. FAO-Roma. 92 p.
- CARABELLI, F. 1991. Estudio bibliográfico sobre lenga (*Nothofagus pumilio*) con énfasis en aspectos de dinámica y manejo del bosque. Universidad Nacional de la Patagonia, Centro de Investigaciones Forestales. 32 p.
- CLUTTER, J., J. FORTSON, L. PIENAAR, G. BRISTER, R. BAILEY. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. John Wiley & Sons. 333 p.
- COLLADO, L. 1999. Informe Técnico: Estratificación de los bosques fiscales de Tierra del Fuego mediante análisis de imágenes satelitales: el inventario forestal de la Provincia. Dirección de Bosques de Tierra del Fuego. 26 p. y 9 mapas.
- CHAUCHARD, L. 1991. Familia de funciones de volumen de lenga (*Nothofagus pumilio*). Actas de las VI Jornadas Técnicas: Inventarios, Modelos de producción y crecimientos forestales. Eldorado, Misiones (Argentina). 26-39.
- CHAUCHARD, L., F. CARABELLI. 1992. Sistema de clasificación de árboles en pie para la estimación de volúmenes útiles. Actas del Seminario de Manejo Forestal de la lenga

- y aspectos ecológicos asociados. Esquel, 23-24 de junio. CIEFAP, publicación técnica 8: 160-164.
- CHAUCHARD, L., M. GONZALEZ PEÑALBA. 1993. Sistema de clasificación de árboles en pie para la estimación de volúmenes aserrables. Primera convalidación. Actas de las VII Jornadas Técnicas. Ecosistemas forestales nativos: uso, manejo y conservación. 225-234. Eldorado, 10-12 de noviembre. ISIF, Universidad de Misiones.
- FERNANDEZ, C. 1993. Estudio de la variación de la cobertura vegetal en el Valle de Andorra, Tierra del Fuego, a través de cartografía de primer nivel. Actas del Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Tomo III: Protección ambiental y bosques. Trabajos voluntarios. Paraná. 143-148.
- FERNANDEZ, C., G. MARTINEZ PASTUR, F. BOYERAS, P. PERI. 1993. "Funciones de altura total y área de copa para lenga (*Nothofagus pumilio*) en Lago Gral. Vintter, Cerro Colorado, provincia del Chubut. Alcances por clases de exposición y altitud", *Revista Ciencia e Investigación Forestal* 7 (2): 315-337.
- FERNANDEZ, C., G. MARTINEZ PASTUR, F. BOYERAS, M. ALLOGGIA, R. VUKASOVIC. 1995. Estimación de la producción para Ñire en Tierra del Fuego: 1. Análisis de forma y ecuaciones locales de volumen para diferentes condiciones de sitio. Actas IV Jornadas Forestales Patagónicas. 137-144. San Martín de los Andes. 24-27 octubre.
- FUCARACCIO, F., G. STAFFIERI, E. WABÖ. 1999. Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y tablas de volumen en la República Argentina. Informe Técnico UNLP. Fac. de Cs. Agr. y Ftal. 26 p.
- GREGOIRE, T., M. WILLIAMS. 1992. "Identifying and evaluating the components of non-measurement error in the application of standard volume equations", *The Statistician* 41: 509-518.
- LENHART, J., T. HACKETT, C. LAMAN, T. WISWELL, J. BLACKARD. 1987. "Tree content and taper functions for loblolly and slash pine trees planted on non-old fields in East Texas", *Southern Journal Applied Forestry* 11: 147-151.
- LOETSCH, F., F. ZÖHER, K. HALLER. 1973. *Forest Inventory*. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München. 469 p.
- MARTINEZ PASTUR, G., C. FERNANDEZ. 1995. Estimación de la producción para Ñire en Tierra del Fuego: 3. Ecuaciones de crecimiento para diferentes sitios y primeros resultados en la construcción de Índices de Sitio. Actas IV Jornadas Forestales Patagónicas. 1-11. San Martín de los Andes. 24-27 octubre.
- MARTINEZ PASTUR, G., C. FERNANDEZ. 1997. "Crecimiento diamétrico de *Nothofagus antarctica* en Tierra del Fuego para diferentes sitios y status de competición", *Interciencia* 22 (2): 87-91.
- MARTINEZ PASTUR, G., C. FERNANDEZ, P. PERI, F. BOYERAS. 1993. "Ecuaciones estándar de volumen total para la lenga (*Nothofagus pumilio*) de la margen sur del lago General Vintter y Cerro Colorado (Provincia del Chubut), Argentina", *Revista de la Facultad de Agronomía* 69 (1): 5-12.
- MARTINEZ PASTUR, G., C. FERNANDEZ, F. BOYERAS, M. ALLOGGIA. 1995. Estimación de la producción para Ñire en Tierra del Fuego: 2. Ecuaciones estándar de volumen. Actas IV Jornadas Forestales Patagónicas. 145-150. San Martín de los Andes. 24-27 octubre.
- MARTINEZ PASTUR, G., P. PERI, R. VUKASOVIC, J. CELLINI, C. SPAGARINO, D. SHARPE. 1997a. Funciones de rendimiento volumétrico para un bosque de *Nothofagus pumilio* de calidad III y un aserradero mediano en Tierra del Fuego. Actas II Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Tomo Industria y Comercio. 123-132. Posadas. 13-15 agosto.
- MARTINEZ PASTUR, G., P. PERI, R. VUKASOVIC, S. VACCARO, V. PIRIZ CARRILLO. 1997b. "Site index equation for *Nothofagus pumilio* Patagonian forest", *Phyton* 6 (1/2): 55-60.
- MUTARELLI, E., E. ORFILA, C. ALONSO. 1968. "Tabla local de cubicación para lenga (*Nothofagus pumilio*) en la zona del arroyo Llodconto, Cuenca del Lago Mascarid, provincia de Río Negro", *Revista Forestal Argentina* 12 (1): 22-31.
- NAESSET, E. 1994. "Stand volume function for *Pinus sylvestris* in western Norway", *Medd. Skogforsk* 47 (3): 1-16.
- NAESSET, E. 1995. "Stand volume function for *Picea abies* in western Norway", *Scand. J. For. Res.* 10: 42-50.
- NAESSET, E., B. TVEITE. 1999. "Stand volume functions for *Picea abies* in eastern, central and northern Norway", *Scand. J. For. Res.* 14: 164-174.
- ORFILA, E. 1987. "Tabla local de cubicación para *Nothofagus pumilio*, en la margen sur del lago General Vintter, provincia de Chubut, República Argentina", *Revista de la Facultad de Agronomía* 69 (1): 5-12.
- PERI, P. 1995. Ecuaciones estándar de volumen bruto y neto para lenga (*Nothofagus pumilio*) del Valle del Río las Vueltas, provincia de Santa Cruz, Argentina. Actas IV Jornadas Forestales Patagónicas. 194-204. San Martín de los Andes. 24-27 octubre.
- PERI, P., G. MARTINEZ PASTUR, B. DIAZ, F. FUCARACCIO. 1997. Uso del índice de sitio para la construcción de ecuaciones estándar de volumen total de fuste para lenga (*Nothofagus pumilio*) en Patagonia Austral. Actas II Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Tomo Bosques Nativos y Protección Ambiental. 309-316. Posadas, 13-15 agosto.
- PIMENTEL GOMES, F., C. GARCIA. 1993. A determinação de equações volumétricas na Engenharia Florestal. Curso de Regresión aplicada a la Silvicultura y la Investigación agronomica. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales-UNLP.
- RAMIREZ, C., M. CORREA, H. FIGUEROA, J. SAN MARTIN. 1985. "Variación del hábito y del hábitat de *Nothofagus antarctica* en el centro sur de Chile", *Bosque* 6 (2): 55-73.
- SCHMIDT, H., A. URZUA. 1982. Transformación y manejo de los bosques de lenga en Magallanes. Fac. de Cs. Agr. Vet. y Ftal., Departamento de Silvicultura y Manejo. CONAF. Ciencias Agrícolas 11. 62 p.
- SHIVER, B., G. BRISTER. 1992. "Tree and stand volume functions for *Eucalyptus saligna*", *Forest Ecology and Management* 47: 211-223.
- URIARTE, A., H. GROSSE. 1991. Los bosques de lenga. Una orientación para su uso y manejo (recopilación bibliográfica). Informe técnico 126. CORFO-INFOR.