



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

Funciones de índice de sitio/altura dominante para renovales de Roble Raulí-Coigüe en la Décima Región

Profesor Patrocinante: Sra. Alicia Ortega Z.

Trabajo de Titulación presentado
como parte de los requisitos para optar
al Título de **Ingeniero Forestal**.

Luis Jonathan Araya Quezada

Valdivia Chile 2002

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Alicia Ortega Z.	_____
Informante:	Sr. Gonzalo Paredes V.	_____
Informante:	Sr. Juan Schlatter V.	_____

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sra. Alicia Ortega Z.

Agradecimientos

Este Trabajo de titulación fue posible al apoyo y confianza puestas en mi por Jesucristo (Dios) y mi Familia, los cuales fueron vitales para culminación exitosa de mi carrera y titulación. También gracias a mi profesora patrocinante, por el apoyo brindado en todo el transcurso del trabajo. Agradezco además al Gobierno Regional (Décima Región) por apoyar financieramente parte de este trabajo, a mi computador y a todos quienes me dieron su respaldo moral durante el año. Finalmente agradezco a la música Heavy Metal.

A Jesús
A mis padres Rebecca y Luis
A mis hermanos Christopher y Nicole
A mi abuela (mami) Rebecca en el cielo
A mi abuelo (papi) y mi familia
A mis tíos Gilberto y Javier
A mis primos Cristian y Juan Carlos
Al profesor Lira
A mis amigos
Al heavy metal

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEORICO	3
2.1 Sitio y Productividad	3
2.2 Curvas de índice de sitio	4
2.2.1 Tipos de datos: parcelas permanentes, parcelas temporales y análisis fustal.	4
2.2.2 Construcción de las curvas	5
3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	10
3.1 Antecedentes generales	10
3.2 Muestreo	10
3.3 Ajuste de funciones de sitio y altura dominante	11
3.3.1 Análisis y validación de datos	11
3.3.2 Generación de series altura-edad	12
3.3.3 Ajuste del modelo	12
3.3.4 Prueba de los modelos	14
3.3.5 Curvas índice de sitio	16
3.3.6 Comprobación de Hipótesis	16
4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	18
4.1 Ajuste de funciones de sitio y altura dominante	18
4.1.1 Análisis y validación de los datos	18
4.1.2 Generación de series altura edad	18
4.1.3 Estadística descriptiva	18
4.1.4 Ajuste de los modelos	20
4.1.5 Estrato Regional	21
4.1.6 Estratos por Zonas	22
4.1.7 Estratos por Especie	23
4.2 Evaluación grafica y estadística de los modelos seleccionados	25
4.2.1 Hipótesis Modelo Zonal versus Modelo general zonal	26
4.2.2 Hipótesis Modelo por Especie versus Modelo general por especie	26
4.2.3 Ajuste y evaluación de los estratos seleccionados	27
4.2.4 Modelo Regional	28
4.2.5 Zona 2	29
4.2.6 Zona 3	30
4.2.7 Zona 4	31
4.2.8 Modelo zona 4 alternativo	32
4.2.9 Modelo General para Coigüe y Raulí	33

	Página	
4.3	Curvas de Índice de Sitio	34
5.	CONCLUSIONES	37
6.	BIBLIOGRAFÍA	39
	ANEXOS	
1	Abstract and Keywords	
2	Zonificación del proyecto FONDEF D97I1065 “Software Nothofagus”	
3	Descripción zonas de crecimiento	
4	Variables base de datos “Sección 1.txt”	
5	Información general parcelas proyecto	
6	Parámetros de cada Modelo ajustado por Estrato	
7	Curvas guías versus las series altura-edad	
8	Grafico de residuales	

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio consistió en el ajuste de modelos de crecimiento en altura para renovales de Roble-Raulí-Coigüe presentes en la Décima Región. Los datos utilizados corresponden a mediciones realizadas en el marco del proyecto FONDEF “Software *Nothofagus*” (D9711065). De este mismo proyecto fueron utilizadas zonas de distinto crecimiento para estas especies, las cuales se delimitaron a través de información climática, edáfica y vegetacional entre otras. La información para el ajuste de los modelos de crecimiento en altura correspondió a la de análisis fustal de 18 parcelas distribuidas en las distintas zonas de la Décima Región.

Los datos posteriormente fueron analizados y validados para que la información fuese lo más confiable o libre de errores, luego se generaron las series altura-edad para cada árbol medido.

Los individuos de Roble-Raulí-Coigüe con sus respectivas series de datos fueron estratificados, es decir se separaron en grupos de acuerdo a posibles diferencias de productividad. Esto para lograr modelos de crecimiento en altura más representativos. En primer lugar se estratificó de acuerdo a las zonas propuestas en el proyecto FONDEF presentes en la Décima Región (cuatro zonas por lo tanto cuatro estratos). Además se diferenciaron tres estratos correspondientes a cada una de las especies. Por último se diferenció a la Décima Región como otro estrato para tener un parámetro comparativo.

En cada uno de los estratos se obtuvieron los modelos de crecimiento en altura dominante a través de la metodología propuesta por García (1983). Esta consiste en el ajuste de un modelo estocástico para el crecimiento en altura. Ese modelo presenta una parte determinística representada por la función de Chapman-Richard y un componente estocástico o aleatorio que representa la variabilidad ambiental denominada proceso de Wiener. Cabe destacar que esta metodología ha sido ampliamente probada en estudios anteriores.

El proceso de cálculo fue realizado por el programa HTMOD creado por García (1983). Este programa permite el ajuste de cuatro variantes al modelo Chapman-Richard, estas son un modelo anamórfico con origen libre, un modelo anamórfico con origen restringido, un modelo polimórfico con origen libre y finalmente un modelo polimórfico con origen restringido.

Cada uno de los modelos mencionados anteriormente fue ajustado para cada uno de los estratos propuestos, y analizado a través de pruebas de error, sesgo, verosimilitud y análisis gráfico de residuales, con el objetivo de seleccionar el modelo mejor adaptado en cada caso.

Una vez seleccionado el mejor modelo para cada estrato, se justificó estadísticamente la utilización de los modelos por zona como estratos separados, en contraste con la utilización de un modelo general que incluyó a todas las zonas. A su

vez se realizó el mismo proceso para justificar la utilización de las especies como estratos separados. Esto se logró gracias al índice de verosimilitud.

Como resultado, el modelo que mejor se perfiló en cada uno de los estratos fue el polimórfico con origen libre.

Se rechazó la utilización de un modelo común para las zonas, ya que las diferencias entre ellas fueron significativas, justificándose el uso de modelos separados. En cambio no se justificó la utilización de modelos separados por especie, con lo cual se recomienda la utilización de un modelo general para ellas.

Las funciones, sus parámetros, y su distribución a través de los valores reales fueron presentadas de forma ordenada para cada estrato.

Finalmente se construyeron curvas de índice de sitio/altura dominante para los estratos más representativos de 18 a 26 metros, cada dos metros. La edad clave utilizada fue de 20 años.

Palabras clave: Tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe - Índice de sitio/altura dominante – modelo de crecimiento Chapman-Richard – modelo estocástico de crecimiento en altura – índice de verosimilitud.

1. INTRODUCCION

De los 13,4 millones de hectáreas de bosques nativos existentes en el país, 3,6 millones de hectáreas corresponden a renovales. De ellas 1,2 millones están constituidas por renovales del Tipo Forestal Roble–Raulí-Coigüe, y sobre un 50% se concentra en las regiones IX y X, en esta última alcanza las 219.850,7 mil hectáreas (CONAF *et al.*, 1999).

Este tipo forestal se desarrolla entre el paralelo 36°30` sur (Región del Maule) y el paralelo 40°30` sur (Región de los Lagos), entre los 100 y los 1000 msnm, tanto en la Cordillera de la Costa como en la de Los Andes, particularmente en las laderas interiores y en los valles cordilleranos (Donoso, 1981).

Es un tipo forestal creado por la acción alteradora del hombre, a través de la tala masiva y de los incendios (Martínez, 1999). Además muchas áreas boscosas fueron quemadas para dar paso a la ganadería y agricultura (Donoso, 1994), otras en cambio fueron transformadas por catástrofes naturales. Como consecuencia de lo anterior se desarrollaron bosques de segundo crecimiento o renovales compuestos por las especies antes mencionadas.

Es un tipo forestal de un alto valor económico (Martínez, 1999), y de un gran potencial de manejo dada la disponibilidad del recurso. Además es una importante reserva de biodiversidad cumpliendo una activa función social y potencialmente económica como la recreación, captura de carbono y liberación de oxígeno, a esto además se suma el valor paisajístico en que se conjugan distintas tonalidades de follaje en todas las estaciones del año.

Lo anterior lo convierte en un interesante tema de estudio en detalle, pero para ello es necesario conocer el comportamiento de la especie en distintas zonas para dar paso a la determinación de información como el Índice de Sitio, respuesta al raleo, productividad, entre otros. Estas pueden ser desarrolladas dadas las condiciones de sitio específicas en las que crecen los renovales.

Objetivo General

El objetivo de este trabajo es elaborar una herramienta para las futuras planificaciones de manejo en este tipo Forestal. Se ajustarán modelos de crecimiento en altura para estos renovales y se generaran curvas de Índice de Sitio.

Objetivos Específicos

- Determinar la productividad a través de la diferenciación de estratos. Se propone un modelo general, modelos por zonas y modelos por especie.
- Ajustar modelo general no lineal de crecimiento en altura Chapman-Richard, el cual es un método ampliamente probado y que permite buenas estimaciones en la proyección.

- Probar cuatro configuraciones de parámetros a cada estrato delimitado (modelos polimórficos y anamórficos), a través de la metodología propuesta por García (1983).
- Seleccionar el mejor modelo por estrato a través del análisis de error, sesgo, verosimilitud y gráfico de residuales. Se graficarán las curvas guías para apreciar el desarrollo de la altura estimada por el modelo.
- Generar curvas de Índice de sitio / altura dominante a partir de los modelos seleccionados.
- Justificar la utilización de modelos separados por estratos versus la utilización de un modelo común.

Con todo lo anterior se podrán determinar las características en el crecimiento en altura de las especies en distintas zonas, con el objetivo de diferenciar y predecir a futuro la productividad de sitio. Además los modelos utilizados serán útiles para el simulador de *Nothofagus* (Notho 1.0), lo cual permitirá predecir el crecimiento en altura de la especie.

2. MARCO TEORICO

2.1 Sitio y Productividad

Según Clutter *et al* (1983), el crecimiento y rendimiento de una especie determinada o composición de ellas, esta ampliamente determinada por cuatro factores.

- a. La edad del rodal, o en el caso de rodales heteroetáneos, la distribución de edades.
- b. La capacidad de producción (innata) potencial del área involucrada.
- c. Hasta que punto la capacidad productiva innata ha sido y es, totalmente utilizada.
- d. Los tratamientos culturales aplicados, como por ejemplo el raleo, la fertilización, el control de la vegetación competidora, etcétera.

La capacidad productiva innata se refiere a la calidad de sitio, y el grado de ocupación del sitio es sinónimo de densidad del rodal, o mas bien de la competencia.

En el contexto del manejo forestal, la calidad de sitio puede ser definida según Prodan *et al* (1997), como la "capacidad de un área determinada para el crecimiento de los árboles" o según Clutter *et al.*, 1997, como "la producción potencial de madera de un sitio para una especie en particular o tipo forestal". Es la respuesta de la especie a determinadas características climáticas, edáficas y bióticas presentes en un lugar determinado.

Para referirse a la calidad de un sitio, suelen usarse palabras como bueno para un sitio que alcanza una alta productividad, o pobre cuando el sitio en cuestión no logra una productividad satisfactoria.

El sitio puede considerarse constante sin tener en cuenta la selección de la especie, la calidad del sitio tiene significado solo con respecto a uno o más especies que pueden ser consideradas para el manejo en una situación particular (Clutter *et al.*, 1983). Por ejemplo un sitio puede ser excelente para el crecimiento de *Nothofagus alpina*, pero puede ser de muy pobre calidad para el crecimiento de *Pinus radiata*.

La calidad de sitio es de vital importancia respecto de la elección de los mejores sitios para el crecimiento de la especie adecuada, su correcta medición e interpretación son tarea importante para casi todos los manejos forestales. Según Clutter *et al.*, 1983, el tamaño y valor de los productos a distintas edades son completamente controladas por la calidad de sitio y la densidad del rodal. Esto se puede apreciar en trabajos como el de Meneses y Guzmán (2000), en el cual se expresa la importancia del sitio, además del esquema silvicultural, en la potencialidad de producción de madera clear (libre de nudos) en plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. Con ello las inversiones en sitios de alta productividad (buenos) para la producción de madera clear están totalmente justificadas y constituirían una mala decisión económica en sitios menos productivos.

Las respuestas a ciertas medidas culturales difieren a menudo dramáticamente entre las áreas de desigual calidad de sitio (Clutter *et al.*, 1983).

Productividad. Según Prodan *et al.*, 1997, la productividad es un concepto biológico que no puede ser expresado matemáticamente. Por ello se ha optado por representar la calidad de sitio a través de un valor o índice denominado índice de sitio. Este es una expresión cuantitativa de la calidad de sitio.

Debido a la gran importancia práctica atada a la evaluación eficaz de calidad de sitio, gran esfuerzo ha sido dedicado al desarrollo de técnicas para cuantificar la calidad de sitio. Clutter *et al* (1997), clasifica estos métodos como sigue:

A. Métodos Directos

Estimación de los registros históricos de rendimiento.
Estimación basada en los datos de volumen del rodal.
Estimación basada en los datos de altura del rodal.

B. Métodos Indirectos

Estimación de las relaciones Inter-especie del dosel superior.
Estimación de las características de la vegetación menor.
Estimación de los factores topográfico, climático y edáfico.

Los métodos directos de evaluación necesitan de la existencia actual o en el pasado, de las especies de interés en el lugar particular donde la calidad de sitio va a ser evaluada (la existencia pasada solo es útil si las mediciones fueron hechas en el momento oportuno y se conservan hasta el presente). Cuando las mediciones en el sitio de las especie de interés no están disponibles, deben emplearse métodos indirectos. Los métodos directos casi invariablemente proveen de mejores evaluaciones de la calidad de sitio que los métodos indirectos (Clutter *et al.*, 1983).

2.2 Curvas de índice de sitio

Según Prodan *et al*, 1997, se han propuesto diferentes métodos para desarrollar funciones de sitio, que varían según el principio aplicado, el tipo de datos, el método de construcción y el modelo empleado.

2.2.1 Tipos de datos: parcelas permanentes, parcelas temporales y análisis fustal

Las parcelas permanentes generan series de desarrolló altura-edad que permiten la construcción de curvas anamórficas y polimórficas (Prodan *et al.*, 1997). García (1983) propuso un sistema que permite construir curvas polimórficas en base a series de dos pares de observaciones.

Con parcelas temporales solo puede adoptarse el principio del anamorfismo (Prodan *et al.*, 1997). Para generar relaciones eficaces son necesarias como mínimo 100 parcelas, aplicando el método convencional de la curva guía.

El análisis fustal provee de información para la construcción de series de crecimiento desde la plantación, hasta el momento del análisis. Los árboles muestra generalmente corresponden a árboles dominantes, adultos, iguales o mayores a la edad clave. Con la información fustal se realizan generalmente funciones polimórficas, y es posible agruparlos con datos de parcelas permanentes (Prodan *et al.*, 1997).

2.2.2 Construcción de las curvas

Uno de los primeros pasos al construir funciones de índice de sitio consiste en dividir el área de estudio en zonas para las cuales se construyen funciones independientes. A veces, la necesidad de zonificar se detecta recién al validar el modelo.

Un ejemplo de zonificación es el mencionado por Prodan *et al.* (1997), el cual empleó el cociente área basal / altura dominante (metros cuadrados de área basal por metro lineal de altura), que representa un índice de “esbeltez” o forma ya que se relaciona el grosor del árbol con la altura¹, esto junto a muchos otros antecedentes, permitió un agrupamiento de zonas homogéneas de productividad en área basal, dentro de cada una de las cuales se ajustaron funciones de índice de sitio. Esta zonificación se realizó en Chile para las plantaciones de *Pinus radiata* de todo el país, dentro del proyecto cooperativo Modelo Nacional de Simulación.

La ecuación de crecimiento en altura (y de índice de sitio), más usada corresponde a la de Bertalanffy-Richards (García, 1983) o más conocida como Chapman-Richards.

$$H = a [1 - \exp \{ -b (E - t_0) \}]^{1/c} \quad [1]$$

Donde:

H = Altura Dominante (m)

E = Edad (años)

a = Parámetro que indica la asíntota

b = Parámetro de escala

c = Parámetro de forma

t₀ = Parámetro que indica el valor inicial de la abcisa

Sistema Anamórfico. Según Prodan *et al.* (1997), durante muchos años, las curvas de índice de sitio se construyeron suponiendo que el desarrollo de la relación altura-edad para los diferentes sitios se daba con una tendencia constante, lo que se expresaba también en una proporcionalidad constante. Vale decir, la altura de un rodal en una cierta clase de sitio sería una proporción

¹ Ortega, A. 2002. Universidad Austral de Chile. Instituto de Manejo Forestal. Comunicación personal.

constante de la altura correspondiente a otra clase de sitio o independientemente de la edad; esto se denominó curvas anamórficas, de formas iguales o análogas, también isomórficas o proporcionales.

Método de la curva guía. Este ha sido el método más tradicional de construcción de funciones de índice de sitio anamórficas (Prodan *et al.*, 1997). A partir de una relación única para todos los datos de altura sobre edad, se deriva, por el principio de proporcionalidad constante, el resto de las funciones.

Si la función promedio ajustada es:

$$\ln H_{\text{dom}} = b_0 + b_1 / t \quad [2]$$

El índice de sitio promedio correspondiente a esa función es para la edad clave t_c :

$$\ln S = b_0 + b_1 / t_c \quad [3]$$

Despejando b_0 y reemplazándola en la función, queda:

$$\ln H_{\text{dom}} = \ln S - b_1 / t_c + b_1 / t = \ln S + b_1(1 / t - 1 / t_c) \quad [4]$$

Sistema Polimórfico. Se ha comprobado que la proporcionalidad constante no es tal en todos los casos y que la altura y la edad son independientes (Prodan *et al.*, 1997), o sea se producen curvas de varias formas no proporcionales (polimórficas), las que dependen de las relaciones altura-edad observadas en diferentes clases de sitio. Además presentan una mayor relación con la evolución real de la altura y producen una estimación insesgada del sitio.

Construcción de curvas polimórficas

Según Prodan *et al.*, 1997, la construcción de estas curvas deben seguir los siguientes pasos en el método tradicional:

a) Cada unidad independiente (parcelas permanentes o análisis fustal) aporta una curva de desarrollo que se ajusta a una función, como por ejemplo, la de Chapman-Richards.

$$H_{\text{dom}} = a_1 (1 - \exp(-b_1 t))^{c_1} \quad [5]$$

b) Si no se conoce el índice de sitio para cada unidad, éste se estima a partir de la función anterior, reemplazando la edad por la clave, y se ajusta una función independiente del tipo:

$$S = a_2 (1 - \exp(-b_2 t))^{c_2} \quad [6]$$

c) Se relacionan los parámetros de las curvas ajustadas con la altura e índice de sitio, mediante regresiones como:

$$\begin{array}{ll} a_1 = P_1 S^{P_2} & a_2 = q_1 H^{q_2} \\ b_1 = P_3 & b_2 = q_3 \\ c_1 = P_4 S^{P_3} & c_2 = q_4 H^{q_5} \end{array}$$

d) Se construyen modelos generalizados del tipo:

$$H = p_1 S^{P_2} (1 - \exp(p_3 t))^{P_4 S^{P_5}} \quad [7]$$

$$S = q_1 H^{q_2} (1 - \exp(q_3 t))^{q_4 H^{q_5}} \quad [8]$$

Existen además otros índices para indicar la productividad de un sitio como lo es la estimación del índice de sitio en base a factores ambientales o a través del denominado índice de productividad.

Modelo de ecuaciones diferenciales estocásticas. En 1983, García desarrolló, como parte de una metodología para modelar el crecimiento de rodales en plantaciones forestales, un modelo y un procedimiento de estimación para predecir el crecimiento en altura de rodales coetáneos. Según esto el crecimiento en altura es modelado por una ecuación diferencial estocástica en la que la parte determinística es equivalente al modelo de Bertalanffy-Richards (García, 1983). El modelo también incluye un componente estocástico (probabilístico), que representa los errores de medición y perturbaciones ambientales. Todos los parámetros son estimados simultáneamente por un procedimiento no lineal de máxima verosimilitud.

El sistema de ecuaciones diferenciales estocásticas permite trabajar con datos de parcelas permanentes o de análisis fustal y tiene las siguientes características.

- a) No es necesario que las series de datos pasen por la edad clave, permitiendo determinar el índice de sitio a partir de plantaciones jóvenes generando una buena estimación de la asíntota.
- b) Permite probar diferentes formas del modelo, tales como; asíntota común para todas las parcelas o asíntotas independientes por parcelas y con las curvas pasando por el origen o libres.
- c) Solo se requieren, como mínimo, series de tres mediciones consecutivas para la estimación de los parámetros del modelo de altura.

El modelo utilizado es el de Chapman-Richards:

$$H = a (1 - \exp^{-bt})^{1/c} \quad [9]$$

El concepto tradicional de índice de sitio, requiere que solo un parámetro (a , b , c , o alguna función de estos) varíe con el sitio, siendo el resto igual para todos los sitios. Una opción común es tomar a en [1], como el parámetro índice. En ese caso las curvas se llaman anamórficas, porque las curvas individuales difieren solo por un cambio de escala en el eje H . Todos los otros tipos de curvas se llaman

polimorficas, donde el parámetro índice es b , y las curvas difieren entonces en la escala del eje t (Celis, 1996).

El crecimiento en altura y el uso de índices de sitio pueden ser representados por una ecuación diferencial, conteniendo una un parámetro que varía con la calidad de sitio (García, 1983). Para [1] la forma diferencial es:

$$dH / dt = (b / c) * (a^c H^{1-c} - H) \quad [10]$$

Y su integración, da la función de transición global que permite obtener la altura a una edad dada:

$$H_{(t)} = a [1 - H_{(t_0)}^c / a^c] e^{-b(t-t_0)}^{1/c} \quad [11]$$

donde

H = altura dominante (m)

t = tiempo (años)

a = parámetro que corresponde a la asíntota en altura que se alcanza cuando t tiende a infinito.

b = factor de escala que modifica la tasa de crecimiento.

c = parámetro que determina la forma de la curva.

Esta función tiene generalmente forma sigmoidea con punto de inflexión en:

$$h = a (1 - c)^{1/c}$$

Las curvas de índice de sitio se obtienen fijando un punto inicial adecuado, por ejemplo $t_0 = 0$ y $H(t_0) = 0$ para [1]. A veces se podría obtener un mejor ajuste de los datos si las curvas no son obligadas a pasar por el origen, dejando el punto inicial como otro parámetro a ser estimado. Las malezas, las técnicas de plantación, daños en los primeros años, pueden producir variaciones substanciales en el crecimiento inicial en altura. Estos efectos pueden modelarse desplazando el origen de las curvas (García, 1983).

García (1983) sostiene que cambiando la variable de estado de H a H^c , el modelo de Richards [2], puede escribirse como una ecuación diferencial lineal:

$$dH^c / dt = b (a^c - H^c) \quad [12]$$

siendo conveniente desde el punto de vista matemático, especialmente cuando se le agrega una estructura estocástica:

$$dH^c / dt = b (a^c - H^c) + \sigma(t) dw(t) \quad [13]$$

donde

σ = parámetro a ser estimado

w = proceso estandarizado de Wiener representando la variación ambiental

Las estimaciones mediante mínimos cuadrados en modelos no lineales, pueden tener propiedades óptimas, si las desviaciones de las curvas son independientemente distribuidas, con media cero y varianza normal. Sin embargo, las mediciones repetidas sobre un individuo o una parcela están correlacionadas y las desviaciones tienden a incrementarse con el tiempo. Además puede haber un efecto sobre el modelo de las desviaciones al azar de la naturaleza, como sequía, insectos, etc. Estas perturbaciones tienen efecto acumulativo, haciendo que los errores estén correlacionados y tengan varianzas crecientes en el tiempo. Fallando el supuesto de errores no correlacionados, los estimadores de mínimos cuadrados pueden ser ineficientes y los errores pueden ser fuertemente subestimados (García, 1994). Aquí surge la utilidad de las ecuaciones diferenciales con un elemento estocástico, que representa los efectos de la fluctuación ambiental.

Esta función involucra 8 parámetros, los tres de la ecuación de Chapman-Richards (a , b y c), H_0 y t_0 , que definen el origen de las curvas y σ , σ_m y σ_0 que no afectan la forma de las curvas y son específicos del programa, afectando los procesos de estimación. La estimación de estos parámetros se realiza, en forma simultánea, por el método de máxima verosimilitud.

La función de verosimilitud es la probabilidad de que los datos observados sean generados por el modelo (probabilístico), considerada como una función de los parámetros desconocidos. Las estimaciones de máxima verosimilitud son aquellos valores de los parámetros para los cuales la función de verosimilitud alcanza su valor máximo (García, 1994). De todos los valores posibles de los parámetros, las estimaciones de máxima verosimilitud son las que tienen mayor probabilidad de originar una muestra cercana a la observada (García, 1994).

Modelos opcionales. Del modelo general, se pueden definir cuatro modelos. De los ocho parámetros considerados, algunos pueden ser globales (comunes a todas las parcelas) y otros locales (varían de parcela en parcela). Las cuatro configuraciones del modelo general son descritas en el diseño de investigación.

3. DISEÑO DE INVESTIGACION

3.1 Antecedentes generales

En este trabajo se utilizaron zonas de crecimiento previamente delimitadas por el proyecto FONDEF “Software *Nothofagus*”, a través de información climática, edáfica, geográfica, vegetacional, tipología forestal y ordenación territorial de las especies Roble-Raulí-Coigüe (Ortega y Gezan, 1999b). En este proyecto se zonificaron las áreas localizadas entre los 37°00' y los 42° 00' de latitud sur en Chile. La información cartográfica provino del proyecto Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile (CONAF *et al.*, 1998). Este proyecto finalmente arrojó un mapa de delimitación potencial para los renovales (anexo 2), que incluyó cuatro zonas de crecimiento y once subzonas. Las zonas son descritas en el anexo 3.

El proyecto *Nothofagus* provee a su vez los datos utilizados en este trabajo. La información corresponde a las mediciones realizadas en la décima región, en cada una de las cuatro zonas presentes, en las cuales se realizaron muestreos destructivos de árboles dominantes y codominantes volteados desde parcelas temporales previamente medidas. Estos datos además son relevantes a otros estudios en los renovales. Cabe señalar que el autor no participó de la medición de datos en terreno.

3.2 Muestreo

El proyecto “Software *Nothofagus*” realizado por la Universidad Austral de Chile (FONDEF D9711065), recopiló información histórica de los renovales (estudios anteriores), además generó su propia información en base a 128 parcelas permanentes y 60 parcelas temporales de volteo (Ortega y Gezan, 1999a).

Una vez obtenida la gran cantidad de información de distintas fuentes y formatos, se creó una base de datos única, cuya confección requirió un exhaustivo trabajo de transformación a un formato único, completar bases de datos menos elaboradas y por último la realización de un minucioso proceso de depuración de datos (Ortega y Gezan, 1999a).

En el proyecto mencionado, las mediciones de parcelas temporales se realizaron durante el periodo comprendido entre agosto y diciembre de 1999, en donde se estableció un total de 60 conglomerados, seleccionadas de acuerdo a la estratificación de zonas (Ortega y Gezan, 1999a).

Las unidades de muestreo realizadas fueron constituidas por conglomerados de dos parcelas circulares de 125 m² cada una, en donde se midió los árboles individuales, y además, se voltearon dos árboles para extraer rodelas para un análisis fustal completo, y se midió un tercer árbol en pie (con relascopio y forcípula de altura) para un análisis fustal simple. En total se voltearon 240 árboles de Roble, Raulí y Coigüe.

El proyecto generó información para la realización de funciones de índice de sitio, funciones de volumen, funciones de ahusamiento y ponderaciones de descuento por calidad.

En cuanto a la información generada para la realización de funciones de índice de sitio, en cada parcela se volteo el árbol dominante (definido como aquel de mayor DAP). De todas las rodajas extraídas, se obtuvieron los antecedentes de alturas a distintas edades, los cuales permitirán en definitiva generar las funciones de sitio (polimórficas y anamórficas).

Con la información obtenida de los muestreos destructivos de todo el proyecto, se generó una base de datos (Sección1.txt), cuyas variables se presentan en el anexo 4. De esta base fueron separadas las parcelas pertinentes al estudio, que en total sumaron 18. La información general por parcela se encuentra en el anexo 5.

La estimación del sitio en función de altura queda expresada como la altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea.

3.3 Ajuste de funciones de sitio y altura dominante

3.3.1 Análisis y validación de datos

Esta actividad se realizó con el propósito de que la información recolectada sea confiable o libre de errores, los cuales por lo general ocurren en la medición de datos en terreno o digitación de ellos a la base de datos. La búsqueda de posibles errores se realizó de forma gráfica y analítica de acuerdo a los siguientes criterios²:

Revisión Numérica:

- a) Que la altura de corte de la sección superior sea mayor a la inferior
- b) Que la razón altura total vs. diámetro altura del pecho (HT/DAP), se encuentre entre 0,7 y 1,7 (m/cm).

Revisión Gráfica:

- a) Diámetro superior con corteza vs. la altura de corte (DSCC vs. HCORT). Utilizada principalmente para detectar diferencias muy abruptas entre secciones contiguas.
- b) Altura de corte vs. el número de anillos (HTCORT vs. NANI). Esta relación debe ser siempre decreciente.

Además de las revisiones anteriores, se seleccionaron solo aquellos árboles dominantes y codominantes, los cuales representan apropiadamente el desarrollo en

² Ortega, A. 2002. Universidad Austral de Chile. Instituto de Manejo Forestal. Comunicación personal.

altura dominante de la parcela. Los criterios de selección se presentan a continuación³:

- a) Gráfico HTCORT vs. NANI. Se debe observar una recta con pendiente negativa tendiente a una línea horizontal. Aquellos árboles que presentaron algún grado de supresión (recta tendiente a una línea vertical), fueron descartados.
- b) Posición sociológica y sanidad. Los árboles seleccionados deben corresponder a los de buena sanidad (1 ó 2), y una adecuada posición sociológica (1 ó 2).
- c) El diámetro a la altura del pecho debe ser mayor al diámetro cuadrático medio (DAP > DC) de la parcela a la cual pertenece. Esto es importante para aquellos árboles que tienen información con algún grado de incertidumbre en su información.

Luego con la información depurada se logró información consistente para el ajuste de los modelos.

3.3.2 Generación de series altura-edad

Para la estimación de las edades, a partir de los anillos de crecimiento en cada una de las secciones de corte del árbol a diferentes alturas, se aplicó el algoritmo propuesto por Carmean, y descrito por Dyer y Bailey (1987), mediante el programa computacional ANATEST.m., desarrollado en MATLAB, el cual es específico para el análisis fustal. Luego, con los datos de este análisis, se procederá a generar las series de altura versus edad para cada uno de los árboles.

3.3.3 Ajuste del modelo

El modelo general de crecimiento en altura ajustado fue el de Chapman-Richards [1], a través de la metodología de ecuaciones diferenciales estocásticas propuesta por García (1983), utilizando el programa HTMOD (1983) del mismo autor. Este programa permite el ajuste de las cuatro versiones del modelo mencionado por separado (a y b local y a y b local t_0). En cada uno de ellos, pueden ser ajustados simultáneamente dos o tres parámetros globales y un parámetro local (García, 1983).

Los parámetros globales representan a toda la población, en cambio el parámetro local es representativo de un individuo en particular ya que se obtienen diferentes series de altura-edad.

Los datos fueron separados en estratos, es decir se ajustaron los modelos de crecimiento para toda la región, para cada una de las zonas definidas inicialmente sin diferenciación de especies y además se ajustaron modelos por especie sin diferenciación de zonas de crecimiento.

³ Ortega. A. 2002. Universidad Austral de Chile. Instituto de Manejo Forestal. Comunicación personal.

Las cuatro configuraciones de parámetros del modelo original de crecimiento Chapman-Richard, se definen de la siguiente forma:

1. Anamórfico (con asíntota individual: a local).

El parámetro a , al ser local, genera series altura-edad distintas (curvas anamórficas). Los parámetros b y c son globales y la función pasa por el origen.

$$H = a [1 - \exp(-bE)]^{1/c}$$

$$S = a [1 - \exp(-bE_c)]^{1/c}$$

2. Polimórfica (con asíntota común: b local).

Aquí el parámetro local es b , y a y c se estiman como globales. La función pasa por el origen. Se generan curvas polimórficas.

$$H = a [1 - \exp(-b)^E]^{1/c}$$

$$S = a [1 - \exp(-b)^{E_c}]^{1/c}$$

3. Anamórfica (a local con origen libre (t_0 distinto de 0)).

En esta ocasión a es el parámetro local, b , c y t_0 se estiman como globales. La función corta a la abscisa en $E = t_0$ para $H = 0$. Se producen curvas anamórficas.

$$H = a [1 - \exp(-b(E - t_0))]^{1/c}$$

$$S = a [1 - \exp(-b(E_c - t_0))]^{1/c}$$

4. Polimórfica (b local con origen libre (t_0 distinto de 0)).

Aquí el parámetro local es b , y los globales son a , c y t_0 . La función corta a la abscisa en $E = t_0$ para $H = 0$. Se generan curvas polimórficas.

$$H = a [1 - (\exp-b)^{(E - t_0)}]^{1/c}$$

$$S = a [1 - (\exp-b)^{(E_c - t_0)}]^{1/c}$$

donde:

H = altura (m)

E = edad (años)

E_c = edad clave (años)

t_0 = valor inicial de la abscisa

Los modelos quedan expresados en funciones del índice de sitio y de la altura dominante de la siguiente forma:

1. Anamórfico (con asíntota individual: **a local**)

$$H = IS \left\{ \left\{ \frac{1 - \exp^{-bE}}{1 - \exp^{-bEc}} \right\}^{1/c} \right\} \quad \text{Función de altura}$$

$$IS = H \left\{ \left\{ \frac{1 - \exp^{-bE}}{1 - \exp^{-bEc}} \right\}^{-1/c} \right\} \quad \text{Función de sitio}$$

2. Polimórfico (asíntota común: **b local**).

$$H = a \left\{ \left\{ 1 - \left[1 - (IS/a)^c \right]^{E/Ec} \right\}^{1/c} \right\} \quad \text{Función de altura}$$

$$IS = a \left\{ \left\{ 1 - \left[1 - (H/a)^c \right]^{E/Ec} \right\}^{1/c} \right\} \quad \text{Función de sitio}$$

3. Anamórfico (origen libre: **a local t₀ ≠ 0**)

$$H = IS \left\{ \left\{ \frac{1 - \exp^{-b(E-t_0)}}{1 - \exp^{-b(Ec-t_0)}} \right\}^{1/c} \right\} \quad \text{Función de altura}$$

$$IS = H \left\{ \left\{ \frac{1 - \exp^{-b(E-t_0)}}{1 - \exp^{-b(Ec-t_0)}} \right\}^{-1/c} \right\} \quad \text{Función de sitio}$$

4. Polimórfico (origen libre: **b local t₀ ≠ 0**)

$$H = a \left\{ \left\{ 1 - \left[1 - (IS/a)^c \right]^{(E-t_0)/(Ec-t_0)} \right\}^{1/c} \right\} \quad \text{Función de altura}$$

$$IS = a \left\{ \left\{ 1 - \left[1 - (H/a)^c \right]^{(E-t_0)/(Ec-t_0)} \right\}^{1/c} \right\} \quad \text{Función de sitio}$$

3.3.4 Prueba de los modelos

Para la selección del mejor modelo, se utilizaron los siguientes criterios que ponen a prueba la capacidad de proyección de las funciones. Los datos utilizados para la validación fueron los mismos utilizados para el ajuste.

Los estadígrafos fueron calculados para cada uno de los diferentes estratos.

Medidas de error

- Error cuadrático medio $(ECM) = \sum (o - e)^2 / n$
- Error medio absoluto $(ECA) = \sum |o - e| / n$

Para el calculo de los estimadores en porcentaje, se considerara las siguientes formulas:

ECM %= (ECM absoluto / valor observado medio) * 100

ECA %= (ECA absoluto / valor observado medio) * 100

Medidas de sesgo

- Diferencia agregada $(DIFA) = \sum (o - e) / n$

Para el calculo del estimador en porcentaje, se considerara la siguiente formula:

DIFA %= (DIFA absoluto / valor observado medio) * 100

Donde:

o = Valor observado

e = Valor estimado

n = Numero total de observaciones

El error cuadrático medio (ECM) y el error medio absoluto (ECA) señalan el grado de error existente entre el modelo recién ajustado y los valores reales. Por lo tanto estos errores dependen en gran medida de la homogeneidad de los datos (Celis, 1996). Valores entre un 10 a 15% son considerados aceptables⁴. La diferencia agregada (DIFA) es una medida de sesgo, que permite conocer si se está produciendo sobre o subestimación del modelo ajustado en contraste a las series reales de altura-edad (Celis, 1996).

Análisis gráfico de residuales. Esta actividad esta relacionada con la representatividad del modelo sobre los datos. Los residuos (valor observado menos el valor estimado), serán graficados en función de la edad para ver su distribución en el tiempo.

Verosimilitud. Es otro elemento para considerar en la elección del mejor modelo. Los valores de verosimilitud dependen del numero de series, es decir la verosimilitud es comparable solo entre los modelos ajustados con el mismo set de datos, o entre estratos con el mismo numero de series.

La selección del mejor modelo en cada estrato se realizará mediante el criterio del máximo valor de verosimilitud, indicándose una mejor bondad de ajuste del modelo en particular. Los valores de verosimilitud son arrojados por el programa HTMOD. Diferencias en dos unidades de verosimilitud entre modelos con igual numero de parámetros, son consideradas como significativas (García, 1983). Cuando se comparan modelos con diferente numero de parámetros, es conveniente adicionar media o una unidad por cada parámetro adicional en el valor de verosimilitud del modelo.

⁴ Ortega, A. 2002. Universidad Austral de Chile. Instituto de Manejo Forestal. Comunicación personal.

3.3.5 Curvas Índice de sitio

Una vez ajustado los modelos y seleccionado el mejor, se obtendrán curvas de sitio y altura dominante para los renovales de Roble - Raulí - Coigüe en los estratos definidos con anterioridad.

La edad clave a ser utilizada será de 20 años. Si bien es cierto la edad clave en el caso de este tipo forestal es de 35 a 40 años, se optará por 20 años para hacerla homologable con la edad clave de pino radiata.

3.3.6 Comprobación de Hipótesis

En esta parte del estudio se decidirá a través de un análisis estadístico y gráfico de los modelos seleccionados, si se justifica la utilización de modelos de crecimiento por zonas versus la utilización de un modelo general que las incluya a todas. A su vez, también se justificara la utilización de modelos independientes por especie versus un modelo general.

Evaluación gráfica

De este tipo de análisis se puede distinguir a priori, cómo es la tendencia de cada uno de los modelos en los distintos estratos.

Evaluación estadística

Para la realización de este análisis se utilizó el Índice de Verosimilitud

Índice de Verosimilitud.

El Índice de Verosimilitud se logra por la diferencia de verosimilitudes máximas asumiendo modelos separados por zona o especie y un modelo general regional (λ), siendo la hipótesis nula $-2 \ln \lambda$ distribuida como χ^2 , con los grados de libertad igual a la diferencia en el número de parámetros para los dos casos (Davel, 1998).

Formula

$$-2 \ln \lambda = -2 [(\sum X) - (Y)]$$

Donde :

X = Verosimilitud de los modelos individuales

Y = Verosimilitud del modelo regional

Grados de libertad

$$GL = X * 5 - 1 * 5$$

Donde:

X = Numero de modelos zonales

5 = 3 parámetros + 2 varianzas

1 = Modelo o estrato Regional

4. PRESENTACION Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

4.1 Ajuste de funciones de sitio y altura dominante

4.1.1 Análisis y validación de los datos

La base de datos fue analizada gráfica y numéricamente con el objetivo de detectar inconsistencias. Los filtros aplicados fueron detallados con anterioridad en el diseño de investigación. La aplicación de estas restricciones a los datos derivó en la eliminación de los árboles que pudiesen originar problemas en las estimaciones posteriores.

4.1.2 Generación de series altura-edad

Las estimaciones de las alturas a diferentes edades se obtuvieron mediante el proceso de transformación de número de anillos / altura de corte, mediante el algoritmo propuesto por Carmean y descrito por Dyer y Baley (1987). El archivo obtenido presentó para cada árbol una serie altura versus edad.

Las series altura-edad fueron graficadas utilizando el programa BIOPLOT 1.0 con el objeto de detectar anomalías en las curvas y a su vez tener una visión global de la tendencia de los datos.

4.1.3 Estadística descriptiva

Una vez aplicado los filtros anteriores quedaron solo aquellos árboles aptos para la generación de las curvas de índice de sitio / altura dominante. El cuadro 1 presenta el número de árboles por zona y por especie.

Cuadro 1: Numero de árboles por especie y por zona del estudio.

Zona	Especie			Total general
	Raulí	Roble	Coigüe	
1	-	3	3	6
2	2	2	-	4
3	-	12	6	18
4	2	-	3	5
Total general	4	17	12	33

La cantidad total de árboles fue separada en estratos para la obtención de curvas de sitio más representativas. El primero de ellos es el estrato regional, el cual incluyo todos los árboles de la décima región (sin diferenciación). También se obtuvieron curvas para cada zona por separado (4 estratos), las cuales incluyeron todos los árboles presentes en la zona sin diferenciación de especie. Además se obtuvieron curvas para cada especie por separado (3 estratos), las que incluyeron todos los

árboles de la especie sin diferenciación de zonas. Los cuadros 2, 3 y 4 muestran los estadísticos descriptivos para cada especie en cada una de las zonas.

Cuadro 2: Estadística descriptiva de Raulí por zona.

	Raulí					
	Zona 2			Zona 4		
	Dap (cm)	HT (m)	Edad (años)	Dap (cm)	HT (m)	Edad (años)
N° de casos	2	2	2	2	2	2
Mínimo	39	25	47	16	18	41
Máximo	43	26	48	25	20	42
Media	41	25,5	47,5	20,5	19	41,5
Desv. Estándar	2,83	0,71	0,71	6,36	1,41	0,71
Coef. de Variac.	0,069	0,028	0,015	0,31	0,74	0,017

Cuadro 3: Estadística descriptiva de Roble por zona.

	Roble								
	Zona 1			Zona 2			Zona 3		
	Dap (cm)	HT (m)	Edad (años)	Dap (cm)	HT (m)	Edad (años)	Dap (cm)	HT (m)	Edad (años)
N° de casos	3	3	3	2	2	2	12	12	12
Mínimo	36	28	50	28	27	52	11	11	18
Máximo	49	36	62	33	29	52	59	37	67
Media	41,33	32,67	57,33	30,5	28	52	31,08	22,25	40,67
Desv. Estándar	6,81	4,16	6,41	3,54	1,41	0	15,11	8,04	15,65
Coef. de Variac.	0,17	0,12	0,11	0,11	0,051	0	0,49	0,361	0,39

Cuadro 4: Estadística descriptiva de Coigüe por zona.

	Coigüe								
	Zona 1			Zona 3			Zona 4		
	Dap (cm)	HT (m)	Edad (años)	Dap (cm)	HT (m)	Edad (años)	Dap	HT	Edad
N° de casos	3	3	3	6	6	6	3	3	3
Mínimo	23	18	36	23	14	30	19	18	34
Máximo	33	27	47	55	34	61	29	20	39
Media	28,33	23,33	39,67	38,33	23	43,17	24,67	19	37
Desv. Estándar	5,03	4,73	6,35	13,44	8,65	12,53	5,13	1	2,65
Coef. de Variac.	0,178	0,20	0,16	0,35	0,376	0,29	0,208	0,05	0,07

4.1.4 Ajuste de los modelos

Estimación de los parámetros. Con las series altura-edad se estimaron los parámetros para las cuatro variantes del modelo de crecimiento en altura dominante utilizando el programa HTMOD, separados en los 8 estratos antes mencionados.

Los valores de los parámetros para cada modelo por estrato se encuentran en el anexo 6, cuadros 1, 2 y 3. En ellos se aprecia que en algunos estratos, las asíntotas de los modelos presentaron valores bastante elevados desde el punto de vista biológico, es decir el parámetro “a” o el máximo crecimiento en altura cuando la edad tiende al infinito no eran razonables, esto aun cuando no conocemos los valores máximos de crecimiento de las especies. Ello en parte explicable porque los modelos estiman una asíntota estadística o proyección del máximo crecimiento según los datos proporcionados. A pesar de lo anterior las estimaciones obtenidas fueron coherentes.

Modelos sin convergencia no fueron tomados en cuenta para los análisis posteriores. Además los ajustes en los estratos zona 1 y Roble no fueron posibles de realizar por el programa HTMOD, dada la variabilidad existente en esas zonas. Finalmente se trabajó en seis estratos.

Las curvas guías del modelo se graficaron en contraste a los valores reales de altura-edad para cada estrato de datos (anexo 7). Esta sirvió para conocer en primera instancia como es el comportamiento de cada modelo ajustado. El programa utilizado para esto fue BIOPLOT 1.0. En general, se observó que los modelos tienen la misma tendencia o desarrollo a través de los datos, es decir no hay una diferencia clara entre los modelos locales y con t_0 . Pero en definitiva las diferencias o no son analizadas en las pruebas de error y sesgo de los modelos.

Prueba y selección de los modelos. En esta parte del trabajo es esencial la elección de uno de los cuatro modelos de crecimiento en altura por cada uno de los estratos, el cual representa de la mejor manera esa situación específica. Para ello fueron utilizadas las herramientas de error y sesgo, así como la verosimilitud. Las diferencias en valor de error, sesgo y verosimilitud entre los 4 modelos en cada estrato, fueron tratadas a través de un sistema de ponderación, asignando un número uno al ítem que presentase el menor valor respecto a los demás, y números mayores de dos, tres y cuatro para los otros modelos del mismo estrato. La suma de los valores generales originó un ranking de ubicación de la primera a la cuarta posición, que dio paso a la elección del modelo más representativo. Todo lo anterior se repitió para cada estrato.

Para los cálculos de las medidas de error y sesgo se utilizó el mismo set de datos usado en el ajuste de los modelos.

A continuación se presentan los resultados para cada estrato en forma separada y ordenada.

4.1.5 Estrato Regional

Medidas de error y sesgo. Los valores obtenidos para el estrato regional son presentados en el cuadro 5, además del sistema de ranking. Se observan comportamientos similares para ambas medidas de error en los cuatro modelos, en cambio las diferencias entre el valor observado y el estimado (Sesgo) son mas claras, se diferencian los modelos a y b local t_0 con un menor sesgo, ambos casos presentan valores positivos o sea subestiman en su ajuste, en cambio los modelo a y b local presentan mayor sesgo, ambos casos sobreestiman en su ajuste. El modelo seleccionado a priori es el b local t_0 ya que presenta el primer lugar en el ranking.

Cuadro 5. Medidas de error, sesgo y ranking para el estrato Regional.

Estrato	Modelos	N	Error		Sesgo	Ponderación			Total	Ranking
			EMC (%)	EMA (%)	DIFA (%)					
Regional	a local	626	58,24	18,55	-2,76	4	4	3	11	4
	a local t_0	626	57,05	18,15	0,65	2	2	2	6	2
	b local	626	58,03	18,47	-3,05	3	3	4	10	3
	b local t_0	626	56,7	18,04	0,36	1	1	1	3	1

Verosimilitud. El mejor modelo fue seleccionado a través del criterio de máxima verosimilitud, comparando los valores en un mismo estrato. Los valores de verosimilitud entregados por cada modelo en cada estrato también fueron ponderados según sus valores (ranking, cuadro 6), lo cual permitió elegir el mejor modelo.

Cuadro 6. Valores de verosimilitud y ranking para el modelo Regional.

Estrato	Modelo	Verosimilitud	Ranking
Regional	a local	819,36	4
	a local t_0	823,06	2
	b local	819,95	3
	b local t_0	823,43	1

El modelo con la máxima verosimilitud es el b local t_0 , por lo tanto obtuvo el primer lugar en el ranking. Los valores de verosimilitud presentan diferencias significativas entre los modelos con origen libre (a y b local t_0) y restringido (a y b local). Los primeros presentan una mínima diferencia, sin embargo el modelo seleccionado en estricto rigor es el b local t_0 . Como se indico en el diseño experimental, diferencias de dos unidades en los valores de máxima verosimilitud pueden ser consideradas como significativas comparando modelos con igual numero de parámetros, si se comparan modelos con diferente numero de

parámetros se sugiere adicionar media unidad mas por cada parámetro adicional (García, 1983).

Gráficos de residuales. En la figura 1(anexo 8), se presenta la distribución residual de este estrato. En ella se aprecia que no existen diferencias significativas entre los modelos, es decir los gráficos son prácticamente similares sin apreciar claramente las diferencias.

Selección del modelo. Si bien las diferencias entre los modelos no son holgadas, sí existe una diferencia entre los modelos con origen libre en comparación a los de origen restringido. En el caso de este estrato se opto por la elección del modelo b local t_0 por presentar el mejor ranking en las pruebas.

4.1.6 Estratos por Zonas

Se presentan los resultados de error, sesgo, verosimilitud y grafico de residuales para las zonas 2, 3 y 4. Los ajustes para la zona 1 no fueron posibles de realizar por el programa dada la variabilidad presente en esa zona.

Medidas de error y sesgo. Los menores valores de error y sesgo se obtuvieron para el modelo b local t_0 en las zonas 2 y 3 (cuadro 7), a excepción del EMC en la zona 3, el la cual el menor valor lo obtuvo el modelo a local t_0 , pero en términos generales tal como lo indica la ponderación, el modelo con mas alto ranking es el b local t_0 en ambos casos. Para la zona 4, la única convergencia se produjo para el modelo b local t_0 , y dado que los modelos sin convergencia fueron eliminados, automáticamente se produjo la elección de ese modelo.

Cuadro 7. Medidas de error, sesgo y ranking para los estratos Zonales.

Estrato	Modelo	N	Error			Sesgo			Ponderación		
			EMC (%)	EMA (%)	DIFA (%)	EMC	EMA	DIFA	Total	Ranking	
Zona 2	a local	76	20,81	10,06	-5,34	4	4	4	12	4	
	a local t_0	76	18,93	9,52	-2,28	2	2	2	6	2	
	b local	76	20,26	9,90	-3,66	3	3	3	9	3	
	b local t_0	76	18,64	9,46	-1,99	1	1	1	3	1	
Zona 3	a local	341	43,83	15,39	-1,84	3	4	3	10	3	
	a local t_0	341	43,28	15,33	1,42	1	2	2	5	2	
	b local	341	44,16	15,38	-2,18	4	3	4	11	4	
	b local t_0	341	43,43	15,29	0,86	2	1	1	4	1	
Zona 4	a local	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	a local t_0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	b local	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	b local t_0	95	18,94	12,98	7,92	-	-	-	-	1	

Verosimilitud. El modelo b local t_0 es el que presenta la mayor verosimilitud en las zonas 2 y 4 (cuadro 8), aunque estas diferencias no son significativas. La zona 3 en cambio presenta un máximo de verosimilitud en el modelo a local t_0 .

Cuadro 8. Valores de verosimilitud y ranking para los Estratos por Zona.

		Estrato		
		Modelo	Zona 2	Zona 3
Verosimilitud	a local	98,12	440,65	141,47
	a local t_0	98,28	442,45	141,47
	b local	98,19	439,65	141,39
	b local t_0	98,38	441,09	144,17
Ranking	a local	4	3	2
	a local t_0	2	1	3
	b local	3	4	4
	b local t_0	1	2	1

Análisis de residuales. En las figuras 2, 3 y 4 (anexo 8), se presentan las distribuciones residuales de estos estratos. En las zonas 2 y 3 no se aprecian diferencias graficas. En cambio en la zona 4 se aprecia solo el grafico del modelo b local t_0 ya que fue el único modelo convergente. sin apreciar claramente las diferencias.

Modelos seleccionados. A pesar de que los modelos en las distintas zonas no presentan grandes diferencias se opto por la elección del modelo b local t_0 como el mas representativo, esto aunque obtuviera el segundo lugar en verosimilitud en la zona 2.

4.1.7 Estrato por especie

Medidas de error y sesgo. Los modelos en ambos estratos presentan comportamientos similares en cuanto a error y sesgo (cuadro 9). Se sigue además la tendencia de los estratos anteriores en cuanto a que los modelos con origen libre presentan menores errores y sesgo. El modelo mejor ubicado en el ranking en ambos estratos es el modelo b local t_0 .

Cuadro 9. Medidas de error, sesgo y ranking para los Estratos por Especie.

Estrato	Modelos	N	Error		Sesgo	Ponderación			Total	Ranking
			EMC (%)	EMA (%)	DIFA (%)	EMC	EMA	DIFA		
Raulí	a local	76	47,48	20,44	-4,13	4	4	4	12	4
	a local t ₀	76	45,58	20,37	1,99	2	2	1	5	2
	b local	76	47,28	20,42	-4,11	3	3	3	9	3
	b local t ₀	76	45,27	20,33	2,21	1	1	2	4	1
Coigüe	a local	228	76,59	23,55	-2,38	4	4	3	11	3
	a local t ₀	228	76,21	23,26	-1,46	2	2	2	6	2
	b local	228	76,32	23,46	-2,49	3	3	4	10	4
	b local t ₀	228	75,81	23,05	-1,18	1	1	1	3	1

Verosimilitud. En el estrato Raulí los modelos no presentan significancia en los valores de verosimilitud, en cambio en el estrato Coigüe los modelos b local y b local t₀ presentan diferencias significativas con respecto a los modelos a local y a local t₀. En cuanto a los valores máximos de verosimilitud, en ambos estratos es obtenido por el modelo b local t₀ aunque las diferencias no son significativas con su mas cercano modelo de comparación.

Cuadro 10. Valores de verosimilitud y ranking para los Estratos por Zona.

	Modelo	Estrato	
		Raulí	Coigüe
Verosimilitud	a local	112,24	310,44
	a local t ₀	113,90	310,53
	b local	112,22	313,05
	b local t ₀	113,91	313,22
Ranking	a local	3	4
	a local t ₀	2	3
	b local	4	2
	b local t ₀	1	1

Análisis grafico de residuales. En las figuras 5 y 6 (anexo 8), se presentan las distribuciones residuales para estos estratos. En ellas no se aprecian diferencias significativas entre los gráficos. Es decir este análisis no es suficiente para la elección del mejor modelo en cada caso.

Modelo seleccionado. Aunque no presenta diferencias sobresalientes en cuanto a los valores de error, sesgo, verosimilitud y grafico de residuales, el modelo mejor ponderado es el b local t₀ por lo tanto el elegido.

4.2 Evaluación gráfica y estadística de los modelos seleccionados.

Las siguientes evaluaciones están orientadas a la determinación de uso de un modelo general, por zona o por especie.

Evaluación gráfica. Si bien la proyección del modelo en los distintos estratos no es la misma, tampoco presentan diferencias notorias (figura 1), pero cabe señalar que la zona cuatro presenta la menor tasa de crecimiento en los primeros cuarenta años para luego sobrepasar a las demás curvas hacia los 70 años.

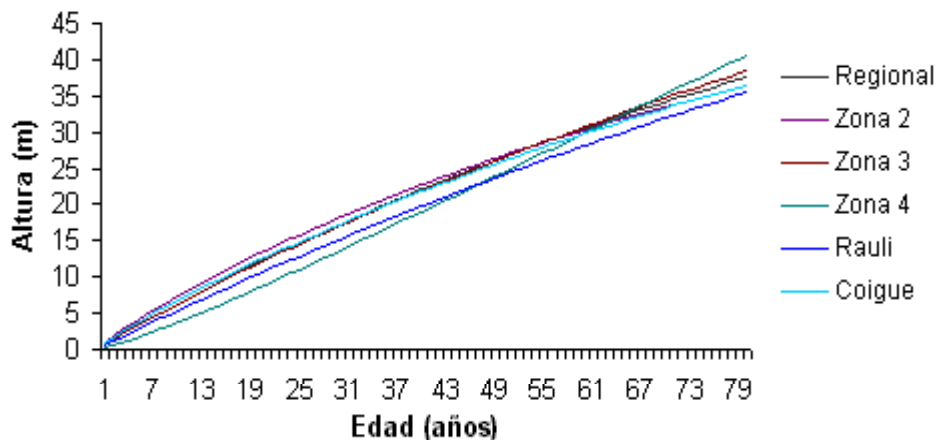


Figura 1. Desarrollo de la curva guía b local t_0 en los diferentes estratos.

Evaluación estadística. Para la realización de este análisis se utilizó el Índice de Verosimilitud, el cual será aplicado a los modelos seleccionados con anterioridad en los dos estratos (por zona y por especie). Aunque en el caso de este trabajo el modelo que mejor se ajusta en las diferentes situaciones es el b local t_0 , se recomienda utilizar en comparaciones como esta, el mismo modelo en todas los estratos, con el objetivo de simplificar el análisis⁵.

En primer lugar se planteó la hipótesis de existencia de diferencias significativas entre la utilización de los modelos de crecimiento en altura por zonas separadas, o en vez de ello aplicar un modelo general que resumiese todas las zonas. Luego se planteó la hipótesis de aplicar los modelos por especie por separado en comparación con uno Regional.

⁵ Ortega. A. 2002. Universidad Austral de Chile. Instituto de Manejo Forestal. Comunicación personal.

4.2.1 Hipótesis modelo zonal versus modelo general zonal

La probabilidad en una tabla X^2 con 10 grados de libertad y 95 % de confianza es de 18,3. Tomando en cuenta el valor del índice (cuadro 9), se puede decir que las diferencias entre las zonas y la región son estadísticamente significativas, o sea se rechaza la hipótesis de un Modelo general zonal.

Cuadro 11. Parámetros y Verosimilitud del modelo b local t_0 en los estratos general zonal y zonal.

Zona	Parámetros				Verosimilitud
	a	b	c	t_0	
2	62,80125	0,00993745	1,097925	0,00802071	98,38
3	106,8005	0,0052055	1,055258	0,017399	441,09
4	219,8191	0,00359928	0,821002	0,04978734	144,17
General zonal	81,89299	0,00756046	1,002276	0,02028896	670,91
				Índice	25,44

Como complemento a lo anterior, se compararon las medidas de error y sesgo entre los modelos por zona y el modelo general aplicado a cada zona (cuadro 12).

Cuadro 12. Medidas comparativas de error y sesgo entre el modelo general aplicado en cada zona y cada zona propiamente tal.

Estrato	Modelo Zonal			Modelo General		
	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
Zona 2	18,64	9,46	-1,99	29,48	13,33	8,40
Zona 3	73,43	15,29	0,86	45,76	16,05	4,54
Zona 4	18,94	12,98	7,92	60,73	25,33	-24,34

La zona dos y cuatro presentaron menores valores de error y sesgo que el modelo general, la zona cuatro presentó menor error cuadrático medio y menor sesgo, en cambio un mayor error medio absoluto. En términos generales se observa menor error y sesgo en las zonas, lo cual respalda lo concluido con el índice de verosimilitud en cuanto rechazar la hipótesis de un modelo común para toda la región.

4.2.2 Hipótesis modelo por especie versus modelo general por especie

La probabilidad en una tabla X^2 con 5 grados de libertad y 95 % de confianza es de 11,1. Este valor comparado con el obtenido por el índice de verosimilitud (cuadro 11), da cuenta de que las diferencias entre los modelos por especie separadamente y la región son estadísticamente no significativas, es decir se acepta la hipótesis de un Modelo general para las especies Coigüe y Raulí.

Cuadro 13. Parámetros y Verosimilitud del modelo b local t_0 en los estratos regional y por especie.

Especie	Parámetros				Verosimilitud
	a	b	c	t_0	
Raulí	96,5959	0,00575625	0,996853	0,02054435	113,91
Coigüe	80,17462	0,00688123	1,094303	0,02402964	313,22
General especie	79,13452	0,0071538	1,061631	0,02369711	424,99
				Indice	4,28

Tal como en la hipótesis anterior, el resultado estadístico es complementado comparando las medidas de error y sesgo entre los modelos por especie y el modelo regional aplicado a cada especie (cuadro 14).

Cuadro 14. Medidas comparativas de error y sesgo entre el modelo general aplicado en cada especie y cada especie propiamente tal.

	Modelo por Especie			Modelo General		
	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
Raulí	45,27	20,33	2,21	53,54	20,19	-10,04
Coigüe	75,81	23,05	-1,18	76,57	22,18	2,65

Raulí presenta menores valores en el error cuadrático medio (ECM) y en la diferencia agregada (DIFA), no así en el error medio absoluto (ECA). Coigüe a su vez presenta mayores valores de ECM (%) y ECA (%), no así para la DIFA (%). Estas diferencias sin embargo no son claras como para respaldar un modelo separado para ambas especies, así estadísticamente no existen diferencias significativas entre los modelos.

4.2.3 Ajuste y evaluación de los estratos seleccionados

Como fue mencionado anteriormente, se rechaza la hipótesis de utilización de un modelo separado para las especies Raulí y Coigüe, por lo tanto es mejor utilizar un modelo general que incluya a ambas especies.

En tanto se recomienda utilizar un modelos diferenciando zonas de crecimiento, aunque sin diferenciación de especies, ya que la hipótesis de uso de un modelo Regional en vez de ello fue rechazada.

Como siguiente paso, se presentan para los estratos mas adecuados los modelos de Indice de sitio y altura dominante, así como el desarrollo de las series altura-edad versus el modelo b local t_0 . Además se presentan los errores y sesgo separados cada 15 años con el objetivo de detallar el comportamiento del modelo en distintos periodos.

4.2.4 Modelo Regional

Función de altura dominante

$$H = 76,69181 \left\{ 1 - \left[1 - \left(IS / 76,69181 \right)^{1,01593} \right]^{(E - 0,02018819) / (Ec - 0,02018819)} \right\}^{1/1,01593}$$

Función de Sitio

$$IS = 76,69181 \left\{ 1 - \left[1 - \left(H / 76,69181 \right)^{1,01593} \right]^{(E - 0,02018819) / (Ec - 0,02018819)} \right\}^{1/1,01593}$$

Cuadro 15. Medidas de error y sesgo para el estrato regional.

Estrato	EMC (%)	EMA (%)	DIFA (%)
Regional	59,70	18,04	0,36

Cuadro 16. Medidas de error y sesgo cada 15 años asociada al estrato regional.

Hasta 15 años			16-30 años			31 y mas años		
ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
61,34	29,57	-5,42	50,48	15,80	3,21	58,37	12,18	1,98

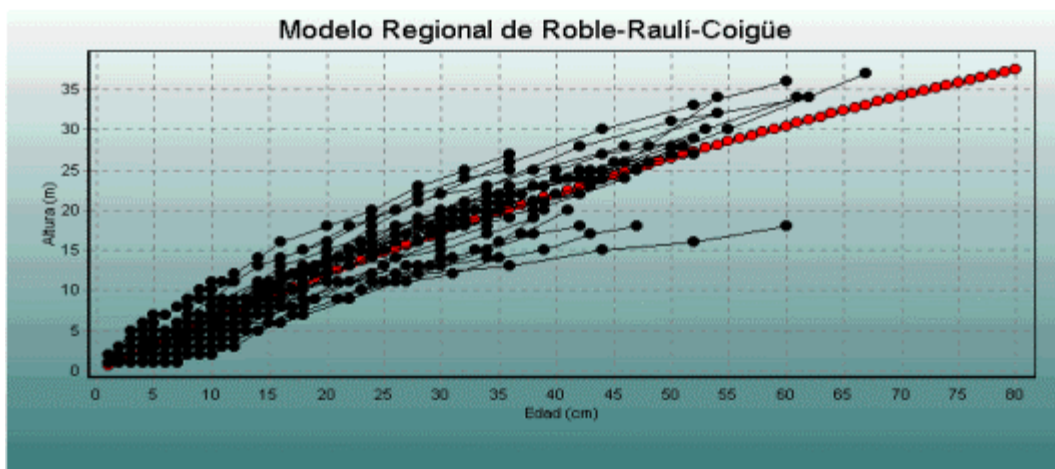


Figura 2. Desarrollo de series altura-edad para la Región y modelo b local t_0 .

4.2.5 Zona 2

Función de altura dominante

$$H = 62.80125 \left\{ 1 - \left[1 - \left(IS / 62.80125 \right)^{1.097925} \right]^{(E - 0.00802071) / (Ec - 0.00802071)} \right\}^{1/1.097925}$$

Función de Sitio

$$IS = 62.80125 \left\{ 1 - \left[1 - \left(H / 62.80125 \right)^{1.097925} \right]^{(E - 0.00802071) / (Ec - 0.00802071)} \right\}^{1/1.097925}$$

Cuadro 17. Medidas de error y sesgo para la zona 2.

Estrato	EMC (%)	EMA (%)	DIFA (%)
Zona 2	18,64	9,46	-1,99

Cuadro 18. Medidas de error y sesgo cada 15 años asociada al estrato zona 2.

Hasta 15 años			16-30 años			31 y mas años		
ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
73,71	32,02	-25,78	11,17	6,78	3,52	6,91	4,47	1,99

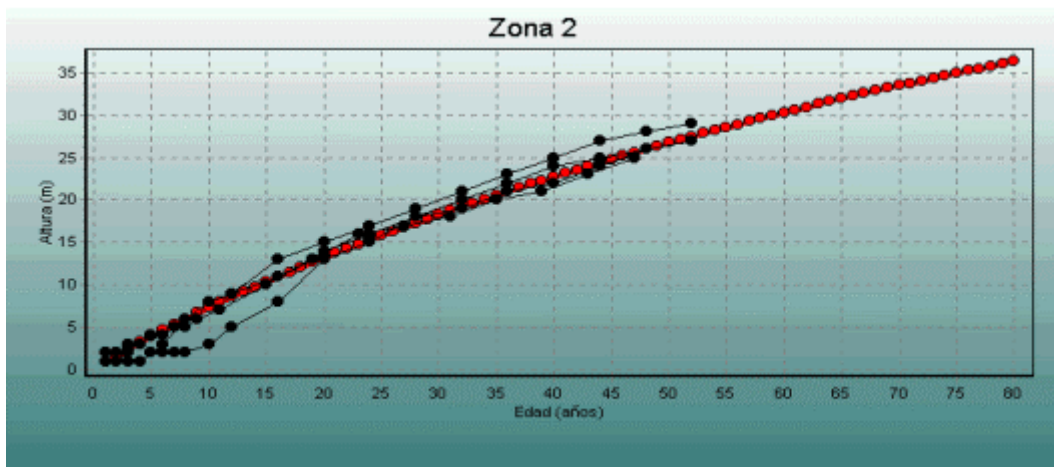


Figura 3. Desarrollo de series altura-edad para la zona 2 y modelo b local t_0 .

4.2.6 Zona 3

Función de altura dominante

$$H = 106.8005 \left\{ 1 - \left[1 - \left(IS / 106.8005 \right)^{1.055258} \right]^{(E - 0.017399) / (Ec - 0.017399)} \right\}^{1/1.055258}$$

Función de Sitio

$$IS = 106.8005 \left\{ 1 - \left[1 - \left(H / 106.8005 \right)^{1.055258} \right]^{(E - 0.017399) / (Ec - 0.017399)} \right\}^{1/1.055258}$$

Cuadro 19. Medidas de error y sesgo para la zona 3.

Estrato	EMC (%)	EMA (%)	DIFA (%)
Zona 3	43,43	15,29	0,86

Cuadro 20. Medidas de error y sesgo cada 15 años asociada al estrato zona 3.

Hasta 15 años			16-30 años			31 y mas años		
ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
41,06	24,16	-4,81	31,73	12,46	4,30	55,63	10,82	2,28

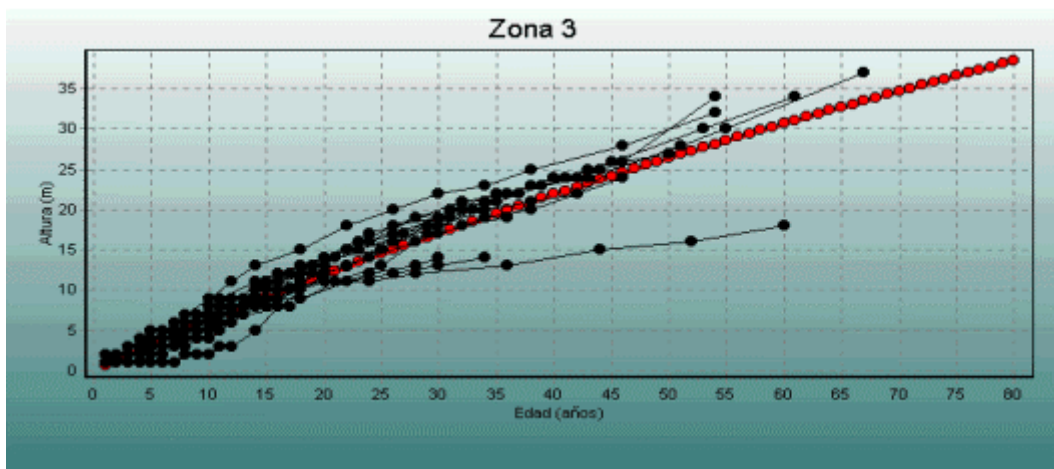


Figura 4. Desarrollo de series altura-edad para la zona 3 y modelo b local t_0 .

4.2.7 Zona 4

Función de altura dominante

$$H = 219.8191 \left\{ 1 - \left[1 - \left(IS / 219.8191 \right)^{0.821002} \right]^{(E - 0.04978734) / (Ec - 0.04978734)} \right\}^{1/0.821002}$$

Función de Sitio

$$IS = 219.8191 \left\{ 1 - \left[1 - \left(H / 219.8191 \right)^{0.821002} \right]^{(E - 0.04978734) / (Ec - 0.04978734)} \right\}^{1/0.821002}$$

Cuadro 21. Medidas de error y sesgo para la zona 4.

Estrato	EMC %	EMA %	DIFA %
Zona 4	18,94	12,98	7,92

Cuadro 22. Medidas de error y sesgo cada 15 años asociada al estrato zona 4.

Hasta 15 años			16-30 años			31 y mas años		
ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
28,15	24,58	16,19	21,60	10,48	7,79	7,90	5,55	0,80

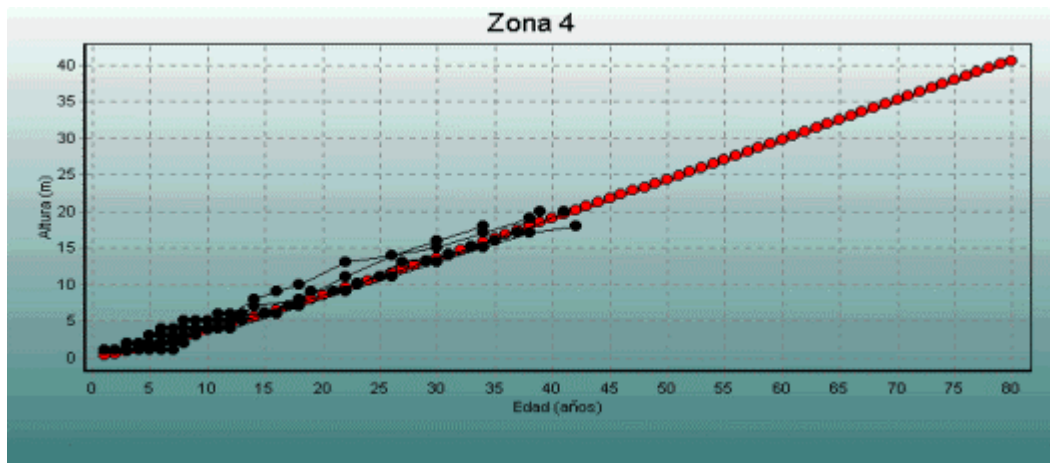


Figura 5. Desarrollo de series altura-edad para la zona 4 y modelo b local t_0 .

Dado que este estrato presenta una asíntota que no representa un máximo crecimiento biológico coherente de las especies, se optó por realizar un modelo opcional, el cual consta de una asíntota fija dada por el estrato regional y el cálculo de parámetros a través de la regresión no lineal del modelo Chapman-Richard. Con esto se pretende comparar el grado de error y sesgo de otra opción en comparación con el modelo con asíntota no viable.

4.2.8 Modelo zona 4 alternativo

Función de altura dominante

$$H = 76,69181 \left\{ 1 - \left[1 - \left(IS / 76,69181 \right)^{1,01593} \right]^{(E - 0,02018819) / (Ec - 0,02018819)} \right\}^{1/1,01593}$$

Función de Sitio

$$IS = 76,69181 \left\{ 1 - \left[1 - \left(H / 76,69181 \right)^{1,01593} \right]^{(E - 0,02018819) / (Ec - 0,02018819)} \right\}^{1/1,01593}$$

Cuadro 23. Medidas de error y sesgo para el estrato regional.

Estrato	EMC (%)	EMA (%)	DIFA (%)
Especial	18,76	14,13	-6,08

Cuadro 24. Medidas de error y sesgo cada 15 años asociada al estrato regional.

Hasta 15 años			16-30 años			31 y mas años		
ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
34,11	27,05	-18,73	16,55	11,22	-2,54	7,70	5,99	1,11

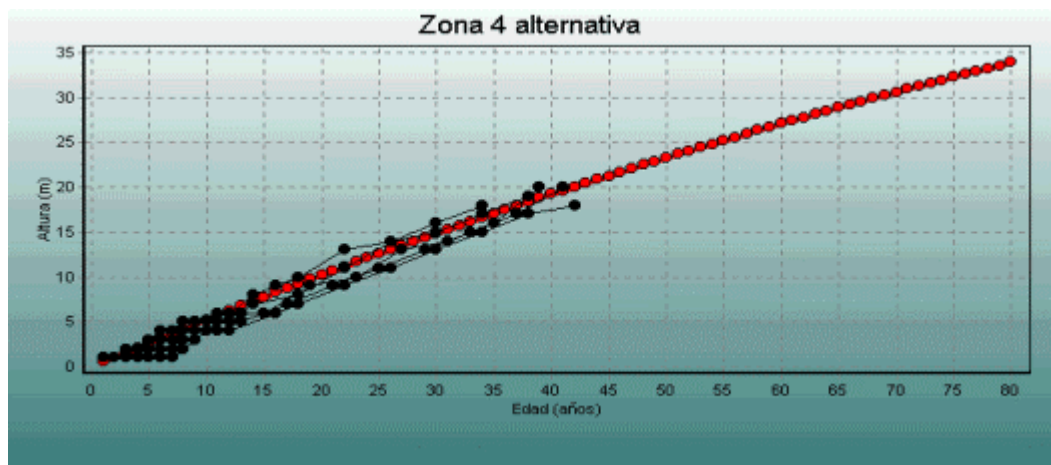


Figura 6. Desarrollo de series altura-edad para la Región y modelo b local t_0 .

Comparando los errores entre ambos modelos (cuadros 21 y 23), se puede apreciar que en ambos casos no se existe una diferencia significativa. Con el sesgo las diferencias se presentan con el estrato zona 4, en el cual el modelo sobreestima la proyección, en cambio el modelo opcional subestima. En el análisis de error y sesgo cada 15 años no se presentan diferencias claras. Con todo lo anterior se opta por el modelo especial de la zona 4 como más coherente en la representatividad del crecimiento de esa zona.

4.2.9 Modelo general para Coigüe y Raulí

Función de altura dominante

$$H = 79,13452 \left\{ 1 - \left[1 - \left(IS / 79,13452 \right)^{1,061631} \right]^{(E - 0,02369711) / (Ec - 0,02369711)} \right\}^{1/1,061631}$$

Función de Sitio

$$IS = 79,13452 \left\{ 1 - \left[1 - \left(H / 79,13452 \right)^{1,061631} \right]^{(E - 0,02369711) / (Ec - 0,02369711)} \right\}^{1/1,061631}$$

Cuadro 25. Medidas de error y sesgo para el modelo general para Coigüe y Raulí.

Estrato	EMC %	EMA %	DIFA %
Raulí-Coigüe	70,92	21,69	-0,46

Cuadro 26. Medidas de error y sesgo cada 15 años asociada al estrato zona 4.

Hasta 15 años			16-30 años			31 y mas años		
ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)	ECM (%)	ECA (%)	DIFA (%)
77,64	32,87	-3,16	75,65	20,27	0,68	60,90	13,85	0,66

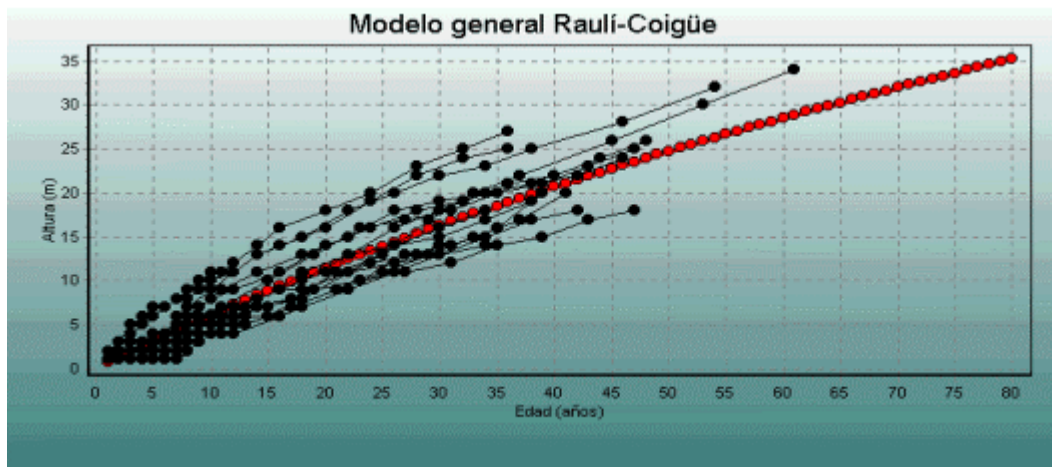


Figura 7. Desarrollo de series altura-edad para la zona 4 y modelo b local t_0 .

4.3 Curvas de Índice de sitio

Con los modelos seleccionados se generaron curvas para diferentes tipos de sitio (18, 20, 22, 24 y 26 m). Para ello se utilizó una edad clave de 20 años, ya que el programa HTMOD esta diseñado por su autor para esa edad clave⁶, además esta edad ha sido utilizada ampliamente en estudios para *Pinus radiata* en el país, lo cual lo hace un punto de referencia.

Las figuras 9, 10, 11, 12 y 13 muestran las curvas de sitio estimadas hasta los 80 años. Si bien no es conveniente salir del rango de edad de los datos para no alejarse de una estimación real (Celis, 1998), en este caso los valores fuera del rango de edades se presentan solo con motivos ilustrativos de proyección. El valor máximo de edad para la zona dos es de 52 años, de 67 años para la zona tres y de 42 años para la zona cuatro.

Al tratarse de un modelo polimórfico, todos los sitios tienden a una asíntota superior común. Las diferencias entre cada uno de los sitios es su productividad, por lo tanto sitios de alta productividad tendrán una alta tasa de crecimiento logrando la asíntota en menor tiempo que el requerido para de sitios pobres o de menor productividad. Lo anterior se aprecia en las diferencias en crecimiento en altura desde el índice de sitio 18 (menor crecimiento) hasta el índice de sitio 26 (mayor crecimiento).

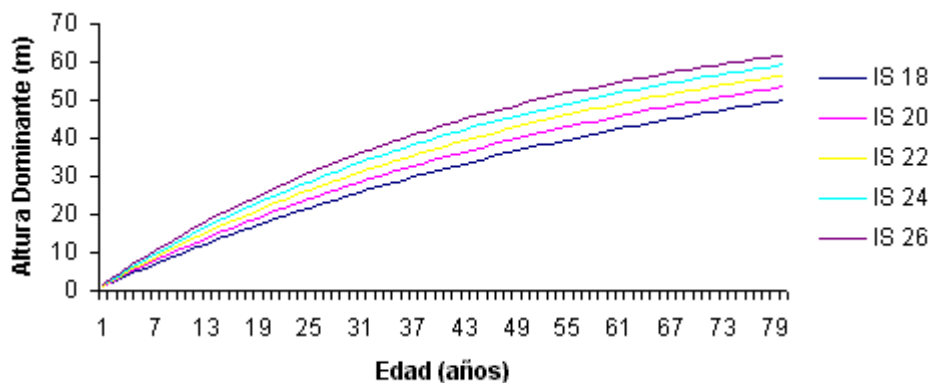


Figura 9. Curvas de Índice de sitio para el estrato Regional.

⁶ Ortega. A. 2002. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad Austral de Chile. Comunicación personal.

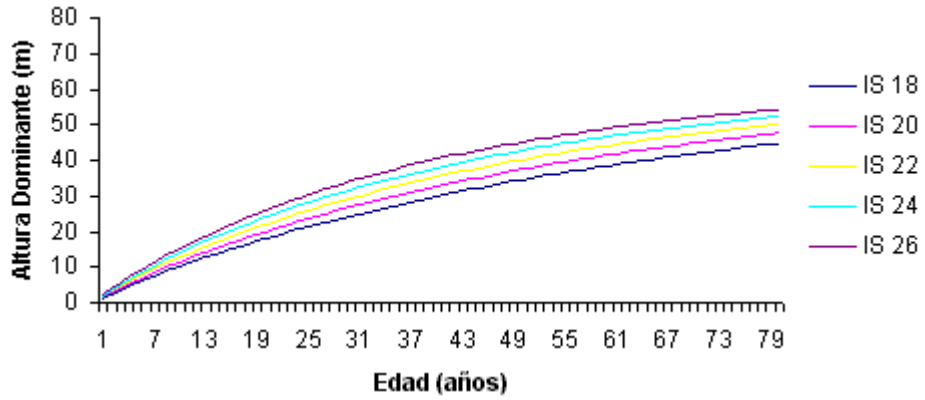


Figura 9. Curvas de Índice de sitio para la zona 2.

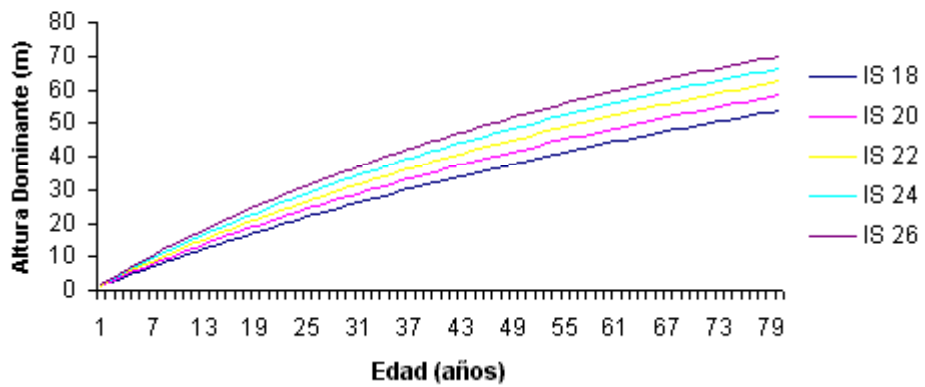


Figura 10. Curvas de Índice de sitio para la zona 3.

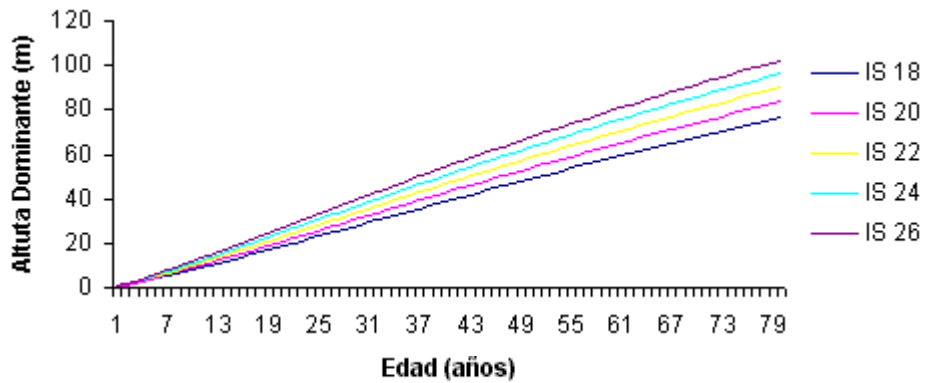


Figura 11. Curvas de Índice de sitio para la zona 4.

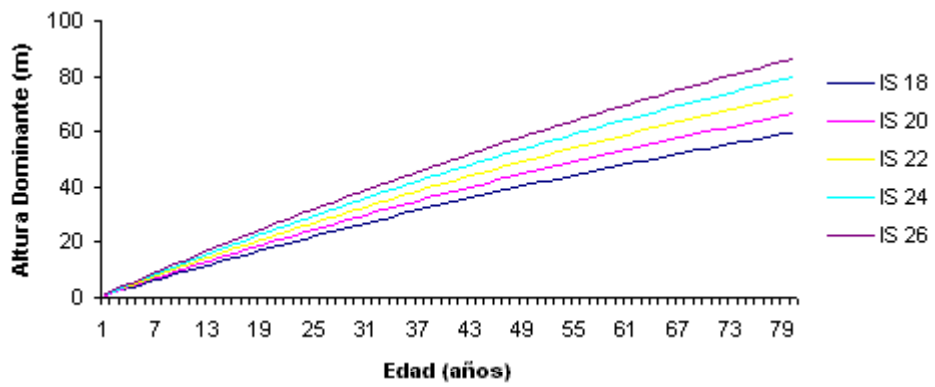


Figura 12. Curvas de Índice de sitio para el estrato especial zona 4.

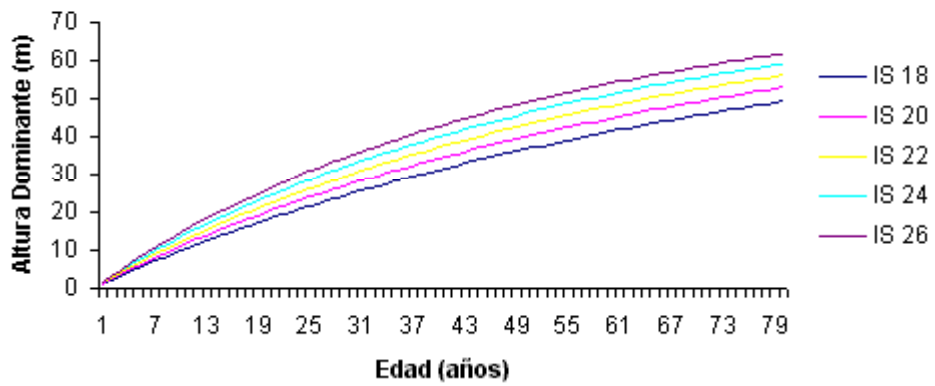


Figura 13. Curvas de Índice de sitio para el estrato general Raulí-Coigüe.

5. CONCLUSIONES

Se determinó la productividad de sitio a través de modelos de crecimiento en altura para los renovales y curvas de índice de sitio en los diferentes estratos, es decir un estrato Regional, tres estratos zonales y un estrato común Raulí-Coigüe.

Se utilizaron las cuatro configuraciones al modelo general de crecimiento en altura Chapman-Richard. Estas presentaron diferencias entre los modelos con origen libre ($t_0 \neq 0$) en relación a los de origen restringido ($t_0 = 0$) para todos los estratos analizados, en cada uno de ellos sin embargo, las diferencias no fueron significativas, siendo electo el mejor modelo de acuerdo a su máxima ponderación en los análisis correspondientes.

El modelo seleccionado para determinar la calidad de sitio y modelar el crecimiento en altura dominante en los diferentes estratos fue el modelo polimórfico con origen libre (b local t_0). Sin embargo, en el estrato zona 4 se probó una configuración anexa para modelar el crecimiento en altura, debido a que la asíntota presente no correspondía a la de un criterio biológico aceptable, lo cual representa una escasa capacidad de extrapolación.

El modelo anterior fue seleccionado de acuerdo a los análisis de error, sesgo, verosimilitud y gráfico de residuales. Con esto se aseguró que el modelo es el más indicado en las estimaciones de crecimiento y determinación del Índice de sitio en los respectivos estratos.

Se concluyó que las mejores estimaciones se logran separando los árboles según su zona de crecimiento, las cuales en este trabajo fueron extraídas desde el proyecto "Software Nothofagus". En cambio no se logró el mismo resultado separando los árboles en estratos por especie, estos finalmente fueron incluidos en un modelo común.

Las principales dificultades fueron provocados por la escasez de datos existentes en cada estrato, esto provocó una base de datos con mayor variabilidad y menor representatividad en algunos casos, como los resultados alejados de un criterio biológico o simplemente la incorvergencia de modelos.

La utilización de datos a partir de análisis fustal para reconstruir un rodal, presenta un mayor grado de error en comparación a las parcelas permanentes y temporales, ya que los individuos utilizados son árboles que en el presente presentan una condición dominante, pero nadie asegura que esos árboles también lo fuesen en el pasado. Las series altura-edad a partir de parcelas permanentes entregan los resultados mas fieles a la realidad.

Es importante destacar la metodología aplicada en este trabajo, ya que permitió el ajuste de los modelos de crecimiento en altura en un set limitado de datos, ésto permitió aprovecharlos al máximo dentro de las limitaciones existentes.

Se debe destacar que los modelos fueron validados en el mismo set de datos de ajuste, lo cual significa una desventaja, ya que se desconoce su aplicación en otro conjunto de datos. Futuros proyectos deberán entonces ser lo suficientemente extensos para permitir la validación.

Se plantea hacia el futuro realizar las proyecciones con una mayor cantidad de individuos por estrato, además de analizar una posible relación o modelo entre especies que en el caso de este trabajo fue rechazada.

6. BIBLIOGRAFIA

- Celis, M. 1996. Modelo de crecimiento en altura y curvas de índice de sitio para *Pseudotsuga Menziesii* (Mirb) Franco. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 91 p.
- Corporación Nacional Forestal (Chile); Comisión Nacional del Medio Ambiente; Universidad Austral de Chile. 1999. Proyecto Catastro y evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Valdivia, Chile. 88p.
- Clutter, J; Forstsan, J; Pienaar, L; Brister, G; Bailey, R. 1983. Timber Management: a quantitative approach. New York. 333 p.
- Davel, M. 1998. Identificación y caracterización de zonas de crecimiento para pino Oregón en la Patagonia Andina Argentina. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 151 p.
- Donoso, C. 1981. Tipos Forestales de los Bosques Nativos de Chile. CONAF. Santiago. 80p
- Donoso, C. 1994. Bosques templados de Chile y Argentina, Variación , Estructura y Dinámica; Ecología Forestal. Santiago, Ed. Universitaria. 484 p.
- Dyer, M; Bailey, R. 1987. A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. *Forest Science* 33(1): 3-13.
- García, O. 1983. A Stochastic Differential Equation Model for the Height Growth of Forest Stands. *Biometrics* 39: 1059-1072.
- García, O. 1994. El enfoque del espacio de estados en modelos de crecimiento. Traducción de The State – space approach in growth modelling. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1894-1903.
- Martínez, A. 1999. Silvicultura práctica en renovales puros y mixtos y, bosques remanentes originales del tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe. Capítulo 6. *In*: Donoso, C.; Lara, A. Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Santiago, Universitaria. pp. 145-175.
- Meneses, M; S, Guzmán. 2000. Análisis de la eficiencia de la silvicultura destinada a la obtención de madera libre de nudos en plantaciones de pino radiata en Chile. *Bosque* 21(2):85-93.
- Ortega, A. Gezan, S. 1999a. Proyecto FONDEF “Software de Planificación de Actividades en Renovales de Roble-Raulí-Coigüe”. Informe de avance Cuatrimestral. Segundo cuatrimestre. Valdivia.

Ortega, A. Gezan, S. 1999b. Proyecto FONDEF “Software de Planificación de Actividades en Renovales de Roble-Raulí-Coigüe”. Informe de avance Cuatrimestral. Cuarto cuatrimestre. Valdivia.

Prodan, M; R, Peters; F, Cox; P, Real. 1997. Mensura Forestal. San José (Costa Rica), IICA. 562 p.

ANEXOS

Anexo 1

Abstract and keywords

Site index and dominant height functions for Roble-Raulí-Coigüe second growth forest in the Tenth Region

ABSTRACT

This study consisted on the adjustment of height growth model for roble-rauli-coigüe second growth models present in the Tenth Region. The data used for this research correspond to measurements done according to the FONDEF project “software *Nothofagus*” (D97I1065). Areas of different growth taken from this project were used for this species. They were defined through climatic, edafic and vegetational information among others. The information for the adjustment of height growth model corresponded to log analysis of 18 plots distributed in the different areas of the tenth region.

Later, the data was analysed and validated so that the information was reliable or free from errors, then for each measured tree it was generated the height-age series.

The individuals of roble-rauli-coigüe with their respective series of data were stratified i.e. They were separated in groups according to possible differences of productivity to achieve more representative height growth models. In first place, they were stratified according to the areas proposed in the FONDEF project present in the Tenth Region (four areas, therefore four strata). Also, tree strata corresponding to each one of the species were identified to finish the tenth region as another stratum to have a comparative parameter.

In each one of the strata, the dominant height growth models were obtained through the methodology proposed by García (1983). This consists on the adjustment of a stochastic model for the height growth. The model presents a deterministic part represented by the Chapman-Richard function and a stochastic or aleatory component that represents the environmental variability called Wiener process. It is necessary to highlight that this methodology has been proven in previous studies.

The calculation process was achieved by the program HTMOD created by García (1983). This program allows the adjustment of four variants of Chapman-Richard model, these are an anamorphic model with free origin, a anamorphic model with a restricted origin, a polimorphic with a free origin and finally a polimorphic model with a restricted origin.

Each one of the models mentioned previously was adjusted for each one of the proposed strata, and analyzed through error test, bias, likelihood and graphic analysis of residuals.

After selecting the best model in each stratum, the use of separate models in each strata was statistically justified in opposition to the use of a general model that includes all the areas. After that, the same process was performed justify the used of the species as separate strata. This was achieved thanks to the likelihood index.

As a result, the best model in each one of the strata was polymorphic with free origin.

The use of a common model was refused for the areas because the differences among them were significant, In this case the use of separate models was justified. On the other hand, the use of models separated by species was justified, in this case the use of a general model was recommended.

The functions, their parameters, and their distribution through the real values were presented in an orderly way for each stratum.

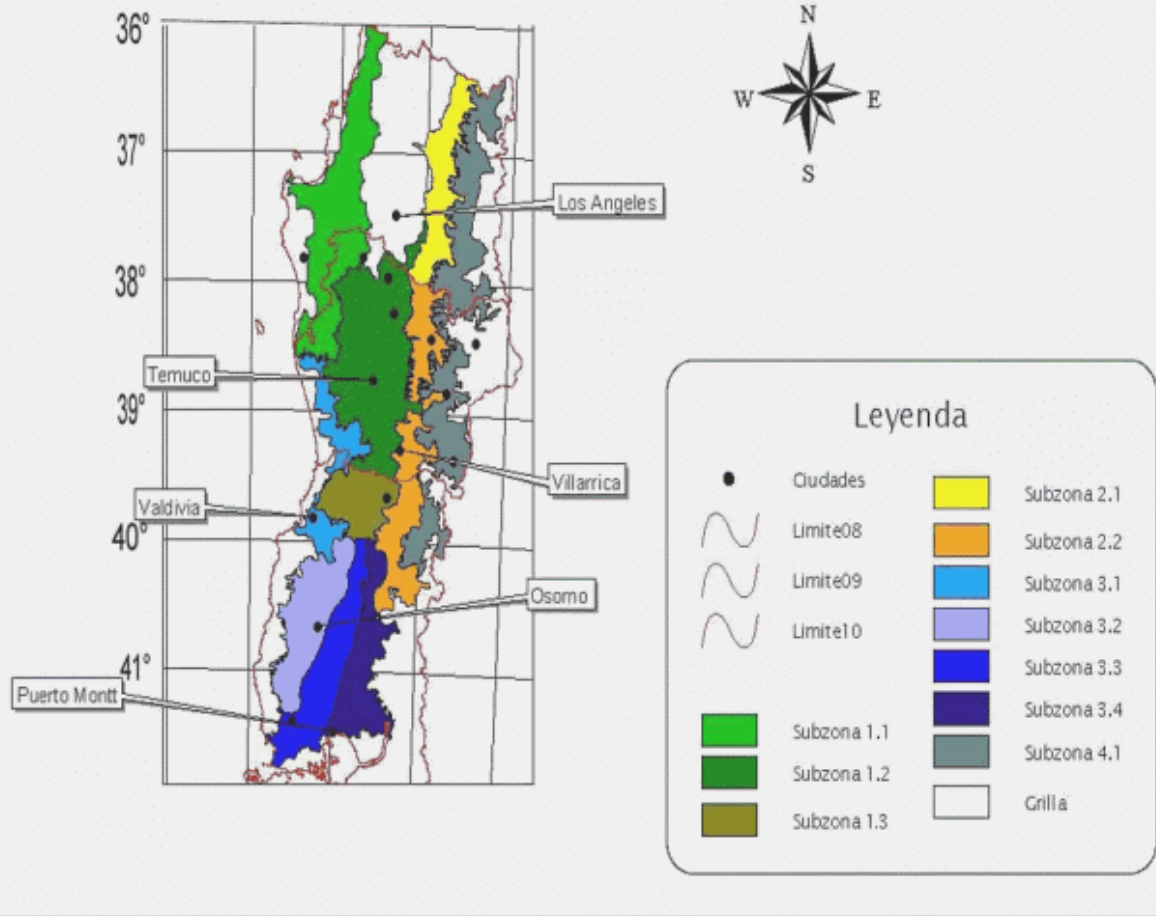
Finally, site index and dominant height curves were built and they were representative for 18 to 26 meters every two meters. The key age used was 20 for this research.

Key Word: Roble-raulí-coigüe second growth forest ; site index and dominant height ; Chapman-Richard growth model ; stochastic height growth model ; Likelihood index.

Anexo 2

Zonificación del Proyecto FONDEF D97I1065

Zonificación Proyecto FONDEF D9711065



Anexo 3

Descripción zonas de crecimiento

Zona 1

La zona uno ocupa la vertiente occidental de la cordillera de la costa de la VII Región, el secano interior y la depresión intermedia de la VII y IX Región, además de la provincia de Valdivia. Se caracteriza principalmente por abarcar la zona con influencia climática marcadamente mediterránea con efecto marino, pero con algunos periodos secos extremos en algunos años. Incluye prácticamente todos los bosques de Raulí y Coigüe del área, localizados en la Cordillera de Nahuelbuta, y en los otros sectores abunda Roble. Se caracteriza, además por tener una fuerte presión antrópica.

Zona2

Corresponde íntegramente a la Precordillera Andina de la VIII, IX Región, además y de la Provincia de Valdivia. Se caracteriza por una mayor precipitación y con una baja humedad relativa del aire en el periodo estival, y un mayor numero de heladas. Conformado principalmente por rodales de Roble y Coigüe.

Zona 3

Ocupa la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa en la IX Región y todos los ambientes de las Provincias de Valdivia, Osorno y Llanquihue, a excepción de la Alta Cordillera Andina. Se caracteriza por una alta pluviometría y un breve periodo seco menor a dos meses. Esta principalmente dominado por Roble, y en los ambientes mas húmedos por Coigüe.

Zona 4

Corresponde a la Alta Cordillera Andina, su limite occidental coincide aproximadamente con la elevación en la cual comienza la presencia de Raulí, y termina en el occidente donde se acaba la presencia de Raulí y Coigüe y en algunos casos en el arbóreo superior. Las precipitaciones aumentan y bajan las temperaturas, con un periodo seco muy corto. Dominado por las tres especies, incluyendo la casi totalidad de rodales de Raulí de los Andes de la VIII, IX y X Regiones.

Anexo 4

Base de Datos Proyecto

Base de datos proyecto

ID	Identificador de Proyecto por Parcela
NARB	Numero de Árbol
SP	Especie (1:NA, 2:NO, 3:ND. 99: Otros)
DAP	Diámetro a la Altura del Pecho (cm)
HT	Altura Total (m)
SAN	Código de Sanidad (1,2,3)
PS	Código de Posición Sociológica (1,2,3,4)
SECC	Numero de Sección
HCORT	Altura de Corte (m)
DCC	Diámetro con corteza (cm)
DSC	Diámetro sin corteza (cm)
NANI	Numero de Anillos

Anexo 5

Información general parcelas proyecto

ID	PROY	PID	SUBP	NARB	SP	HI	EDAD	N' Árbol	N' Datos	Z_CRE	SZ_CRE	LOC
601104	6	1	1	4	2	34	62	1	20	1	1,1	LINGUINEGEO
601210	6	1	2	10	2	36	60	2	20	1	1,1	LINGUINEGEO
602121	6	2	1	21	2	18	60	3	20	3	3,2	RINCON DEL TORO
602222	6	2	2	22	2	14	21	4	20	3	3,2	RINCON DEL TORO
603101	6	3	1	1	3	19	38	5	20	4	4,1	TRAFUN
603227	6	3	2	27	3	18	34	6	20	4	4,1	TRAFUN
604110	6	4	1	10	3	20	39	7	20	4	4,1	LIQUÍNE ALTO
604111	6	4	1	11	1	18	42	8	20	4	4,1	LIQUÍNE ALTO
604201	6	4	2	1	1	20	41	9	20	4	4,1	LIQUÍNE ALTO
606103	6	6	1	3	2	20	32	10	20	3	3,2	TEGUALDA
606234	6	6	2	34	2	19	36	11	20	3	3,2	TEGUALDA
607145	6	7	1	45	2	11	18	12	19	3	3,2	TEGUALDA
607232	6	7	2	32	2	13	22	13	20	3	3,2	TEGUALDA
610106	6	10	1	6	3	32	54	14	20	3	3,1	HUELLELHUE
610203	6	10	2	3	3	34	61	15	20	3	3,1	HUELLELHUE
611107	6	11	1	7	2	27	50	16	20	3	3,4	MATA DE CAÑA
611203	6	11	2	3	2	25	44	17	20	3	3,4	MATA DE CAÑA
614107	6	14	1	7	2	37	67	18	20	3	3,1	HUELLELHUE
614216	6	14	2	16	2	34	54	19	20	3	3,1	HUELLELHUE
618202	6	18	2	2	3	24	46	20	20	3	3,3	LOS NOTROS
619111	6	19	1	11	2	24	41	21	20	3	3,3	COIHUECO
619213	6	19	2	13	2	25	43	22	20	3	3,3	COIHUECO
620117	6	20	1	17	3	14	34	23	20	3	3,2	CUMLEUFU
620257	6	20	2	57	3	14	30	24	20	3	3,2	CUMLEUFU
621115	6	21	1	15	2	29	52	25	20	2	2,2	SAN PABLO DE TREGUA
621210	6	21	2	10	2	27	52	26	20	2	2,2	SAN PABLO DE TREGUA
622110	6	22	1	10	1	26	48	27	20	2	2,2	SAN PABLO DE TREGUA
622204	6	22	2	4	1	25	47	28	20	2	2,2	SAN PABLO DE TREGUA
653225	6	53	2	25	3	20	34	29	20	3	3,3	HUAUTRONES
654111	6	54	1	11	3	25	36	30	20	1	1,3	MAFIL (LO AGUILA)
654213	6	54	2	13	3	27	36	31	20	1	1,3	MAFIL (LO AGUILA)
660102	6	60	1	2	3	18	47	32	20	1	1,3	QUITADAÑIL
660205	6	60	2	5	2	28	50	33	20	1	1,3	QUITADAÑIL

Donde :	ID	=	Identificador de cada árbol	EDAD	=	Edad del árbol
	PROY	=	Número del proyecto FONDEF	N' Árbol	=	Número del árbol dentro de este estudio
	PID	=	Identificador de la parcela	N' Datos	=	Datos presentes de cada árbol
	SUBP	=	Subparcela	Z_CRE	=	Zona de crecimiento del árbol según FONDEF
	NARB	=	Número del árbol medido	SZ_CRE	=	Subzona de crecimiento
	SP	=	Especie	LOC	=	Localidad específica de medición
	HI	=	Altura total del árbol			

Anexo 6

Parámetros de cada modelo ajustado por estrato

Los cuadros 1, 2, y 3, presentan los parámetros de cada uno de los modelos ajustados a cada uno de los estratos.

Cuadro 1. Estimación de los parámetros del modelo regional.

		Parámetros				
	Modelo	a	b	c	t_0	Convergencia
Modelo General	a local	77,73181	0,00752281	1,073203	-	si
	a local t_0	67,03673	0,00987523	1,003062	0,01918547	si
	b local	90,19551	0,00618656	1,084482	-	si
	b local t_0	76,69181	0,00828662	1,01593	0,02018819	si

Cuadro 2. Estimación de los parámetros de los modelos aplicados por zonas.

		Parámetros				
	Modelo	a	b	c	t_0	Convergencia
Zona 1	a local	-	-	-	-	no
	a local t_0	-	-	-	-	no
	b local	-	-	-	-	no
	b local t_0	-	-	-	-	no
Zona 2	a local	66,70855	0,00869155	1,14447	-	si
	a local t_0	63,17337	0,00977211	1,105612	0,00506117	si
	b local	66,66659	0,00873809	1,141192	-	si
	b local t_0	62,80152	0,00993745	1,097925	0,00802071	si
Zona 3	a local	98,86297	0,00540607	1,090463	-	si
	a local t_0	76,63628	0,00816131	1,018291	0,01684481	si
	b local	154,9068	0,00298484	1,121015	-	si
	b local t_0	106,8005	0,0052055	1,055258	0,017399	si
Zona 4	a local	363,9783	0,00174733	0,9218167	-	no
	a local t_0	361,4959	0,00175918	0,9217318	0,02	no
	b local	325,4487	0,00198418	0,9149398	-	no
	b local t_0	219,8191	0,00359928	0,821002	0,04978734	no
Zona 4 alternativa	-	76,69181	0,007	0,991	-	si

Cuadro 3. Estimación de los parámetros de los modelos aplicados por especie.

	Modelo	Parámetros				Convergencia
		a	b	c	t_0	
Raulí	a local	324,3154	0,00109448	1,134415	-	si
	a local t_0	105,8705	0,00502394	1,013666	0,01961486	si
	b local	272,3069	0,00136791	1,127591	-	si
	b local t_0	96,5959	0,00575625	0,996853	0,02054435	si
Roble	a local	-	-	-	-	no
	a local t_0	-	-	-	-	no
	b local	-	-	-	-	no
	b local t_0	-	-	-	-	no
Coigüe	a local	91,62951	0,0053855	1,13948	-	si
	a local t_0	86,09062	0,00597682	1,121944	0,02029742	si
	b local	86,23667	0,00605614	1,119808	-	si
	b local t_0	80,17462	0,00688123	1,094303	0,02402964	si

Anexo 7

Curvas guías versus las series altura edad

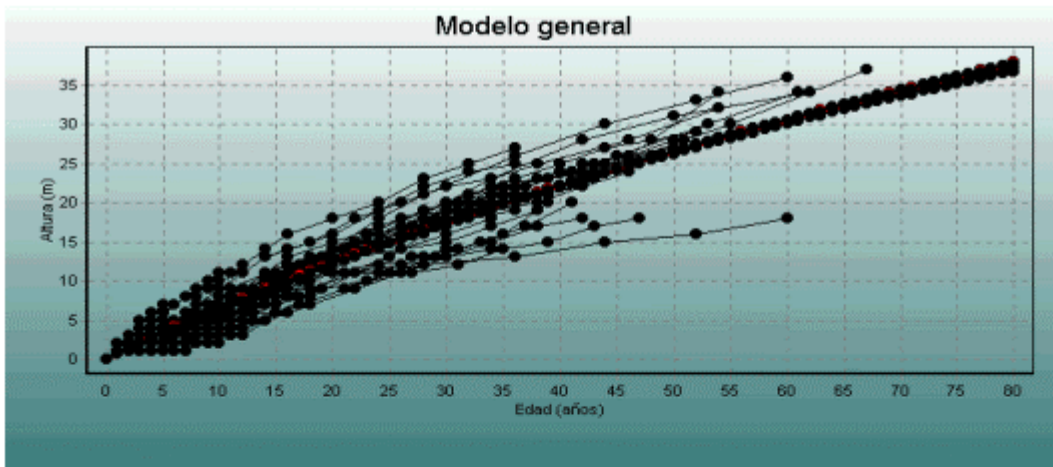


Figura 1. Modelos ajustados a la Región versus valores reales altura-edad

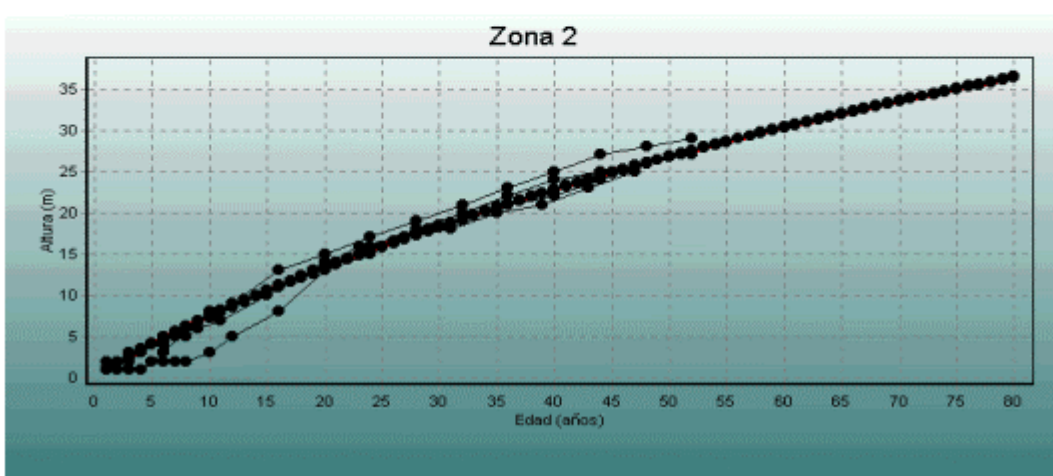


Figura 2. Modelos ajustados en la zona 2 versus valores reales altura-edad.

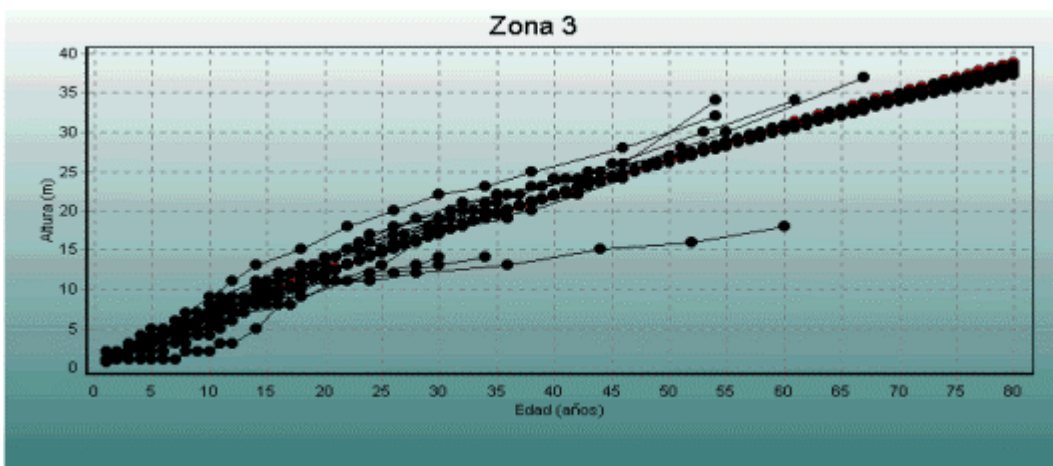


Figura 3. Modelos ajustados en la zona 3 versus valores reales altura-edad.

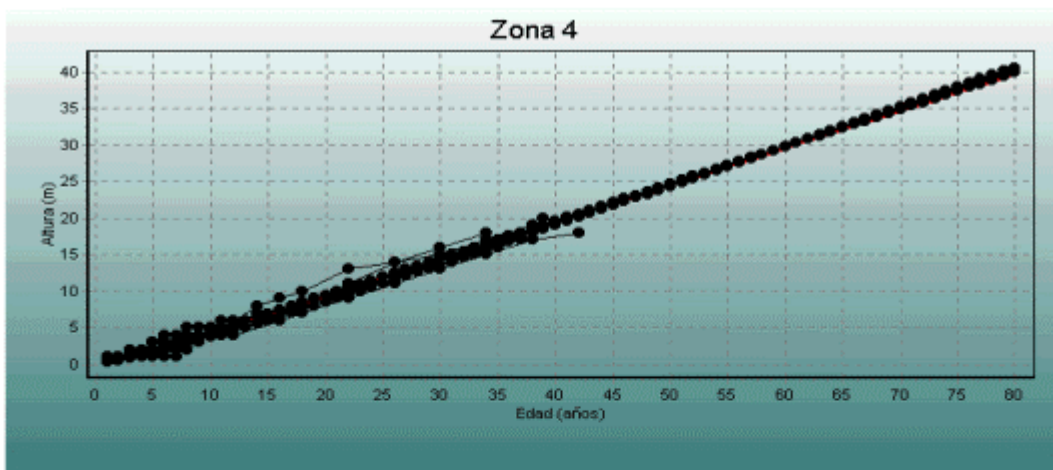


Figura 4. Modelos ajustados en la zona 4 versus valores reales altura-edad.

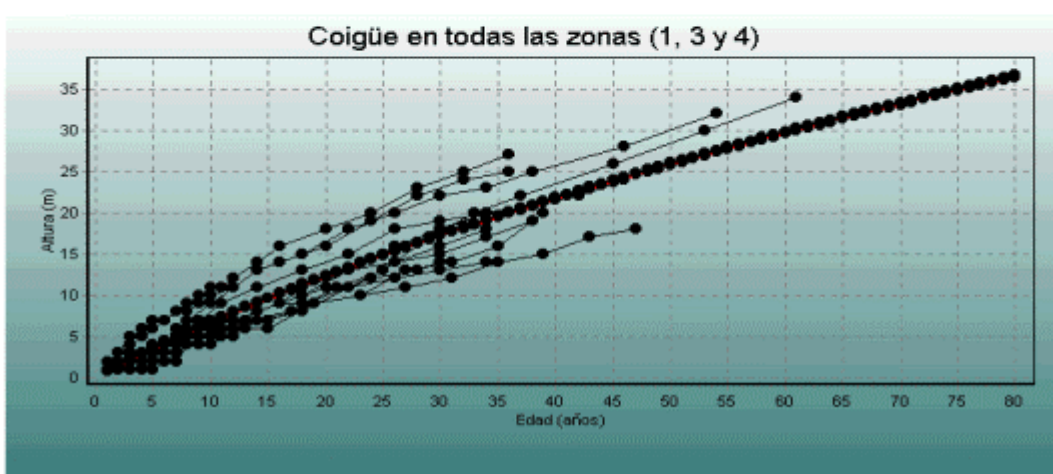


Figura 5. Modelos ajustados para Coigüe versus valores reales altura-edad.

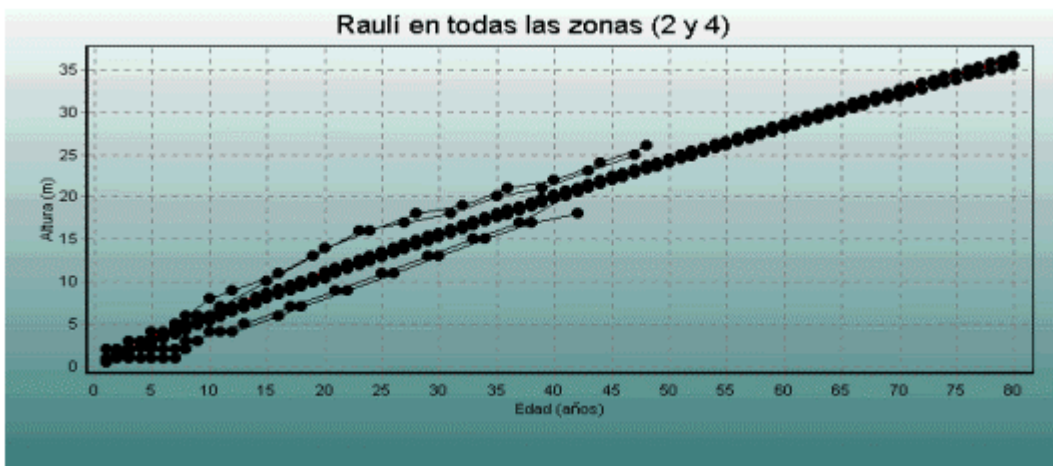


Figura 6. Modelos ajustados para Raulí versus valores reales altura-edad.

Anexo 8
Grafico de residuales

Estrato Regional

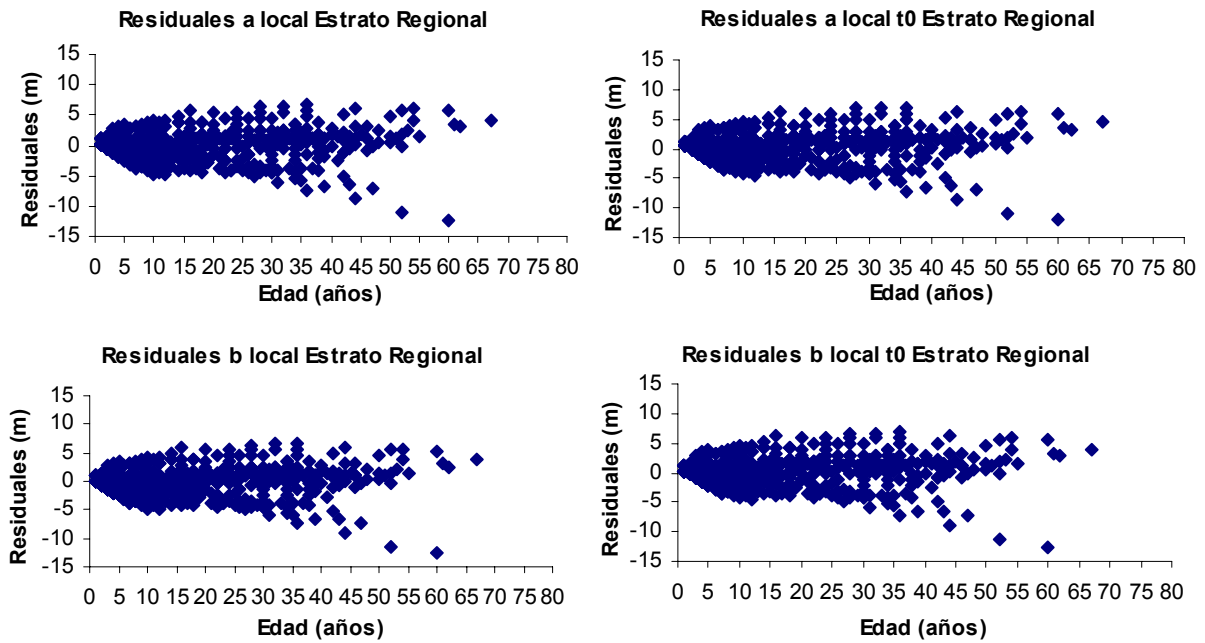


Figura 1: Distribución residual generada por los modelos de altura para el estrato Regional.

Estrato por Zonas

Zona 2

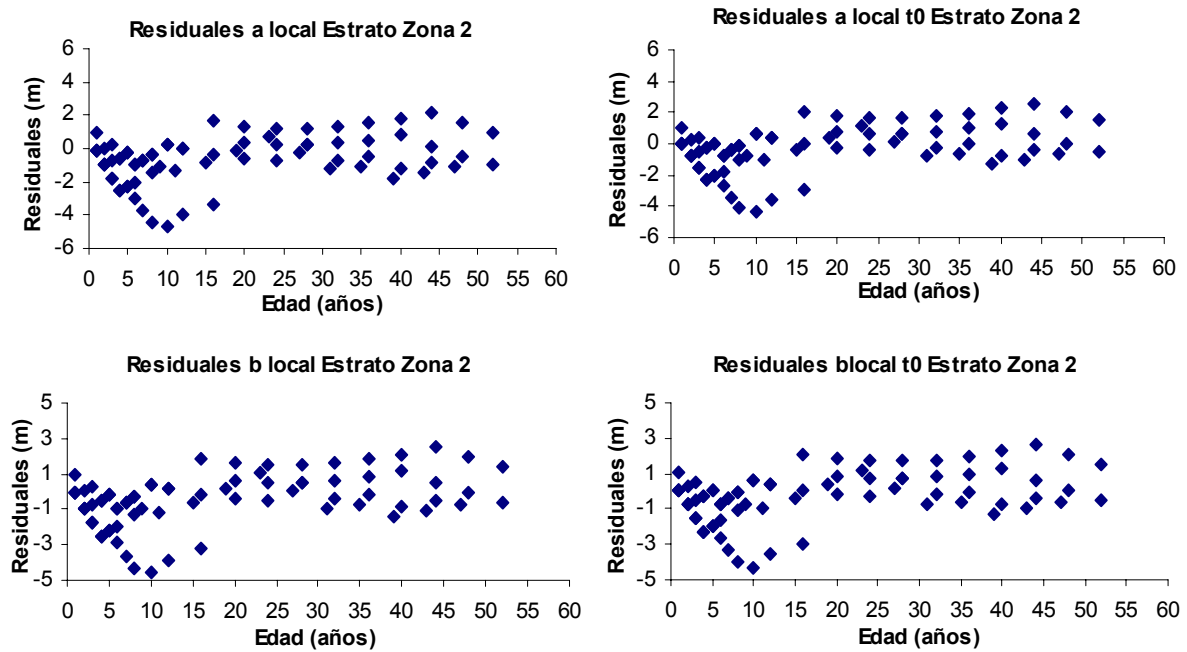


Figura 2: Distribución residual generada por los modelos de altura para el estrato Zona 2.

Zona 3

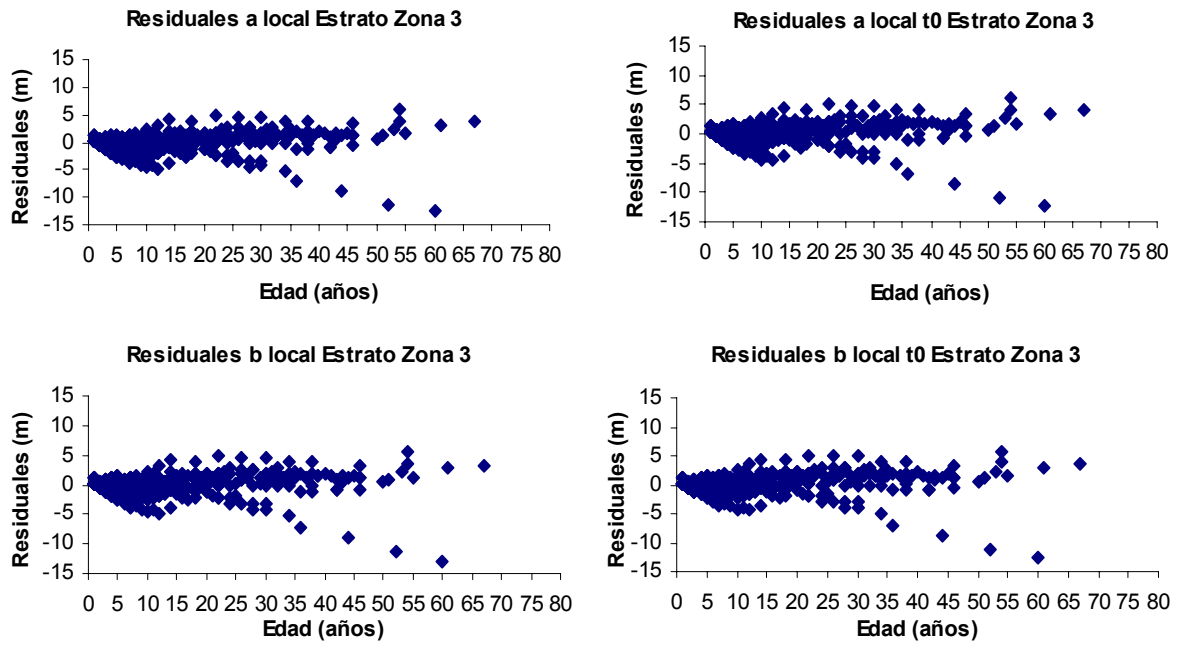


Figura 3: Distribución residual generada por los modelos de altura para el estrato Zona 3.

Zona 4

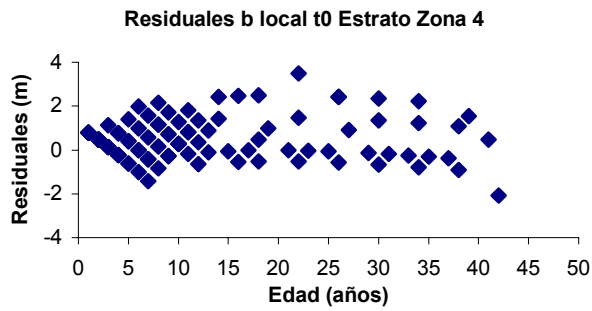


Figura 4: Distribución residual generada por los modelos de altura para el estrato Zona 4¹.

¹ Los demás modelos de este estrato no convergieron, por lo tanto fueron descartados.

Estrato por Especies

Raulí

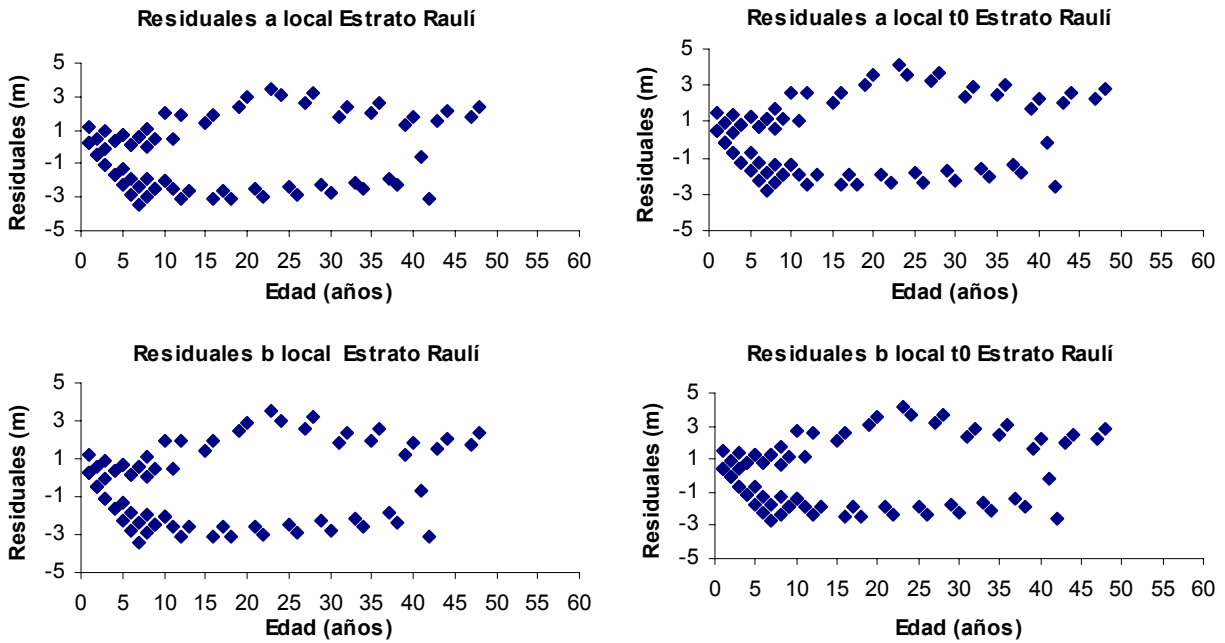


Figura 5: Distribución residual generada por los modelos de altura para el estrato Raulí.

Coigüe

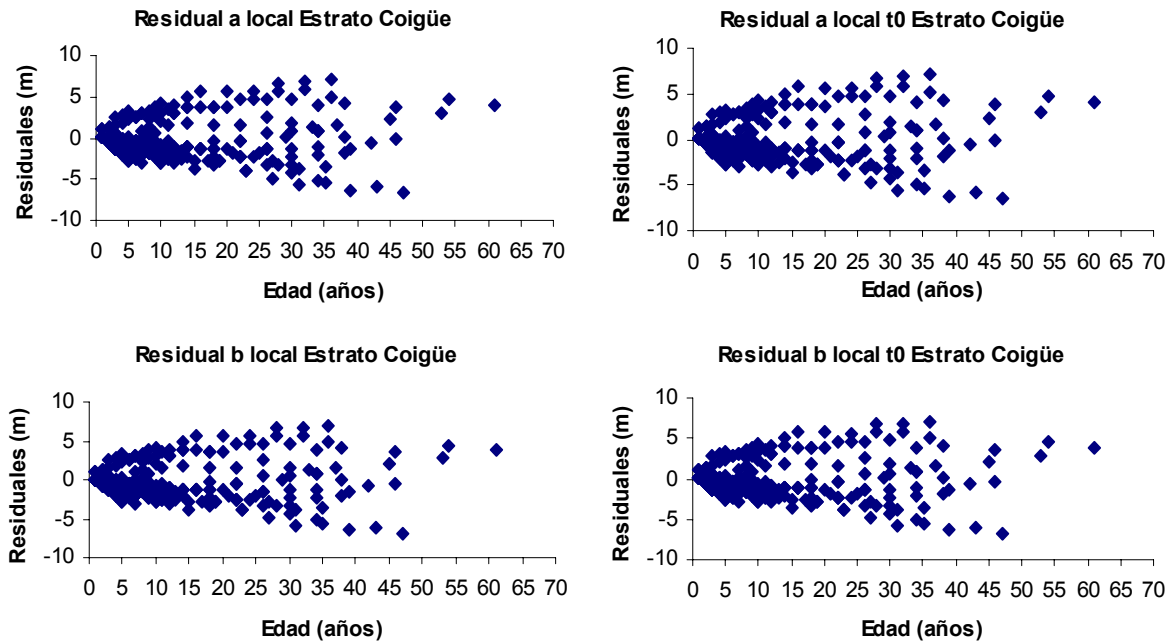


Figura 6: Distribución residual generada por los modelos de altura para el estrato Coigüe.