

# MODELOS DE DIÁMETRO PARA LA FISCALIZACIÓN DE BOSQUES APROVECHADOS DE LENGA (*Nothofagus pumilio*).

## DIAMETER MODELS FOR THE FISCALIZATION OF HARVESTED LENGA (*Nothofagus pumilio*) FORESTS.

Guillermo Gea Izquierdo<sup>12</sup>  
Guillermo Martínez Pastur<sup>23</sup>  
Juan Manuel Cellini<sup>45</sup>  
María Vanessa Lencinas<sup>24</sup>  
Ignacio Mundo<sup>56</sup>  
Sarah Burns<sup>56</sup>  
Jorge Bozzi<sup>56</sup>

<sup>1</sup> Ing. de Montes. Email: [guigeiz@gmx.net](mailto:guigeiz@gmx.net).

<sup>2</sup> Centro Austral de Investigaciones Científicas. cc 92 (9410) Ushuaia, Tierra del Fuego (Argentina).

<sup>3</sup> Ing. Forestal. (Mag. Cs. Agrs.). Email: [cadicforestal@arnet.com.ar](mailto:cadicforestal@arnet.com.ar).

<sup>4</sup> Ing. Forestal.

<sup>5</sup> Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. cc 31 (1900) La Plata, Buenos Aires. Email: [dasometria@ceres.agro.unlp.edu.ar](mailto:dasometria@ceres.agro.unlp.edu.ar).

<sup>6</sup> Estudiante Ing. Forestal

### SUMMARY

In Tierra del Fuego forest harvesting is carried out mainly over old growth forests growing in public land. There is little available information of these harvested forests, being necessary to rebuild previous forest structure in research and government control works. In these cases accuracy in the estimations is an important goal. Hence, two diameter models that enable us to rebuild any previous structure from the remaining stumps were developed:  $DAP = 0.858274 \times Dtoc$ , ( $r^2 = 95.95$ ; MAE = 2.38 cm; ESE = 3.55 cm) y  $DAPcc = 1.0661 \times DAPsc$ , ( $r^2 = 99.57$ ; MAE = 0.53 cm; ESE = 0.75 cm). The use of these models and the influence of different qualitative variables such as site index, crown class and development phase are discussed. Simplicity of the models does not reduce accuracy in the estimations, resulting appropriate for the whole range of diameters (DBH > 10 cm) and any category of site index, crown class or development phase.

**Key words:** forest management, silviculture, simple linear regression, harvesting, Tierra del Fuego.

### RESUMEN

En Tierra del Fuego los aprovechamientos forestales se realizan principalmente sobre bosques primarios en terrenos fiscales. Existe poca información disponible sobre estos bosques aprovechados, siendo necesario reconstruir la estructura forestal previa a la corta, tanto en trabajos de investigación como fiscalización. En estos casos la precisión de las estimaciones adquiere fundamental importancia. Por ello, se desarrollaron dos modelos de diámetro que permiten la estimación de la estructura previa a partir de tocones:  $DAP = 0,858274 \times Dtoc$ , ( $r^2 = 95,95$ ; MAE = 2,38 cm; ESE = 3,55 cm) y  $DAPcc = 1,0661 \times DAPsc$ , ( $r^2 = 99,57$ ; MAE = 0,53 cm; ESE = 0,75 cm). Se discute el uso de los modelos y la influencia

de variables cualitativas de clase de sitio, social y fase de desarrollo. El empleo de estos modelos sencillos no resta precisión a la estimación, resultando apropiados para todo el rango diamétrico ( $DAP > 10$  cm), independientemente de la calidad de sitio, clase social o fase de desarrollo.

**Palabras clave:** manejo forestal, silvicultura, regresión lineal simple, aprovechamiento, Tierra del Fuego.

## INTRODUCCIÓN

Es bien conocida la importancia económica y ecológica de los bosques de *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser (lenga) en Patagonia sur (Martínez Pastur *et al.*, 2000), donde gran parte de los trabajos existentes centran su estudio sobre rodales primarios sin intervención. Actualmente, en la provincia de Tierra del Fuego (Argentina) aún se siguen explotando este tipo de bosques primarios, principalmente mediante el sistema de regeneración de cortas de protección (Schmidt y Urzúa, 1982). Existe poca información disponible sobre los bosques aprovechados, que llegan a 90 mil ha en el sector argentino (Collado, 2001). Asimismo, para poder reconstruir la información necesaria para modelizar la estructura forestal previa a la corta, tanto en trabajos de investigación como de fiscalización, se hace necesaria la disponibilidad de modelos biométricos específicos (Martínez Pastur *et al.*, 2002). Uno de ellos es la estimación del diámetro normal a la altura del pecho ( $DAP$ ), con o sin corteza, a partir del diámetro del tocón ( $Dtoc$ ), ya que gran parte de las funciones están referidos al primero. Por ejemplo, los modelos de volumen total (Peri *et al.*, 1997), volumen aprovechable (Martínez Pastur *et al.*, 1997a) o crecimiento (Peri y Martínez Pastur, 1996; Díaz *et al.*, 1998). Por esta razón, el objetivo de este trabajo es la elaboración de dos modelos que relacionan el  $DAP$  con el  $Dtoc$  y el diámetro ( $D$ ) con corteza ( $Dcc$ ) y sin corteza ( $Dsc$ ), analizando la influencia de la calidad de sitio, fase de desarrollo y clase social.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Datos empleados: Se emplearon dos bases de datos para la estimación de las ecuaciones: (a) *Modelo  $DAP - Dtoc$* : los datos usados para estimar las regresiones entre el  $DAP$  (diámetro normal a 1,3 m de altura) y el  $Dtoc$  (diámetro normal 0,3 m de altura) en árboles mayores de 10 cm, fueron tomados con forcípula en 1602 árboles de 25 rodales de bosques de lenga aprovechados a lo largo de la Isla Grande de Tierra del Fuego (Argentina). No se muestrearon árboles con tumores, costillas o engrosamientos que se consideraran anormales. Asimismo, a cada árbol se le determinó la clase social y la fase de desarrollo, de acuerdo a las clasificaciones propuestas por Schmidt y Urzúa (1982). Por otra parte, en cada rodal se determinó la calidad de sitio ( $CS$ ) según lo propuesto por Martínez Pastur *et al.* (1997b), a partir de la altura de los 30 árboles más altos por hectárea. (b) *Modelo  $D$  con corteza -  $D$  sin corteza ( $Dcc - Dsc$ )*: se usaron 1192 datos provenientes de un muestreo realizado sobre un bosque primario en la Ea. San Justo. En los árboles se midió con forcípula el  $D$  en dos sentidos y sus respectivos espesores de corteza, usándose la media de estas dos medidas como valores para estimar las regresiones. Se supuso el espesor de corteza independiente de la altura del fuste pero dependiente del diámetro de la sección. Dicha muestra se discriminó de acuerdo a la clase de sitio del rodal.

Modelos ensayados: Se ajustaron regresiones lineales para el cálculo del *DAP* a partir del *Dtoc* y del *Dcc* a partir del *Dsc*, del tipo:

$$Y = a + X \quad (1)$$

La ordenada al origen se mantuvo en un valor nulo de modo de conservar la lógica biológica. Se realizó un modelo con la totalidad de los datos, y familias de ecuaciones para distintas fases de desarrollo, clases de copa y clases de sitio, comparando estas últimas mediante análisis de covarianzas (*ANCOVA*) antes de ajustar los modelos para determinar diferencias o similitudes entre grupos que pudieran justificar la separación de la muestra.

Por otra parte, se ensayaron modelos mixtos que incluyen una función realizada a partir de los resultados del parámetro “*u*” del modelo (1) en las diferentes categorizaciones de las variables estudiadas. La función ensayada es del tipo:

$$DAP = f(x) \times Dtoc \quad (2)$$

donde *f(x)* está es función de alguna de las variables estudiadas. Se ajustaron tres tipos, dos lineales y otro basado en Peri *et al.* (1997):

$$(a) f(x) = a + \ln(CS), \text{ para el caso “DAP - Dtoc”} \quad (3)$$

$$(b) f(x) = a + b CS, \text{ para el caso “Dcc - Dsc”} \quad (4)$$

$$(c) f(x) = a (b - CS)^c, \text{ para ambos casos} \quad (5)$$

Se estudió la distribución de pendientes de las relaciones *DAP - Dtoc* estimadas según las diferentes alturas dominantes a los 60 años (*SI<sub>60</sub>*) en m (según Martínez Pastur *et al.*, 1997b). Los modelos ajustados fueron comparados a partir de un análisis de residuales (*ANARE*) y de sus estadísticos de ajuste (*r*<sup>2</sup> ajustado por grados de libertad, error absoluto medio y desviación estándar estimada).

## RESULTADOS

El *ANCOVA* entre las *CS*, única variable en que los rangos de datos eran comparables, se detectó interacción significativa y, por tanto, ausencia de paralelismo entre rectas (*F* (3, 1594) = 8,21, *p* < 0,000, para *DAP - Dtoc*; *F* (3, 1183) = 14,207, *p* < 0,000 para *Dcc - Dsc*). Es por ello que se ajustaron distintas regresiones lineales para cada *CS*. De igual manera, se procedió con el resto de las variables, estimándose una regresión por nivel.

Familia de ecuaciones *DAP - Dtoc*: Los modelos ajustados se presentan a continuación.

(a) Modelo con los datos totales o global (Figura 1-A):

$$DAP = 0,858274 \times Dtoc \quad (r^2 = 99,21; MAE = 2,38 \text{ cm}; ESE = 3,55 \text{ cm})$$

Las regresiones parciales por *CS*, fase de desarrollo y clase social mostraron muy buenos ajustes, con *r*<sup>2</sup> superiores al 98,92% en todos los casos, *MAE* entre 1,3 y 4,1 cm y *ESE* entre 1,2 y 5,5 cm (máximos para los árboles en fase de desmoronamiento).

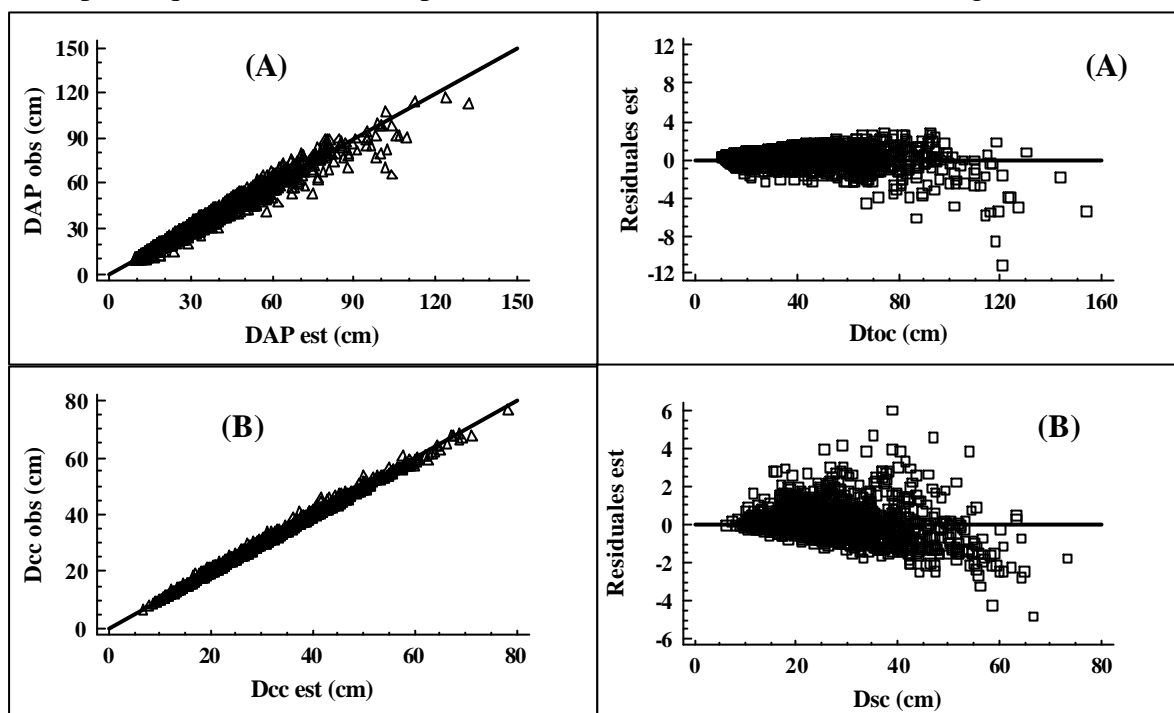
(b) Modelo del tipo 3 integrado en el tipo 2 (Figura 2-1):

$$a = 0,798167 + 0,0471314 \times \ln(CS) \quad (r^2 = 91,67; MAE = 0,006; ESE = 0,003)$$

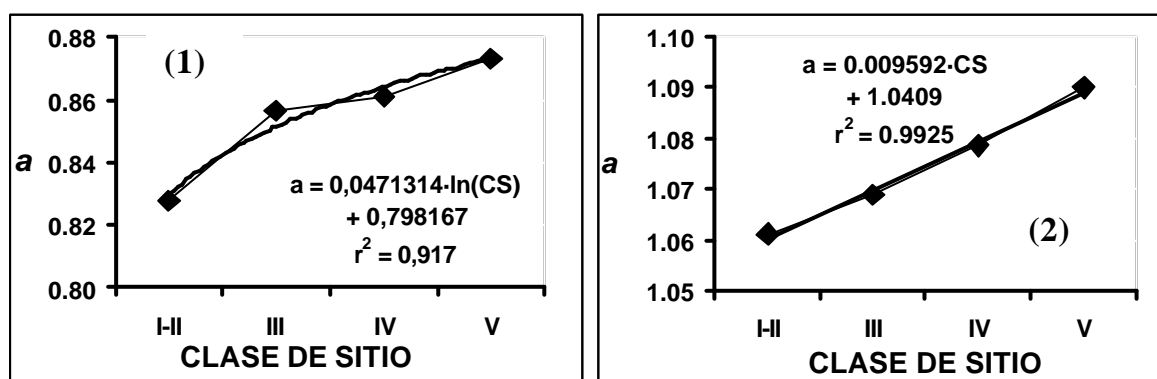
(c) Modelo del tipo 5 integrado en el tipo 2:

$$a = 1,30263 \times (14,5 - CS)^{(-0,176244)} \quad (r^2 = 79,79; MAE = 0,005; ESE = 0,009)$$

Previo al ajuste de estos modelos, se analizó el comportamiento de las pendientes estimadas de acuerdo al  $IS_{60}$  (m) del rodal. Sus  $r^2$  individuales superaron todos el 99,8%. Sin embargo, no se observó una correlación entre la pendiente de las regresiones y el índice de sitio, por lo que se decidió incorporar a la variable  $CS$  en los modelos en lugar del  $IS_{60}$ .



**Figura 1.** Gráficos de regresión y residuales  $DAP - Dtoc$  (A) y  $Dcc - Dsc$  (B) para el modelo con los datos totales.  $DAP$  = diámetro a la altura del pecho,  $Dtoc$  = diámetro de tocón, *obs* = observado, *est* = estimado. Regression and standardised residuals graphs of  $DAP - Dtoc$  (A) and  $Dcc - Dsc$  (B) models for all the data range.  $DAP$  = diameter breast height,  $Dtoc$  = stump diameter, *obs* = observed, *est* = estimated.



**Figura 2.** (1) Pendientes de  $DAP-Dtoc$  según  $CS$ . (2) Ídem anterior pero con  $Dcc-Dsc$ .

Regressions of slopes fitted for  $CS$  models: (1)  $DAP-Dtoc$  slopes as a function of  $CS$ . (2) The same as the previous one but for  $Dcc-Dsc$ .

#### Familia de ecuaciones $Dcc-Dsc$ :

(a) Modelo con los datos totales o global (Figura 1-B):

$$Dcc = 1,0661 \times Dsc \quad (r^2 = 99,95; MAE = 0,53 \text{ cm}; ESE = 0,75 \text{ cm})$$

Las regresiones parciales por CS presentaron buenos ajustes, con  $r^2$  superiores al 99%, un MAE promedio de 0,65 cm y un ESE promedio de 0,65 cm.

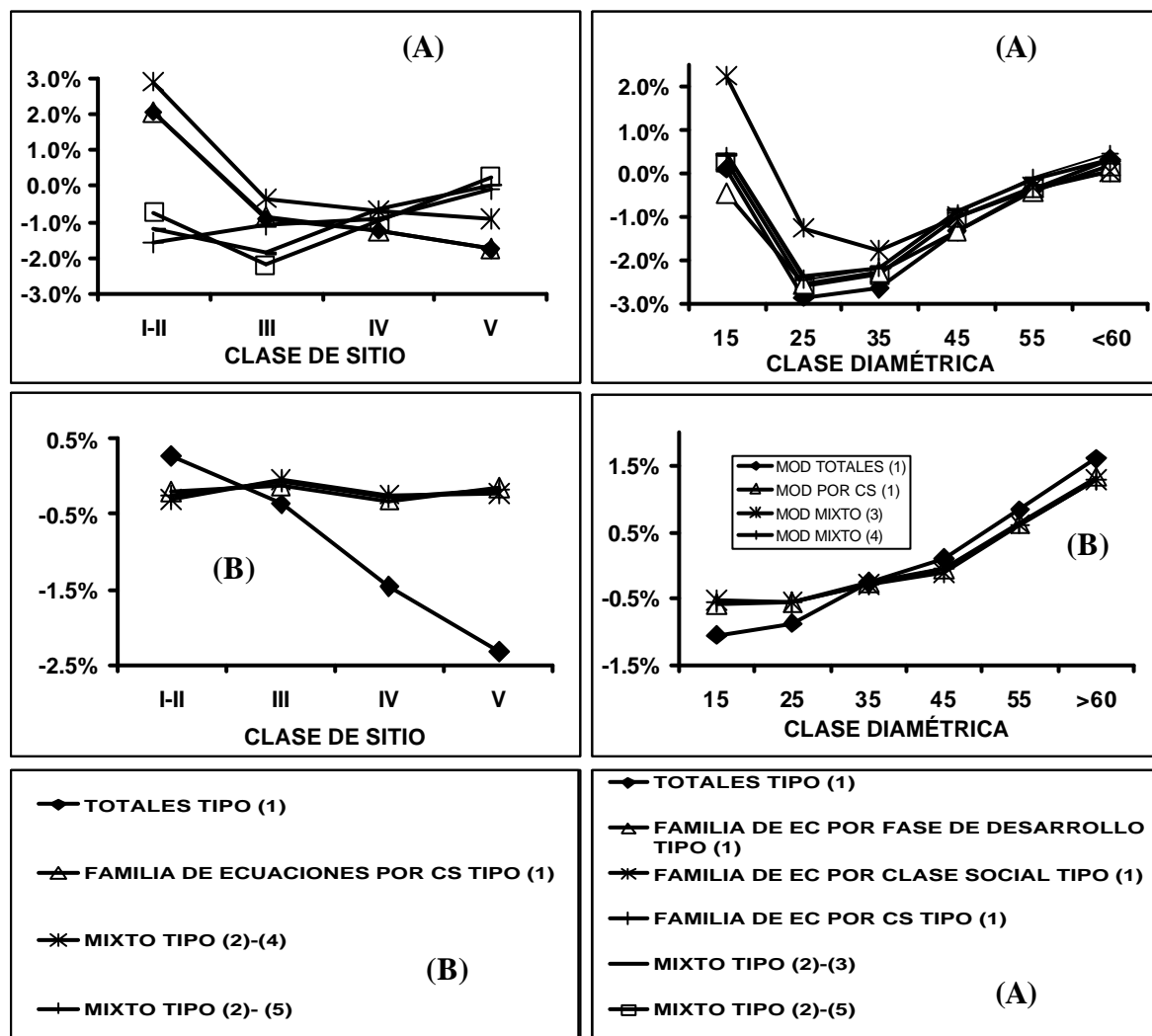
(b) Modelo del tipo 4 integrado en el tipo 2 (Figura 2-2):

$$a = 1,0409 + 0,009592 \times CS \quad (r^2 = 98,88; MAE < 0,001; ESE = 0,001)$$

(c) Modelo del tipo 5 integrado en el tipo 2:

$$a = 1,35772 \times (14,5 - CS)^{-0,0978086} \quad (r^2 = 99,74; MAE < 0,001; ESE < 0,001)$$

Análisis de los residuales: Se analizaron los residuales en forma porcentual de acuerdo a las clases de sitio y diamétricas (CD), respecto de las variables medias observadas en cada clase. Al analizar los residuales porcentuales relativos en el modelo  $DAP - Dtoc$  se observaron ligeras tendencias al analizarlos según clases de sitio (Figura 3-A). Se observaron dos grupos, uno integrado por los modelos mixtos y la familia de funciones según calidades de sitio y otro



**Figura 3. Análisis de residuales relativos de los modelos estimados de  $DAP - Dtoc$  (A) y  $Dcc - Dsc$  (B).**  $DAP$  = diámetro a la altura del pecho (cm);  $Dtoc$  = diámetro de tocón (cm);  $Dcc$  = diámetro con corteza (cm);  $Dsc$  = diámetro sin corteza (cm); CS = clase de sitio; Ec = ecuación. Residual analysis of the fitted models of  $DAP - Dtoc$  (A) and  $Dcc - Dsc$  (B).  $DAP$  = diameter breast height (cm);  $Dtoc$  = stump diameter (cm);  $Dcc$  = over bark diameter (cm);  $Dsc$  = inside bark diameter (cm); CS = site class; Ec = equation..

por el resto, no destacándose ninguno en particular. Al analizar los residuos según clases diamétricas se observa el mismo comportamiento, con una leve mejora de la familia de funciones discriminadas según clases sociales.

Al analizar los residuales porcentuales relativos en el modelo  $Dcc - Dsc$  se observaron tendencias al analizar según clases de sitio (Figura 3-B). El modelo que incluye a todos los datos presenta mayores errores en las calidades  $IV$  y  $V$ , si lo comparamos con los modelos mixtos, los cuales presentan un comportamiento similar entre ellos. En menor medida ocurre al discriminar según clases de diámetro, adoptando el modelo con los datos totales los valores extremos.

No se incluyen los resultados de los residuales absolutos. En el caso  $Dcc-Dsc$  presentan unas tendencias semejantes a las ya comentadas para los relativos, con un peor (siempre ligero, comportamiento de la ecuación global tanto por  $CS$  (valores entre 1,4 y 2,5%) como por  $CD$  (valores entre 1,6 y 2,2%). En el caso de  $DAP-Dtoc$ , por  $CS$  los residuales absolutos (valores entre 6,2 y 7,0%) no muestran diferencias entre modelos; por  $CD$  la familia de ecuaciones por clase social presentan una ligera mejoría (menor del 1%) en las clases diamétricas inferiores, resultando el resto muy semejantes (valores entre el 6,1 y 8,2%).

## DISCUSIÓN

Todos los modelos ensayados presentaron buenos ajustes y valores residuales reducidos, sin embargo mostraron diferentes comportamientos en el análisis de residuales relativos.

En los modelos que ajustaron  $DAP - Dtoc$ , no hubo alguno que se destaque al analizar por  $CS$ , correspondiendo en cada clase de sitio el menor residual a un modelo diferente. Es por ello, que el modelo más sencillo tiene que ser el seleccionado (modelo con los datos totales). Cuando se analizaron de acuerdo a las  $CD$ , los menores errores se encontraron entre las clases 20-30 y 30-40 cm de  $DAP$ , quizá debido a que en dichas clases se concentran el mayor número de observaciones (40,4%). El modelo que se destaca es el de familia de ecuaciones por clases sociales, posiblemente debido a que para una misma clase diamétrica, los individuos suprimidos poseen una forma diferente que los individuos dominantes que tienen un mejor anclaje en las raíces que afectan la forma del tocón. Posee el inconveniente de su complejidad al ser necesario el uso de varias ecuaciones.

En los modelos que ajustaron  $Dcc - Dsc$ , según  $CS$ , el modelo con los datos totales presentó errores más importantes que el resto, que se comportaron homogéneamente. Es por ello que sería conveniente incluir esta variable en la estimación del espesor de la corteza, al verse afectada por la calidad de sitio. Lo mismo se observa al analizar por clase diamétrica, donde el modelo global exhibe el peor comportamiento. La calidad de sitio también influye en el espesor de la corteza de acuerdo a la clase diamétrica considerada. Para dos calidades de sitio, un árbol arriba a un diámetro determinado a edades diferentes, y la edad es un factor que influye significativamente en el ancho de la corteza. Esta es proporcionalmente más fina en una fase de crecimiento inicial que en una fase de desarrollo avanzada.

## CONCLUSIONES

Los modelos ajustados presentaron un muy buen ajuste. La incorporación de variables a los modelos, mediante modelos mixtos, no mejoró sustancialmente el ajuste total ni parcial discriminado según clases de sitio, fases de desarrollo o clases sociales (rangos de errores del 2%). El uso de cualquiera de los modelos globales resulta apropiado cualquiera que sea el bosque original, manteniéndose la alta precisión en la estimación. Sin embargo, la estimación puede mejorarse si se incorporan la clase de sitio principalmente, o la clase social cuando sea

posible de estimar, dentro de modelos mixtos únicos como los aquí presentados. Estos modelos resultan útiles herramientas para la investigación o las tareas de fiscalización cuando se requiere reconstruir la estructura original de un bosque intervenido.

## AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Enrique Barrios, por su ayuda en los trabajos de campo. A la Fundación Alfonso Martín Escudero (Madrid, España) por la financiación de la beca de investigación del primer autor, al Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC) por su apoyo institucional y a la Dirección de Bosques de la Provincia de Tierra del Fuego por la colaboración prestada durante la elaboración de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- COLLADO, L. (2001) Los bosques de Tierra del Fuego: Análisis de su estratificación mediante imágenes satelitales para el inventario forestal de la provincia. *Multequina* 10, 1-15.
- DIAZ, B., P. Peri, G. Martínez Pastur (1998) Crecimiento diamétrico en bosques de lenga en sitios de calidad IV de Patagonia Sur. Actas Primer Congreso Latinoamericano de *IUFRO*. Valdivia (Chile), 22-28 Noviembre. Publicación en CD.
- MARTÍNEZ 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.
- MARTÍNEZ 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.
- MARTÍNEZ PASTUR, G., J. Cellini, P. Peri, R. Vukasovic, C. Fernández (2000) Timber production of *Nothofagus pumilio* forests by a shelterwood system in Tierra del Fuego (Argentina). *Forest Ecology and Management*, 134 (1-2): 153-162.
- MARTÍNEZ PASTUR, G., V. Lencinas, J. Cellini, B. Díaz, P. Peri, R. Vukasovic (2002) Herramientas disponibles para la construcción de un modelo de producción para la lenga (*Nothofagus pumilio*) bajo manejo en un gradiente de calidades de sitio. *Bosque*, 23 (2), 69-80.
- PERI, P., G. Martínez Pastur (1996) Crecimiento diamétrico de *Nothofagus pumilio* para dos condiciones de copa en un sitio de calidad media en Santa Cruz, Argentina. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 5(2): 201-212.
- PERI, P., G. Martínez Pastur, B. Díaz, 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.
- SCHMIDT, H., A. Urzúa (1982) Transformación y manejo de los bosques de lenga en Magallanes. *Ciencias Agrícolas* nº 11. Universidad de Chile. 62 pp.