

## Curvas de índice de sitio para *Nothofagus dombeyi* en la zona preandina, provincia de Cautín, IX Región, Chile

Site index curves for *Nothofagus dombeyi* in the pre-Andean mountains of the province of Cautin, IX Region, Chile

Carlos R Esse<sup>a\*</sup>, Celso O Navarro<sup>a</sup>, Julio C Pinares<sup>a</sup>

\*Autor de correspondencia: <sup>a</sup> Universidad Católica de Temuco, Facultad de Recursos Naturales, Escuela de Ciencias Forestales, fono-fax: 56-45-205596, cesse@uct.cl

### SUMMARY

The purpose of this study was to develop polymorphic site index curves for the regeneration of coigüe (*Nothofagus dombeyi*) in the pre-Andean mountains of the IX Region of Chile. Three forest sites were defined *a priori* for this purpose, based on a spatial analysis of physiographical variables related with ecological requirements of the species: elevation, aspect and gradient. Subsequently, for the purpose of adjusting the age-height models, an analysis was carried out in 50 sample units, together with a dendrometric sampling of 150 felled dominant and co-dominant trees. The results allowed the determination of three forest sites, with indexes of 20, 18 and 16 meters for a key age of 40 years. Aspect and elevation were both significant variables affecting site index.

*Key words:* site, coigüe, Curarrehue.

### RESUMEN

El objetivo de este estudio consistió en la construcción de curvas de índice de sitio para renovales de coigüe (*Nothofagus dombeyi*) en la precordillera andina de la IX Región, Chile. Para esto se definieron *a priori* tres sitios forestales, a partir del análisis espacial de las variables fisiográficas altitud, exposición y pendiente. Posteriormente, con el objeto de ajustar los modelos de altura-edad se realizó un muestreo en 50 unidades muestrales y un análisis de tallo con volteo de 150 árboles dominantes y codominantes. Los resultados permitieron determinar la existencia de tres sitios forestales con índices de 20, 18 y 16 metros respectivamente, para la edad clave de 40 años. Los modelos seleccionados fueron polimórficos, y las variables fisiográficas incidentes fueron exposición y altitud.

*Palabras clave:* sitio, coigüe, Curarrehue.

### INTRODUCCIÓN

En el área de silvicultura y manejo, el concepto de sitio, entendido como la interacción entre las distintas especies forestales y las condiciones edafoclimáticas que las rodean, ha permitido el desarrollo de técnicas orientadas a la estimación de la productividad forestal. Existen numerosos esfuerzos destinados a cuantificar el potencial productivo de especies y su relación con las zonas geográficas en que se desarrollan. En efecto, las características geográficas definen en gran medida el potencial productivo de las especies forestales. En este contexto, Avery y Burkhart (1994) definen sitio como un área considerada en términos de todo lo que la rodea o exista, particularmente determinada por el tipo y calidad de vegetación que ésta puede contener o soportar. Según esto, el estudio del crecimiento de una especie se traduce

en la búsqueda de cuantificar la productividad que logra bajo los distintos sitios en que se desarrolla.

La productividad es un concepto biológico que puede expresarse matemáticamente. Es por ello que se ha optado por representar la calidad de sitio a través de un valor o índice, el cual es una expresión cuantitativa de la calidad de sitio (Prodan *et al.* 1997). Es así como Ortega y Montero (1988) señalan como el método más utilizado y que ha dado mejores resultados para estimar la calidad de un sitio, aquel que utiliza la altura de árboles dominantes y codominantes como índice, es decir, el conocido índice de sitio, aplicable sólo en rodales coetáneos, condición a la cual se acercan los renovales.

La IX Región de La Araucanía se caracteriza por presentar una gran variabilidad de sitios, en los que predominan especies nativas principalmente del género *Nothofagus*. Estas especies, que constituyeron el sustento de la actividad

forestal regional y nacional, se encuentran en la actualidad fuertemente degradadas, a diferencia de los renovales que se presentan en condiciones de intervención mínima. Bajo este escenario la población de coigüe (*Nothofagus dombeyi* Mirb. Oerst.) existente en la IX Región ha disminuido considerablemente; sin embargo, aún existen sectores en donde se desarrolla en forma natural, dejando en claro sus características de especie colonizadora y pionera. Respecto a la especie, Donoso *et al.* (1991) señalan que la variable autoecológica más relevante es el ser una especie intolerante, alcanzando su mejor desarrollo en condiciones de mayor luminosidad. A lo anterior, Hoffman (1997) señala que posee un amplio rango de tolerancia, creciendo a toda altura, prefiriendo suelos húmedos y formando bosques puros y en algunas situaciones asociado a otras especies.

El estudio se desarrolló en la zona precordillerana de la IX Región, en la comuna de Curarrehue, y tuvo por objeto determinar *a priori* sitios forestales y curvas de índice de sitio para renovales de coigüe (*N. dombeyi*), basado en los requerimientos ecológicos de la especie, específicamente altitud, exposición y pendiente.

## MÉTODOS

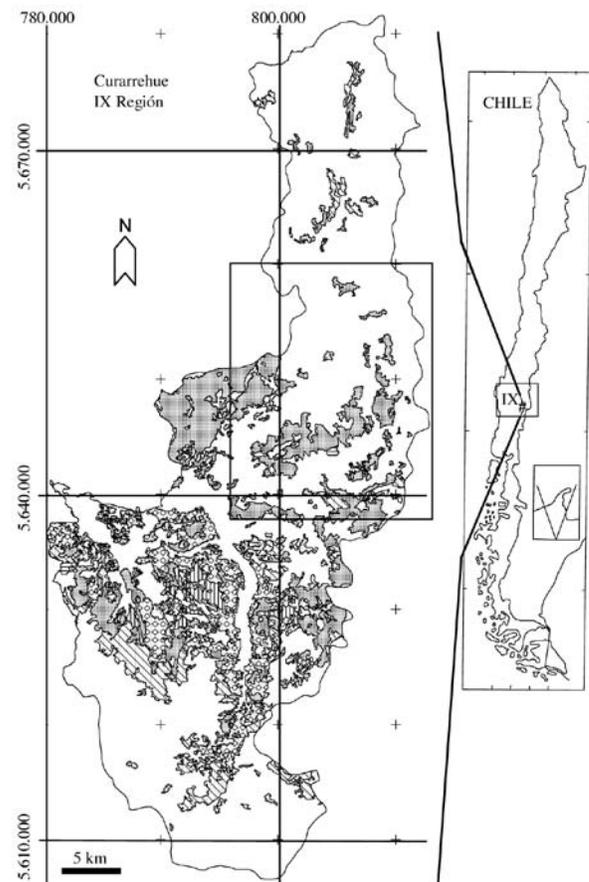
**Área de estudio.** El estudio se desarrolló en la comuna de Curarrehue, localidad precordillerana ubicada en la provincia de Cautín, IX Región de La Araucanía, con una superficie total de 116.500 hectáreas (figura 1).

El clima predominante presenta tres condiciones cambiantes, existiendo épocas de meses secos, meses lluviosos (3.500 a 4.000 mm/año) y otros de precipitaciones en forma de nieve, lo cual permite clasificar el área como zona con clima mediterráneo frío (Tosso 1985).

La geomorfología del lugar pertenece a la cuarta agrupación regional, denominada región central lacustre y del llano glacio-volcánico, caracterizada por un acusado descenso del continente. La profundidad de los suelos varía entre 60 y 130 cm, evidenciando un aumento en la compactación y el contenido de arcilla a mayor profundidad (Tosso 1985).

Posteriormente se definieron *a priori* y mediante análisis espacial tres sitios forestales que fueron la base del estudio, para lo cual se utilizó la información vectorial del Catastro Nacional del Bosque Nativo (CONAF-CONAMA 1999). La toma de datos se centró en los sectores conocidos como Maite Bajo, Maite Centro, Maite Alto y Quiñenahuin, todos distantes entre 15 y 30 kilómetros en dirección noreste de la comuna de Curarrehue.

**Definición de sitios forestales y muestreo.** Las variables fisiográficas consideradas para la definición de los sitios forestales fueron: altitud, exposición y pendiente. Luego de la definición de los sitios forestales se procedió al establecimiento de 50 unidades muestrales distribuidas en los tres sitios forestales, siendo éstas de forma rectangular con una



**Figura 1.** Área de estudio.  
 Study area.

superficie de 500 m<sup>2</sup> orientadas en sentido norte-sur. Para cada una se registró: número de unidad muestral, rodal, propietario, pendiente, exposición y altitud, y se midió DAP (diámetro a la altura del pecho) de cada árbol. Además, se realizó un muestreo dendrométrico que consistió en el volteo y trozado de tres árboles dominantes y codominantes por unidad muestral, extrayendo de cada fuste una rodela cada dos metros para la construcción de las series altura-edad. Con ello se obtuvieron las curvas de crecimiento históricas de cada árbol muestra. Finalmente, se procedió al análisis de tallo, el cual permitió estimar la edad clave o edad típica, cuyo criterio se basó en lo propuesto por Ortega y Montero (1988), quienes aconsejan considerar esta edad como próxima a la mitad del turno o rotación, o al finalizar el crecimiento en altura de la especie.

**Curvas de índice de sitio.** La metodología utilizada para la construcción de las curvas de índice de sitio consistió en la construcción de series edad-altura dominante construidas a partir de los registros dasométricos y dendrométricos obtenidos en terreno. Posteriormente se ajustó la función matemática de Bertalanffy-Richards, denominada corrientemente Chapman-Richards. Para el ajuste, García (1983) propone un método que se basa en el planteamiento de un

modelo de ecuaciones diferenciales estocásticas, donde la altura dominante es modelada por una ecuación diferencial a la que se le adiciona una estructura estocástica que representa perturbaciones ambientales y errores de medición. Para el ajuste se utilizó el software HTMOD, construido en lenguaje Fortran, que permite el ajuste de cuatro versiones de este modelo. La característica principal del método radica en que no es necesario que las series de datos pasen por la edad clave, permitiendo así determinar el índice de sitio a partir de árboles jóvenes, lo que genera una buena estimación de la asíntota. Ello se ajusta a la base de datos obtenida, permitiendo probar diferentes formas del modelo, tales como asíntota común para todas las parcelas o asíntotas independientes por parcela, con las curvas pasando por el origen o bien libres, requiriendo como mínimo series de tres mediciones consecutivas para la estimación de los parámetros del modelo de altura. El modelo de Chapman-Richards se muestra en la ecuación [1]:

$$H = a ( 1 - e^{-bt} )^{1/c} \quad [1]$$

donde:

$H$  = altura dominante (m);  $a$  = parámetro de la asíntota;  $b$  = factor de escala que modifica la tasa de crecimiento;  $t$  = edad (años);  $c$  = parámetro que determina la forma de la curva.

Este modelo, al ser ajustado por la metodología propuesta por García (1983), produce cuatro variaciones (cuadro 1). Real (1990) indica que el método presenta una importante ventaja sobre la metodología de regresión no lineal tradicional, ya que permite incluir en el ajuste toda la información de series de crecimiento que cuenten con a lo menos dos observaciones.

*Evaluación y selección de los modelos.* Para evaluar las capacidades predictivas de los modelos se realizaron tres pruebas. Éstas consistieron en índices de error y sesgo,

método de máxima verosimilitud y análisis gráfico de residuos. Así se logró seleccionar el modelo que mejor representa la relación entre altura dominante y edad en cada sitio forestal. Los errores fueron obtenidos a partir de la raíz cuadrada del error medio cuadrático (ecuación [2]), el error medio absoluto (ecuación [3]), desviación estándar de los residuos (ecuación [4]) y para el sesgo se utilizó la diferencia agregada (ecuación [5]):

$$REMC = \text{RAIZ} \sum ( O_i - E_i )^2 / n \quad [2]$$

$$EMA = \sum O_i - E_i / n \quad [3]$$

$$DSR = \sum ( R_i - R_{\text{med}} )^2 / n \quad [4]$$

$$DIFA = \sum ( O_i - E_i ) / n \quad [5]$$

En todas las anteriores,  $O_i$  es un valor observado,  $E_i$  valor estimado y  $n$  es el número total de observaciones. Se procedió a dividir por la media observada y multiplicar por cien para la obtención de los estimadores en porcentaje.

## RESULTADOS

*Sitios forestales.* El análisis espacial realizado sobre la base de las características climáticas y edáficas generales permitió identificar una zona de crecimiento para toda el área de estudio. Se determinó que el total de la superficie del área de estudio (figura 1) alcanzó las 13.046 hectáreas, concentrándose la toma de datos en una superficie total de 6.100 hectáreas. Lo anterior, permitió identificar y definir una gran zona de crecimiento, ubicándose dentro de ella el área de estudio que permitió definir los sitios forestales, que a partir del análisis espacial resultaron ser tres (cuadro 2), y en donde la mayor variabilidad estuvo dada por la exposición y el rango altitudinal.

**Cuadro 1.** Variaciones del modelo de Chapman-Richards según método de García (1983).

Variations of the Chapman-Richards model using García's method (1983).

Parámetros	Características	Modelos
(1) $a$ estimado en forma local, $b$ y $c$ estimados en forma global.	La función pasa por el origen, curvas anamórficas.	$H = a(1 - \exp(-bE))^{1/c}$ $S = a(1 - \exp(-bE_c))^{1/c}$
(2) $b$ estimado en forma local, $a$ y $c$ estimados en forma global.	La función pasa por el origen, curvas polimórficas.	$H = a(1 - \exp(-b)E)^{1/c}$ $S = a(1 - \exp(-b)E_c)^{1/c}$
(3) $a$ estimado en forma local, $b$ , $c$ y $t_0$ estimados en forma global.	La función corta la abscisa en $E = t_0$ para $H = 0$ . Curvas anamórficas.	$H = a(1 - \exp(-b(E - t_0)))^{1/c}$ $S = a(1 - \exp(-b(E_c - t_0)))^{1/c}$
(4) $b$ estimado en forma local, $a$ , $c$ y $t_0$ estimados en forma global.	La función corta la abscisa en $E = t_0$ para $H = 0$ . Curvas polimórficas.	$H = a(1 - \exp(-b)^{(E - t_0)})^{1/c}$ $S = a(1 - \exp(-b)^{(E_c - t_0)})^{1/c}$

**Cuadro 2.** Identificación y caracterización de los sitios forestales en el área de estudio específica.

Identification and description of the forest sites in the specific study area.

Sitio forestal	Variables fisiográficas	Descripción	Nº Unidades
1	S – SE – SO 600 – 800 m s.n.m	Exposición Altitud	22
2	S – SE – SO 800 – 1.600 m s.n.m	Exposición Altitud	16
3	N – NO – NE – PLANO 400 – 800 m s.n.m	Exposición Altitud	12

Los distintos sitios identificados y sus respectivas unidades muestrales se presentan en la figura 2. El ajuste del modelo de Chapman-Richards se realizó en cada uno de los tres sitios. La identificación y posterior definición de los sitios forestales individuales permitió definir la ubicación de las unidades muestrales que sirvieron de base para la construcción de las series edad-altura.

Para los sitios forestales 1, 2 y 3 se construyó un total de 22, 16 y 12 unidades muestrales, respectivamente.

*Series de crecimiento altura-edad.* La edad clave definida para el estudio correspondió a 40 años. La determinación de las curvas históricas de crecimiento de cada árbol fue realizada por medio de la gráfica de las correspondientes series de altura-edad, obtenidas mediante análisis de tallo.

*Ajuste de modelos y estimación de parámetros.* Para cada uno de los sitios forestales definidos se ajustó el modelo de Chapman-Richards. En el cuadro 3 se observan los parámetros y valores estimados para cada opción del método correspondiente a los sitios forestales 1, 2 y 3.

Generalmente en los estudios de crecimiento biológico, y específicamente en aquellos utilizados para la construcción de curvas de índice de sitio, se recomiendan aquellos modelos que denoten curvas polimórficas en su estructura (García 1983), debido a que éstas se elaboran para cada clase de sitio sin considerar una constante al parámetro de la asíntota como en el caso de las curvas anamórficas. Así, las opciones blocal y blocal<sub>0</sub> debieran ser aquellas que mejor modelen el crecimiento de coigüe (*N. dombe- yi*). La figura 3 muestra la tendencia de cada curva guía originada a partir del ajuste del modelo, correspondiente a los sitios forestales 1, 2 y 3.

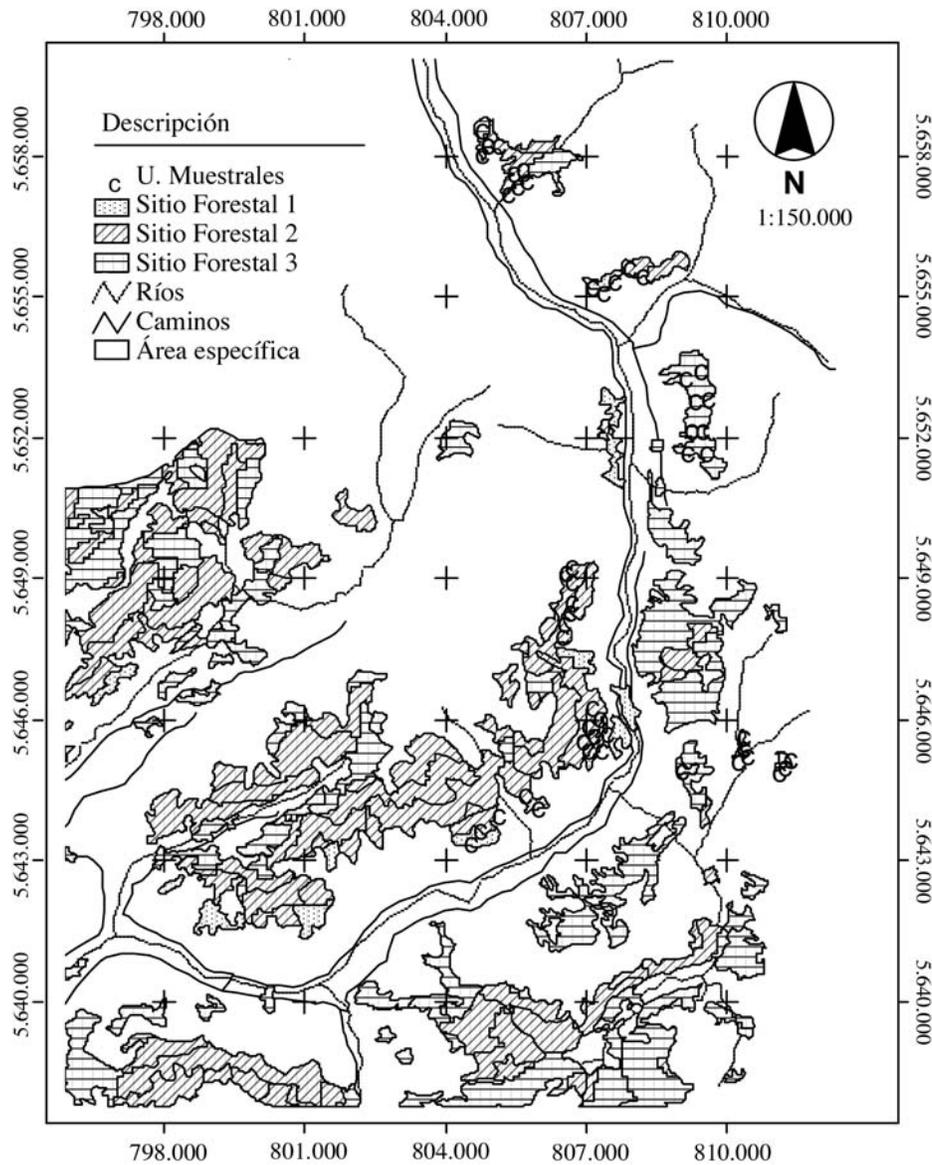
Respecto al sitio forestal 1, no se observaron mayores variaciones entre una y otra opción del modelo. Es así como las opciones alocal y blocal no denotaron variaciones significativas en el valor estimado en los parámetros, al igual que en alocal<sub>0</sub> y blocal<sub>0</sub>; sin embargo, a partir del análisis realizado se puede señalar que la mayor diferencia se produjo a partir de los 50 años, para cada grupo (local y local<sub>0</sub>), situación originada en parte por la existencia de un parámetro más en el ajuste de los modelos.

Para el sitio forestal 2, en el cuadro 3 se presentan las diferencias en el valor de la asíntota (parámetro a), para cada opción del modelo y se hace marcada diferencia en aquellas de estructura anamórfica. En la figura 3b se muestra la tendencia de cada curva guía originada a partir del ajuste del modelo; la forma de las curvas es bastante similar a la de la figura 3a, sin embargo, a partir de los 65 años las diferencias son más notorias; cabe señalar que al comparar las curvas guías de los sitios forestales 1 y 2 a la edad clave de 40 años, se pudieron observar diferencias significativas en la altura que alcanzarían los árboles de uno y otro grupo, siendo mayor para el sitio 1 y menor para el sitio 2. Esta marcada diferencia estaría indicando que la especie crece de forma distinta bajo distintos rangos altitudinales en el área de estudio 2, específicamente para este caso sobre los 800 m s.n.m.

**Cuadro 3.** Funciones originadas por cada opción del modelo de Chapman-Richards para el sitio forestal 1, 2 y 3.

Functions produced by each option of the Chapman-Richards model for forest sites 1, 2 and 3.

Sitio	Modelo	Función
1	Alocal	$H = 46,99083 * [1 - \exp(-0,021395 * E)]^{1/0,647524}$
	Blocal	$H = 45,16782 * [1 - (\exp(-0,0223514))^E]^{1/0,6366554}$
	Alocal <sub>0</sub>	$H = 57,92719 * [1 - \exp(-0,01601432(E - 0,192))]^{1/0,7108716}$
	Blocal <sub>0</sub>	$H = 56,90537 * [1 - (\exp(-0,01628907))^{(E - 0,170)}]^{1/0,7088055}$
2	Alocal	$H = 52,0247 * [1 - \exp(-0,01617494 * E)]^{1/0,7055067}$
	Blocal	$H = 45,89015 * [1 - (\exp(-0,01864197))^E]^{1/0,6890364}$
	Alocal <sub>0</sub>	$H = 65,46429 * [1 - \exp(-0,01156854(E - 0,208))]^{1/0,7867666}$
	Blocal <sub>0</sub>	$H = 60,43811 * [1 - (\exp(-0,01255173))^{(E - 1,931)}]^{1/0,7820687}$
3	Alocal	$H = 145,6477 * [1 - \exp(-0,00632246 * E)]^{1/0,7185005}$
	Blocal	$H = 143,6805 * [1 - (\exp(-0,006370464))^E]^{1/0,7195629}$
	Alocal <sub>0</sub>	$H = 165,4543 * [1 - \exp(-0,00559205(E - 0,334))]^{1/0,7300395}$
	Blocal <sub>0</sub>	$H = 56,94456 * [1 - (\exp(-0,016125887))^{(E - 0,784)}]^{1/0,6153915}$



**Figura 2.** Sitios forestales y unidades muestrales establecidas.

Forest sites and sampling units established.

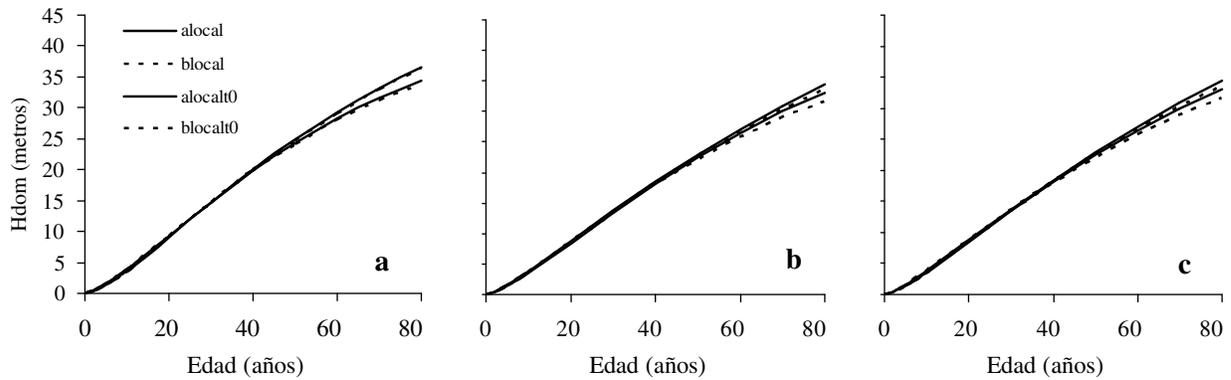
Finalmente, para el sitio forestal 3, en la figura 3c se muestran las mayores variaciones; la curva descrita por la opción  $\text{blocal}_0$  se alejó considerablemente de la tendencia central. Muy probablemente se trata de óptimos locales, ya que los valores del parámetro “a” que representa la asíntota de la altura son excesivamente altos.

*Validación y selección de los modelos.* Para el sitio forestal 1 los modelos que presentaron menor error en su proyección fueron  $\text{blocal}$  y  $\text{blocal}_0$ , en cuanto al sesgo. Ambos valores presentaron menores variaciones (cuadro 4).

En resumen, para el sitio forestal 1 los modelos  $\text{blocal}$  y  $\text{blocal}_0$ , son aquellos que poseen mayores capacidades de proyección en el tiempo (figura 4) y por ende tienen

mayor probabilidad de ser seleccionados. Es así como se determina que la mejor opción para modelar el crecimiento en altura de la especie está dada por un modelo polimórfico. Lo anterior es ratificado también por el análisis de verosimilitud, valores que son entregados por el programa HTMOD. Por último, se procedió a la gráfica de los residuos de cada modelo en función de la edad para ver su distribución en el tiempo; el análisis de estos gráficos no demostró mayores variaciones, sin embargo, la selección de un modelo u otro pasó por la combinación de los métodos propuestos anteriormente.

En el cuadro 4 se muestra un resumen de estos parámetros para cada sitio forestal. Para el sitio forestal 1 es posible señalar que la mejor opción estuvo centrada en un



**Figura 3.** Curvas guías para cada opción del modelo ajustado en el sitio forestal 1 (a), sitio forestal 2 (b) y sitio forestal 3 (c).  
Guide curves for each option of the adjusted model: forest site 1 (a), forest site 2 (b), forest site 3 (c).

**Cuadro 4.** Medidas de error, sesgo y verosimilitud, para la altura dominante en porcentaje, obtenidos en el sitio forestal 1, 2 y 3.  
Error, bias and probability measurements for the dominant percentage height obtained in forest sites 1, 2 and 3.

Sitio	Modelo	EMC%	EMA%	DSR%	DIFA%	Verosimilitud
1	Alocal	23,63	11,47	23,44	-1,394	610,52
	Blocal	23,42	11,40	23,30	-1,111	606,78
	Alocalt <sub>0</sub>	23,61	11,41	23,43	-1,339	615,79
	Blocalt <sub>0</sub>	23,41	11,35	23,30	-1,062	611,19
2	Alocal	27,94	12,44	26,95	-3,180	817,32
	Blocal	23,70	11,91	24,71	-2,580	817,66
	Alocalt <sub>0</sub>	31,23	13,15	27,73	-5,990	833,30
	Blocalt <sub>0</sub>	29,21	12,78	26,17	-5,590	832,37
3	Alocal	15,89	9,68	15,60	-1,780	385,24
	Blocal	15,78	9,64	15,50	-1,740	385,86
	Alocalt <sub>0</sub>	9,22	5,57	9,10	-0,850	385,35
	Blocalt <sub>0</sub>	12,00	6,41	8,20	4,870	356,04

modelo polimórfico; en cuanto a la mejor bondad de ajuste, ésta estuvo dada por la opción alocalt<sub>0</sub>, o bien blocalt<sub>0</sub>.

En la figura 4 se muestra la gráfica de residuales para el sitio forestal 1, denotando poca variabilidad. Lo más destacable fue la forma de cometa que presentaron los cuatro gráficos de la figura y que se abren en función del tiempo, fenómeno cuya explicación radica en la variabilidad de los datos que aumentó con la edad. Estas mediciones corresponden a medidas en metros de altura de los árboles y su comportamiento denotó cuánto se aleja del valor real observado. En este caso, la altura dominante de la especie mostró su variabilidad en la medida que aumenta la edad.

En definitiva los modelos se comportaron de igual forma, dándose a notar valores extremos que hicieron aumentar este error.

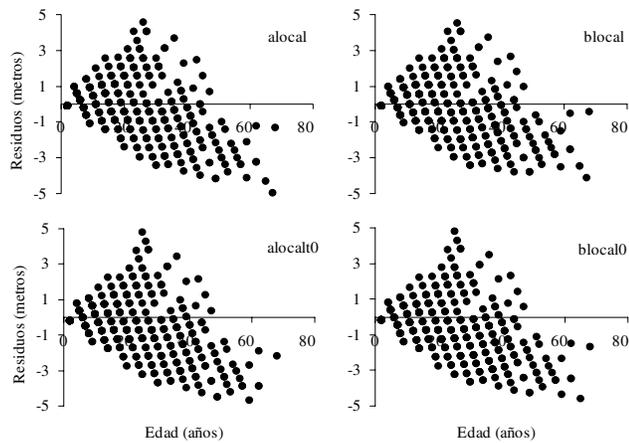
Según Davel (1998), los modelos con origen libre aparecen como más aceptables. Así, esta medida de selección fue ratificada a partir del análisis realizado en los puntos anteriores, el comportamiento fue beneficioso casi en todas las pruebas a excepción de la verosimilitud, donde estuvo bajo cuatro unidades con respecto a la otra opción, por lo que se opta por el modelo blocalt<sub>0</sub>, de características polimórficas y de origen libre. El modelo seleccionado para el sitio forestal 1 se presenta en las ecuaciones [6] y [7]:

Función de altura dominante:

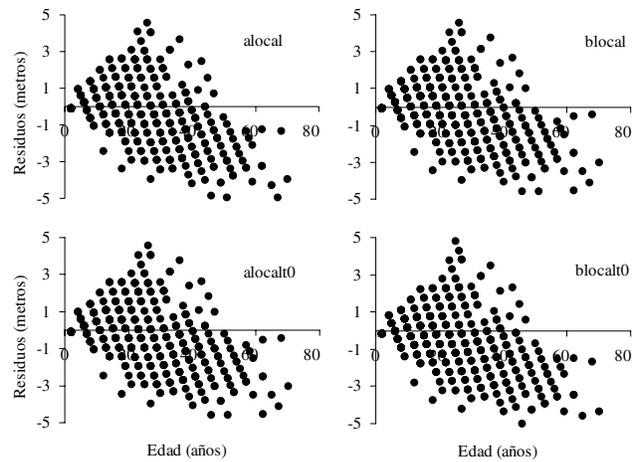
$$H = 56,90537 [1 - (1 - (S/56,90537)^{0,7088055})^{(E_c - 0,17)/(E_c - 0,17)}]^{(1/0,7088055)} \quad [6]$$

Función de sitio:

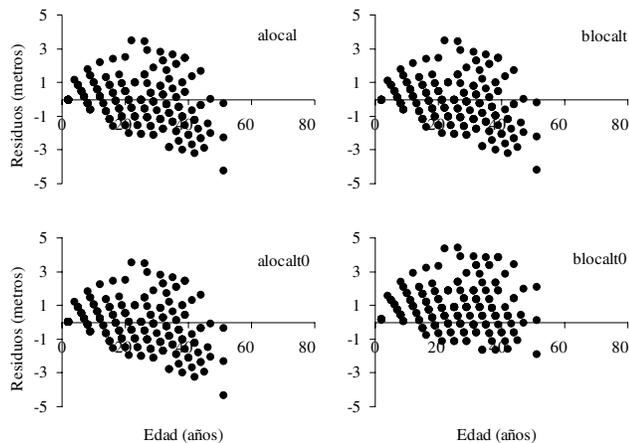
$$S = 56,90537 [1 - (1 - (H/56,90537)^{0,7088055})^{(E_c - 0,17)/(E_c - 0,17)}]^{(1/0,7088055)} \quad [7]$$



**Figura 4.** Gráfico de residuales para el sitio forestal 1.  
 Residuals graph for forest site 1.



**Figura 5.** Gráfico de residuales para el sitio forestal 2.  
 Residuals graph for forest site 2.



**Figura 6.** Gráfico de residuales para el sitio forestal 3.  
 Residuals graph for forest site 3.

En las funciones [6] y [7] la variable H corresponde a altura dominante (metros), S corresponde a índice

Función de altura dominante:

$$H = 60,43811 [1 - (1 - (S/60,43811)^{0,7820687})^{(E-1,931)/(E_c-1,931)}]^{(1/0,782068)} \quad [8]$$

Función de sitio:

$$S = 60,43811 [1 - (1 - (H/60,43811)^{0,7820687})^{(E_c-1,931)/(E-1,931)}]^{(1/0,782068)} \quad [9]$$

Por último, en el caso del sitio forestal 3, el modelo que presentó una mayor bondad de ajuste y menor error y sesgo que las otras alternativas fue blocal. El gráfico de residuales se observa en la figura 6.

A diferencia de las opciones del modelo evaluadas anteriormente, en el sitio forestal 3 se presentó un mayor error hasta los 40 años con la opción blocalt<sub>0</sub>. El resto de las opciones se mantuvo dentro de rangos

de sitio (metros), E a la edad (años) y E<sub>c</sub> a la edad clave (40 años).

En el caso del sitio forestal 2, el modelo que presentó menor error y sesgo fue blocal, el cual posee características polimórficas. Al analizar su comportamiento proyectado en el tiempo por medio de rangos de edad, se desprende que tanto en los modelos blocal como blocal<sub>0</sub> predominan nuevamente las opciones polimórficas sobre las anamórficas. Por último, el estudio de verosimilitud y residuales arrojó como mejor opción al modelo blocalt<sub>0</sub>. En la figura 5 se muestran los gráficos de residuales para este sitio.

Al igual que en el sitio forestal 1, se puede señalar que la mejor opción estuvo centrada en un modelo polimórfico; la bondad de ajuste estuvo dada por la opción alocalt<sub>0</sub>, o bien blocalt<sub>0</sub>.

El análisis general permitió seleccionar el modelo blocalt<sub>0</sub>, de características polimórficas y de origen libre. El modelo seleccionado para el sitio forestal 2 se muestra en la ecuación [8] y ecuación [9]:

aceptables, notándose una pequeña preferencia hacia la opción blocal. En relación al sesgo, las opciones del modelo, a excepción de blocalt<sub>0</sub>, subestimaron la muestra hasta aproximadamente los 20 años en el rango de datos, para luego sobreestimar la muestra hasta completar los 50 años, a un nivel bajo hasta los 40 años. La alternativa polimórfica demostró ventajas sobre las demás opciones, pero a diferencia de las anteriores ésta

fue una opción con origen conocido; la variabilidad de los resultados en general indica que la especie presentó distintas cualidades de adaptación ante situaciones de sitios diversos, esto debido al comportamiento que demuestran las proyecciones en el tiempo. Al mismo tiempo, ratifican lo propuesto por Hoffman (1997) en

relación al hábitat, en donde esta especie posee una gran adaptabilidad puesto que crece en todo el rango altitudinal, prefiriendo suelos húmedos, formando bosques puros, pero también mezclándose con otras especies. Es por ello que las funciones de altura y sitio quedaron definidas como en las ecuaciones [10] y [11]:

Función de altura dominante:

$$H = 56,94456 [1 - (1 - (S/56,94456)^{0,6153915})^{(E-0,784)/(E_c-0,784)}]^{(1/0,6153915)} \quad [10]$$

Función de sitio:

$$S = 56,94456 [1 - (1 - (H/56,94456)^{0,6153915})^{(E_c-0,784)/(E-0,784)}]^{(1/0,6153915)} \quad [11]$$

*Curvas de índice de sitio.* A partir de los modelos seleccionados para los tres sitios forestales definidos sobre la base de las variables fisiográficas asociadas, se generaron las curvas para las diferentes clases de sitio (figura 7). Para el sitio 1 (figura 7a), la altura dominante a la edad clave de 40 años alcanza los 20 metros, en el sitio 2 (figura 7b), la altura dominante fue de 18 metros, y en el sitio forestal 3 (figura 7c) fue de 16 metros. A partir de lo anterior, se definió la existencia de tres sitios distintos, siendo la diferencia entre cada uno de dos metros en altura, lo cual es altamente significativo si consideramos que el estudio se estructuró sobre la base de renovales.

la extrapolación a zonas remotas de características similares, y minimizando así los costos que significa un levantamiento de campo.

Del total de unidades muestrales evaluadas en este estudio, un 44% pertenece a la clase de índice mayor, y un 56% a los índices más bajos. Los resultados del estudio coinciden con Rodríguez *et al.* (1983), quienes señalan que esta especie se encuentra comúnmente en los faldeos cordilleranos con exposición Sur, entre los 800 y 1.000 m s.n.m., y en donde los individuos de mayor desarrollo se encuentran a orillas de ríos y lagos, muchas veces con sotobosque denso de quila (*Chusquea quila* Kunth.). En efecto, las características del sitio de mayor productividad posee exposición sur y un rango altitudinal que va de los 600 a 800 m s.n.m., situación similar para los sitios forestales 2 y 3 que poseen exposición Sur y un rango altitudinal que varía entre los 800 y 1.600 metros.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Cada sitio forestal definido se sustenta sobre la base de variables fisiográficas que son parte de los requerimientos ecológicos de la especie. A partir del análisis se concluye que los sistemas de información geográfica y especialmente las técnicas de análisis espacial permiten realizar estratificaciones muy precisas, utilizando para ello variables fisiográficas del territorio, posibilitando

Celis (1996) y Davel (1998) ajustaron para estudios similares el modelo de Chapman-Richards, por medio del método de García (1983). El estudio utiliza la misma metodología propuesta por estos autores, aunque se diferencia en las características de la especie modelada, puesto que en los casos anteriores se trabajó con pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Además, en el

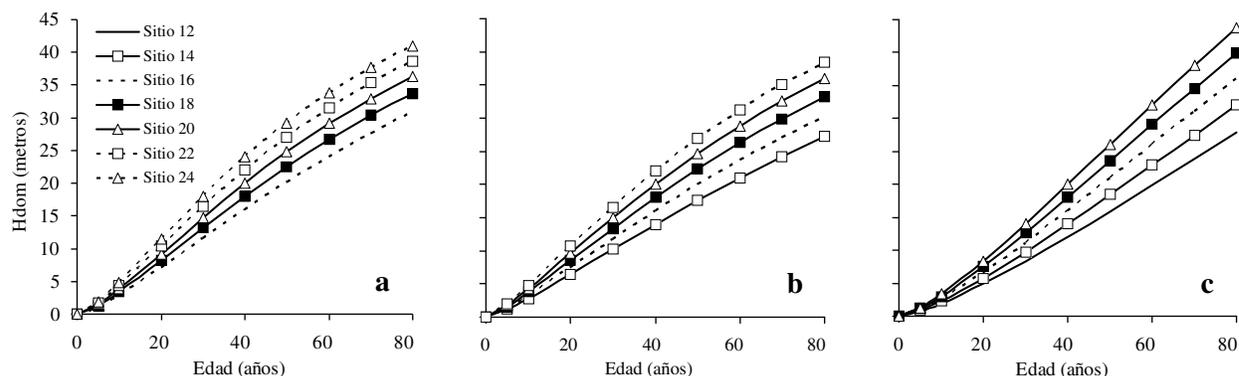


Figura 7. Curvas de índice de sitio para el sitio forestal 1 (a), sitio forestal 2 (b) y sitio forestal 3 (c).

Site Index Curves for forest site 1 (a), forest site 2 (b) and forest site 3 (c).

caso del coigüe (*N. dombeyi*), existe una alta dificultad para predecir su comportamiento futuro dentro del rodal (condición de dominancia y codominancia) y con ello su edad clave. La estimación y proyección de las alturas dominantes fueron realizadas a partir de la base de datos generada que presentó registros hasta los 70 años.

El resultado del ajuste realizado define la existencia de tres sitios distintos con una variación en altura de dos metros, siendo el sitio forestal 1 el que alcanza un índice de 20 metros a la edad clave, mientras que el sitio forestal 2 alcanza los 18 metros y el sitio forestal 3 los 16 metros a la misma edad. A lo anterior se debe agregar que la edad clave considerada fue de 40 años; sin embargo, según lo citado por Ortega y Montero (1988), la determinación precisa de la edad clave es importante porque de lo contrario puede producir una clasificación errónea de las calidades.

Las pruebas de error y sesgo, máxima verosimilitud y gráfica de residuales permiten seleccionar las mejores opciones del modelo. Para ello Prodan *et al.* (1997) señalan que ante dos valores iguales de error, el modelo que presente menor desviación estándar de los residuos puede considerarse superior. Además, propone que como medida de sesgo se utilice la media de los residuales, denominada frecuentemente diferencia agregada. En este caso se entenderá sesgado aquel modelo que presente valores más distantes a cero. Celis (1996) y Davel (1998) proponen considerar para la elección de la mejor opción del modelo el valor de verosimilitud, bajo el criterio de máximo valor. Por último, según Peña (1992), Celis (1996) y Davel (1998) es importante analizar los valores residuales, con el fin de estudiar diversas relaciones dentro del rango de datos, como también fuera de él. Por lo tanto los residuos deben ser graficados en función de la edad para ver su distribución en el tiempo. En base a lo anterior, la selección de la mejor opción del modelo debe realizarse considerándose las metodologías descritas anteriormente, ya que debido a la homogeneidad de los datos las variaciones sólo son detectadas si se cuenta con varias alternativas de validación. Además, se hace necesario calcular errores y sesgos en intervalos de diez años con el fin de analizar la consistencia de las opciones del modelo. Una vez realizado este proceso, son las opciones polimórficas del modelo las que presentan mejores características estimadoras del crecimiento. Sin embargo, el análisis gráfico de residuales permite deducir en todos los casos que los modelos no son buenos estimadores; lo anterior debido quizás a que la base de datos con la cual se trabajó corresponde a renovales, lo cual no permite proyectar los resultados a la edad de madurez de la especie.

Los resultados del estudio permiten señalar que las opciones del modelo seleccionadas para cada sitio presentan características polimórficas, definidas como  $\text{blocal}_0$  de origen libre con una asíntota superior común. Estos resultados son similares a los encontrados en otros estu-

dios (Celis 1996, Davel 1998) y estarían indicando algún patrón de comportamiento en común. Además, todos los sitios presentan una asíntota superior común, con lo que se espera que los mejores sitios lleguen en menor tiempo a ese punto y los peores sitios tarden más en lograrlo, permitiendo definir la tasa de crecimiento.

Los modelos generados son un aporte al estudio del crecimiento de una de las especies más importantes del sur de Chile, y que por años ha constituido parte importante del sustento de la economía de familias campesinas. A partir de este estudio se recomienda realizar nuevos ajustes con otras metodologías que permitan validar los modelos propuestos, agregando una base de datos que permitan modificar la edad clave definida para lograr un modelo estimador más consistente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONAF IX Región, a los habitantes del sector Maite, Maite Centro, Maite Alto y Quiñenahuin de la comuna de Curarrehue, y a Alicia Ortega.

## REFERENCIAS

- Avery T, H Burkhardt. 1994. Forest Measurements. New York, USA. McGraw-Hill. 4<sup>th</sup> Edition. 408 p.
- Celis M. 1996. Modelo de Crecimiento en Altura y Curvas de Índice de Sitio para *Pseudotsuga menziesii*. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 91 p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL)-CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente, CL). 1999. Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Informe Regional Novena Región. Temuco, Chile. 90 p.
- Davel M. 1998. Identificación y Caracterización de Zonas de Crecimiento para Pino Oregón en la Patagonia Andina Argentina. Tesis para Optar al Grado de Magíster Mención Manejo Sustentable de Recursos Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 119 p.
- Donoso C, B Escobar, M Cortés. 1991. Técnicas de Vivero y Plantación para Coigüe (*Nothofagus dombeyi*). Chile Forestal. Documento Técnico N° 55. 8 p.
- García O. 1983. A Stochastic Differential Equation Model for the Height Growth of Forest Stands. *Biometrics* 39: 1059-1072.
- Hoffman A. 1997. Flora Silvestre de Chile, Zona Araucana. Editorial Claudio Gay. Santiago, Chile. 258 p.
- Ortega A, G Montero. 1988. Evaluación de la Calidad de las Estaciones Forestales. Revisión bibliográfica. *Icona*, Madrid. *Ecología* (2): 155-184.
- Peña D. 1992. Estadística. Modelos y Métodos. Alianza Editorial, 2<sup>a</sup> ed. Madrid, España. 745 p.
- Prodan M, R Peters, F Cox, P Real. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 586 p.

Real P. 1990. Sitio y Crecimiento en Altura. Documento de Trabajo N° 1. Modelo de Crecimiento. Fase 1 – Metodología. Proyecto Modelo Nacional de Simulación Pino radiata. Exion. p. 42-67.

Rodríguez R, O Matthei, M Quezada. 1983. Flora Arbórea de Chile. Ed. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 408 p.

Tosso J. 1985. Suelos Volcánicos de Chile. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. 723 p.

Recibido: 28.09.06  
Aceptado: 23.05.07