



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE MANEJO DE RECURSOS FORESTALES

**PRODUCTIVIDAD DE LAS PLANTACIONES DE PINO PONDEROSA
(*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.) DE LA COMUNA DE COYHAIQUE,
PROVINCIA DE COYHAIQUE, XI REGIÓN**

Memoria para optar al Título

Profesional de Ingeniero Forestal

CARLOS ALFONSO PARRA JAQUE

Prof. Guía: Sr. Guillermo Guerra Marín Ing. Forestal

Santiago, Chile

2009

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE MANEJO DE RECURSOS FORESTALES

**PRODUCTIVIDAD DE LAS PLANTACIONES DE PINO PONDEROSA
(*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.) DE LA COMUNA DE COYHAIQUE,
PROVINCIA DE COYHAIQUE, XI REGIÓN**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

CARLOS ALFONSO PARRA JAQUE

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Guillermo Guerra Marín	7,0
Prof. Consejero Sr. Patricio Corvalán Vera	6,7
Prof. Consejero Sr. Jorge Gilchrist Moreno	6,0

DEDICATORIA

“Fíate del Señor de todo tu corazón, y no te apoyes en tu prudencia. Reconócelo en todos tus caminos, y Él enderezará tus veredas.” Proverbios 3:5,6.

A mis padres

A Verónica

A Abel y Araceli

AGRADECIMIENTOS

Al profesor guía Ingeniero Forestal Dn. Guillermo Guerra Marín y los profesores consejeros Ingenieros Forestales Dn. Patricio Corvalán Vera y Dn. Jorge Gilchrist Moreno por su apoyo constante en la ejecución de esta tesis.

Al Ingeniero Forestal Dr. Héctor Gonda, investigador del Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) ubicado en la ciudad de Esquel, Argentina, por su invaluable colaboración, apoyo y orientación en la ejecución de la tesis.

A Forestal MININCO S. A. Proyecto Aysén en la persona del Jefe de Proyecto Ingeniero Forestal Dn. Rafael Eyzaguirre Croxatto por su colaboración en el apoyo logístico durante el trabajo en terreno y las facilidades entregadas en la visita de cada una de sus plantaciones.

A la Corporación Nacional Forestal (CONAF) XI región en la persona del Jefe Provincial Coyhaique de la época, Ingeniero Forestal Dn. Rodrigo Pinto Núñez, por dar las facilidades en el ingreso a las plantaciones de la Reserva Nacional Coyhaique y dar accesibilidad a información sobre los diferentes dueños de plantaciones de la comuna de Coyhaique.

A los señores Dn. Germán Daniel Wulz, Administrador del Fundo “Miralejos”, y Dn. Sergio de Amesti Armas, propietario del fundo “El Cielo”, por dar las facilidades de ingreso a las plantaciones de los fundos antes indicados.

Al Instituto Forestal Sede Coyhaique en la persona de su Jefe de la época, Ingeniero Forestal Dn. Paulo Moreno Meynard, por facilitar instrumental de campo vital para la ejecución de los trabajos en terreno.

A Dn. Manuel Cordero Duarte y Dn. Álex Meneses Carrasco y a través de ellos a sus familias por dar su apoyo durante el período de trabajo en terreno en la ciudad de Coyhaique.

A mi padre Dn. Carlos Parra Arenas por su incondicional apoyo económico y emocional.

A todas aquellas personas que, directa o indirectamente, colaboraron en el término de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
CALIFICACIONES	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN Y PALABRAS CLAVE	XII
ABSTRACT Y KEY WORDS	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 El pino ponderosa	1
1.1.1 Distribución natural	1
1.1.2 Aspecto de las variedades	2
1.1.3 Requerimientos ecológicos	2
1.1.4 Asociaciones vegetales	3
1.1.5 Historia de vida	4
1.1.6 Plantaciones	6
1.1.7 Productividad y crecimiento	8
1.2 Ecuaciones biométricas	9
1.2.1 Ecuaciones Altura-Diámetro	9
1.2.2 Ecuaciones de volumen	10
1.3 Determinación de Calidad de sitio	11
1.3.1 Método de Intercepción del Crecimiento	13
1.3.2 Uso del método IC en pino ponderosa	13

	Página	
1.3.3	Calidad de sitio en plantaciones de la comuna de Coyhaique	15
1.4	Ecuaciones de Productividad	15
1.5	Objetivos	17
1.5.1	Objetivo general	17
1.5.2	Objetivos específicos	17
2.	MATERIAL Y MÉTODO	18
2.1	Material	18
2.1.1	Antecedentes geográficos de la comuna de Coyhaique	18
2.1.2	Antecedentes de las plantaciones de la comuna de Coyhaique	19
2.2	Método	20
2.2.1	Origen de los datos	20
2.2.2	Variables	23
2.2.3	Ajuste de ecuaciones H-D	24
2.2.4	Ajuste de ecuaciones de volumen	25
2.2.5	Determinación de un modelo de calidad de sitio	26
2.2.6	Determinación de productividad	27
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1	Ecuaciones H-D	29
3.1.1	Ecuaciones a nivel de rodal versus regional	31
3.2	Ecuaciones de volumen	33
3.2.1	Ecuaciones de volumen regional	33
3.2.2	Ecuaciones de volumen local	35
3.3	Índice de Intercepción del Crecimiento (IIC)	35
3.4	Ecuaciones de productividad	37

	Página
3.4.1 Ecuación de productividad basada en el área basal	37
3.4.2 Ecuación de productividad basada en el número de árboles por hectárea	38
3.4.3 Comparación de productividad con plantaciones no raleadas de pino ponderosa de Neuquén (Argentina), norte de California (EE.UU.) y de la comuna de Coyhaique (Chile)	40
4. CONCLUSIONES	44
4.1 Ecuaciones H-D	44
4.2 Ecuaciones de volumen	44
4.3 Determinación de calidad de sitio	44
4.4 Ecuaciones de productividad	45
BIBLIOGRAFÍA	46
APÉNDICES	53

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
CUADRO 1	Resumen de las características principales de las variedades <i>ponderosa</i> y <i>scopulorum</i> de pino ponderosa	3
CUADRO 2	Resumen de requerimientos ecológicos de pino ponderosa	4
CUADRO 3	Principales especies en asociaciones vegetales con pino ponderosa en su distribución natural	5
CUADRO 4	Volumen total sin corteza (m ³ /ha) de rodales naturales de pino ponderosa entre 20 y 140 años de edad para cuatro calidades de sitio.	7
CUADRO 5	Ecuaciones H-D más usadas en pino ponderosa	10
CUADRO 6	Ecuaciones de volumen local (tarifas) y generales (regionales) usadas en pino ponderosa y otras especies	12
CUADRO 7	Especies y autores de estudios donde se ha utilizado el método IC para determinar calidad de sitio	14
CUADRO 8	Modelos de productividad de rodales de pino ponderosa del oeste de los EE.UU.	16
CUADRO 9	Principales características de las diferentes zonas representadas en la comuna de Coyhaique, provincia de Coyhaique, región de Aysén (Chile)	19
CUADRO 10	Variables dasométricas de las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, con datos obtenidos del muestreo realizado	20
CUADRO 11	Mínimo, máximo y promedio de los rangos de latitud, longitud, altitud, pendiente, precipitación anual y exposición de las 91 parcelas instaladas a través de la comuna de Coyhaique	22
CUADRO 12	Parámetros medios y error estándar para las seis ecuaciones H-D ajustadas y número de parcelas donde convergieron las ecuaciones no lineales	29
CUADRO 13	Comparación de parámetros estimados con la EHD3 con datos de plantaciones de pino ponderosa de Argentina y Chile	31

		Página
CUADRO 14	Rangos de H y DAP de los árboles medidos en plantaciones de pino ponderosa de este estudio y de plantaciones de pino ponderosa de Neuquén (Argentina) usados para ajustar ecuaciones H-D	31
CUADRO 15	Comparación entre los parámetros estimados y error estándar de la EHD3 ajustada para el total de datos H-D y los del ajuste por parcela	33
CUADRO 16	Coefficientes y error estándar de estimación para los tres modelos de ecuaciones de volumen local	34
CUADRO 17	Coefficientes y error estándar de estimación para los cinco modelos de ecuaciones de volumen regional	34
CUADRO 18	Coefficiente de determinación (R^2) y error estándar (S_{xy}) de cada EIIC a la edad de 20 años de plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique	35
CUADRO 19	Altura dominante a los 20 años ($H_{100_{20}}$) predicho para 11 valores de IIC basado en ENT100; se indica además el Incremento Periódico Anual (IPA) de $H_{100_{20}}$, en plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, Chile	36
CUADRO 20	Productividad de las plantaciones de pino ponderosa en el norte de California, EE.UU. (Calif.) (Oliver y Powers, 1978); en el rango este y oeste de los rodales de la provincia de Neuquén, Argentina (Gonda <i>et al.</i> , 1998d) y en las Zonas Coyhaique (Coy.), Valle Simpson (V. Simp.) y Balmaceda (Balma.) de la comuna de Coyhaique para tres diferentes densidades y tres calidades de sitios definidos en términos de IIC, entre las edades de 10 a 40 años	42
CUADRO 21	Productividad de las plantaciones de pino ponderosa en predio Miralejos (M.) y Reserva Nacional Coyhaique (RN Coy.) (Moreno y Obando, 2006) y en las Zonas Coyhaique (Coy.), Valle Simpson (V. Simp.) y Balmaceda (Balma.), todas de la comuna de Coyhaique para tres diferentes densidades y cuatro calidades de sitios definidos en términos de IIC, entre las edades de 10 a 40 años	43

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1	Mapa de Chile superpuesto sobre el de EE.UU. haciendo coincidir la latitud y la escala. La parte sombreada es el área de distribución de las plantaciones de pino ponderosa en Chile	8
FIGURA 2	De izquierda a derecha, los siguientes mapas muestran la posición de la Región de Aysén en Chile y de la comuna de Coyhaique en la misma región. La zona ampliada corresponde al área de distribución de las plantaciones de pino ponderosa que fueron muestreadas, los sectores en verde corresponden a tales plantaciones	21
FIGURA 3	Distribución aproximada de las 91 parcelas muestreadas (puntos rojos) en cada plantación de pino ponderosa muestreada en la comuna de Coyhaique	22
FIGURA 4	Esquema que indica la forma de medición de ENT	24
FIGURA 5	Esquema que indica los puntos donde se realizaron los cortes y la fórmula utilizada para cubicar cada troza	26
FIGURA 6	Dispersión de datos H-D y línea de regresión elaborada con la EHD3 para la parcela con el mayor rango de DAP	30
FIGURA 7	Dispersión de datos H-D y línea de regresión elaborada con la EHD3 para la parcela con el menor rango de DAP	30
FIGURA 8	DAP y H de 1.378 árboles medidos para elaborar funciones H-D a nivel de parcela para plantaciones sin raleo de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique	32
FIGURA 9	Líneas de regresión de la EHD3 ajustada con datos H-D de 10 parcelas (línea delgada) y línea de regresión de la EHD3 ajustada con todos los datos H-D de todas las parcelas en conjunto (línea gruesa) de las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique	32
FIGURA 10	Línea de regresión de la EIIC1 dibujada sobre la dispersión de datos H100 y ENT100 para parcelas de rodales de 20, 21, 25 y 26 años; los círculos grandes son los datos de parcelas de 20 años	36

		Página
FIGURA 11	Gráfico de volumen sin corteza por hectárea observado (cruces) y estimado (puntos) de una ecuación de productividad basada en área basal por hectárea para plantaciones de pino ponderosa de la comuna Coyhaique	37
FIGURA 12	Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la Zona 4 Coyhaique (longitud 72,17° W) en la comuna de Coyhaique. Las curvas son indicadas para rodales de 1.600 árboles por ha con seis diferentes IIC	39
FIGURA 13	Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la Zona 2 Valle Simpson (longitud 71,75° W) en la comuna de Coyhaique. Las curvas son indicadas para rodales de 1.600 árboles por ha con seis diferentes IIC	39
CUADRO 14	Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la Zona 1 Balmaceda (longitud 71,33° W) en la comuna de Coyhaique. Las curvas son indicadas para rodales de 1.600 árboles por ha con seis diferentes IIC	40
FIGURA 15	Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, con densidad inicial de 1.550 árb/ha, IIC de 2,85 m (IS: 10 m). En línea continua la curva de productividad de Moreno y Obando (2006) en serie de líneas discontinuas, las curvas de productividad elaboradas para la Zona 4 COYHAIQUE (guiones largos), Zona 2 VALLE SIMPSON (guiones cortos) y Zona 1 BALMACEDA (puntos)	41

RESUMEN

Ecuaciones altura-diámetro, de volumen, determinación de calidad de sitio y elaboración de modelos de productividad son testeados para plantaciones de pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.) no raleadas de la comuna de Coyhaique, provincia de Coyhaique, región de Aysén.

Los datos para los ajustes se obtienen de 91 parcelas instaladas en todo el rango de edades, número de árboles por hectárea y distribución geográfica de las plantaciones de pino ponderosa.

Seis ecuaciones H-D (dos lineales y cuatro no lineales) de las más ampliamente usadas en pino ponderosa, son ajustadas con un set de 1.378 datos H-D obtenidas de las 91 parcelas antes indicadas. Los modelos son ajustados para cada una de las 91 parcelas y comparados según error estándar de estimación. El siguiente modelo no lineal es el escogido porque convergió más eficientemente respecto a los otros modelos no lineales y tiene más flexibilidad que las funciones lineales, además tiene un bajo error estándar de estimación:

$$H = 1,3 + e^{\left(\beta_0 + \left(\frac{\beta_1}{DAP + 2,54}\right)\right)}$$

Errores de estimación significativos son encontrados cuando se ajusta la ecuación indicada con el total de datos H-D tomados a nivel regional.

Ocho ecuaciones para estimar volumen sin corteza (tres ecuaciones de una variable o locales y cinco de dos variable o regionales) son ajustadas con datos del análisis fustal de 82 árboles muestra escogidos de los alrededores de las 91 parcelas indicadas. Las siguientes ecuaciones fueron escogidas por obtener los más bajos errores estándar y presentar facilidad en su aplicación, se presentan con sus coeficientes:

$$V = 0,000042DAP^{2+1,3227} \quad \text{local (una variable)}$$

$$V = 0,01282 + 0,00002907DAP^2H \quad \text{regional (dos variables)}$$

Varios estudios indican que el método de intercepción del crecimiento (IC) es el más adecuado para determinar calidad de sitio en plantaciones jóvenes que el método del Índice de Sitio (IS). Se aplica el método IC para determinar calidad de sitio en las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, elaborando el siguiente modelo que permite estimar la altura dominante a los 20 años ($H_{100_{20}}$) calculando el promedio ponderado del largo total de cinco entrenudos sobre el DAP de los 100 árboles con mayor diámetro por hectárea (ENT100):

$$H_{100_{20}} = 0,55695 + 3,30971ENT100$$

Dos ecuaciones de productividad basados en el modelo rodal-completo son ajustados con los datos de las 91 parcelas muestreadas. Una de las ecuaciones estima la productividad (expresado como volumen sin corteza por hectárea (VHA)) presente en función de la edad

(E), el índice de intercepción del crecimiento (ENT100), la longitud (LONG) y el área basal (ABHA). La otra ecuación estima productividad en función de las mismas variables cambiando área basal por número de árboles por hectárea (ARBHA), lo que permite realizar estimaciones de productividad en el tiempo variando la edad y manteniendo constante el ARBHA. Ambas ecuaciones presentan estimaciones precisas entre los 10 y los 30 años. Los modelos ajustados son los siguientes:

$$VHA = e^{24,0796} e^{(1/ENT100)(-0,0519)} e^{(1/E)(-4,0356)} ABHA^{0,3248} e^{ABHA^2 0,000039} e^{E^2 0,00128} e^{LONG(-0,02922)}$$

$$VHA = e^{-4,8295} e^{(1/ENT100)(-2,832)} e^{(1/E)(-33,2999)} ARBHA^{0,5306} e^{E^2 0,00103} e^{LONG 0,1157}$$

Una comparación con la productividad de las plantaciones de pino ponderosa del norte de California (EE.UU.) y de la provincia de Neuquén (Argentina) demuestra que las plantaciones en la comuna de Coyhaique son más productivas, resultado avalado por el otro estudio realizado por Moreno y Obando (2006) en plantaciones de la comuna de Coyhaique en donde se obtienen similares resultados entre los 10 y 30 años de edad.

Palabras Claves

- Ecuaciones altura – diámetro.
- Ecuaciones de volumen.
- Índice de Intercepción del Crecimiento.
- *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.
- Productividad.

ABSTRACT

Height-diameter and volume equations, determination of site quality and elaboration of productivity models were tested for ponderosa pine plantations (*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.) unthinned of the Coyhaique county, Coyhaique province, Aysén region.

The data for the fit are obtained of 91 stands installed in the whole range of ages, number of trees for hectare and geographical distribution of the ponderosa pine plantations.

Six H-D equations (two linear and four nonlinear) commonly used in ponderosa pine are fitted with a set of 1.378 H-D data obtained of 91 stands before indicated. The models are fitted for each one of the 91 stands and compared according to standard error of estimate. The following nonlinear model lineal is the chosen one because it converged more efficiently regarding the other nonlinear models and it had more flexibility than the lineal functions, besides having a low standard error of estimate:

$$H = 1,3 + e^{\left(\beta_0 + \left(\frac{\beta_1}{DAP+2,54}\right)\right)}$$

Significant estimate errors are found when the suitable equation is fitted with the total of H-D data taken at regional level.

Eight equations to estimate volume without bark (three one-variable or locals and five two-variable or regionals equations) are fitted with data of the stem analysis of 82 sample trees of the around 91 stands. The following equations were chosen because they are obtained the lowest errors standard and to present easiness in their application, they are presented with their coefficients:

$$V = 0,000042DAP^{2 \cdot 1,3227} \quad \text{local (one-variable)}$$

$$V = 0,01282 + 0,00002907DAP^2H \quad \text{regional (two-variable)}$$

Several studies indicate that the growth intercept method (GI) is the most appropriate to determine site quality in young plantations than site index method (SI). The GI method is applied to determine site quality in the ponderosa pine plantations of the Coyhaique county, elaborating the following model that allows to estimate the dominant height to the 20 years ($H100_{20}$) calculating the pondered average of the long total of five internods above DAP of the 100 thicker trees for hectare (ENT100):

$$H100_{20} = 0,55695 + 3,30971ENT100$$

Two yield equations based on the whole-stands model are fitted with the data of 91 stands collected. One of the equations estimates the current yield (expressed as volume without bark for hectare (VHA)) in function of the age (E), the growth intercept index (ENT100), the longitude (LONG) and the basal area (ABHA). The other equation estimates yield in function of the same variables changing basal area for number of trees for hectare (ARBHA), what allows to accomplish estimates of yield in the time changing the age and

maintaining constant the ARBHA. Both equations present precise estimates between the 10 and the 30 years. The fitted models are the following ones:

$$VHA = e^{24,0796} e^{(1/ENT100)(-0,0519)} e^{(1/E)(-4,0356)} ABHA^{0,3248} ABHA^2 0,000039 E^2 0,00128 LONG(-0,02922)$$

$$VHA = e^{-4,8295} e^{(1/ENT100)(-2,832)} e^{(1/E)(-33,2999)} ARBHA^{0,5306} E^2 0,00103 LONG 0,1157$$

A comparison with the yield of the ponderosa pine plantations of the north of California (USA) and of the Neuquén province (Argentina) it demonstrates that the plantations in the Coyhaique county are more productive, result endorsed by the other study accomplished by Moreno and Obando (2006) in plantations of the Coyhaique county, where similar results are obtained between the 10 and 30 years of age.

Key words

- Growth intercept index
- H-D equations
- *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.
- Volume equations
- Yield.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta mediados del siglo XX extensas áreas de bosques de la región de Aysén, principalmente las provincias de Aysén y Coyhaique, fueron rozadas a fuego para ser habilitadas como terrenos ganaderos. Consecuencia de lo anterior, hoy en día existe una gran superficie de suelos improductivos, que al tener un mal uso presentan un fuerte proceso erosivo. La formación de una cubierta vegetal arbórea es una de las formas de mitigar el proceso erosivo de la región, y es por ello que a finales del decenio de los 50 del siglo pasado se comenzó el establecimiento de ensayos de introducción de especies junto con la forestación masiva (Sanhueza, 1998).

Entre las diferentes especies usadas, el pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.) fue la especie con los mejores resultados en ensayos de introducción; convirtiéndose en una de las especies más usadas en la región de Aysén; lo anterior se evidencia si observamos que la superficie plantada hacia 1991 no superaba las 2.000 ha, llegando hacia el año 2003 a superar las 12.000 ha (Quiroz y Rojas, 2004).

Quiroz y Rojas (2004) realizaron una revisión de todos los antecedentes relativo a pino ponderosa en la región de Aysén. De esta revisión se desprende que aún faltan estudios que indiquen la productividad de las plantaciones, o que aporten ecuaciones biométricas (ecuaciones altura-diámetro y de volumen), o de criterios para determinar la calidad de sitio; las que constituyen información útil para el manejo de las plantaciones de esta especie.

Este estudio tiene como fin la determinación de productividad de las plantaciones de pino ponderosa ubicadas en la comuna de Coyhaique, provincia de Coyhaique, región de Aysén; junto con él se determinará rangos de calidad de sitio, ajuste de ecuaciones de volumen y de altura-diámetro.

1.1 El pino ponderosa

1.1.1 Distribución natural

Descubierta y descrita por David Douglas cerca de Spokane, Washington (EE.UU.) en 1826, pino ponderosa es la conífera con más amplia distribución en América del Norte, desde Canoe Creek sobre el río Fraser en British Columbia por el norte, Canadá; hasta Durango, México, en el sur. Desde Holt County, Nebraska en EE.UU., en el este, hasta la costa del Pacífico (Meisenbach y Holzman, 2005; Oliver y Ryker, 2005).

Pino ponderosa presenta una variación extrema entre poblaciones, reconociéndose la existencia de al menos dos variedades, estas son: *Pinus ponderosa* var. *ponderosa* Dougl. ex Laws. conocida como pino ponderosa del pacífico o pino ponderosa y *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* Engelm. conocida como pino ponderosa de las Montañas Rocallosas o pino ponderosa del interior (Quiroz y Rojas, 2004). Otros autores reconocen otras tres subespecies o variedades: *Pinus ponderosa* var. *brachyptera* (Engelm.) Lemm. (a pesar de que otros indican que esta variedad es igual a la variedad *scopulorum*); *Pinus ponderosa* var. *stormiae* (Martinez) Silba y la variedad endémica de Sierra Nevada y el Oeste de las “Cascadas” en California, *Pinus ponderosa* var. *benthiana* (Frankis, 1998; citado por

Meisenbach y Holzman, 2005). El pino de Arizona (*Pinus arizonica* Engelm.) algunas veces es clasificada como una variedad de pino ponderosa, actualmente es reconocida como una especie diferente; de igual forma la variedad *stormiae* es reconocida por otros autores como variedad de la citada especie (Howard, 2003; Oliver y Ryker, 2005).

La distribución de la variedad *ponderosa* es desde la latitud 52° N, en la desembocadura del río Fraser del sur de British Columbia (Canadá), hacia el sur a través de las montañas de Washington, Oregon y California, hasta la latitud 33° N, cerca de San Diego (EE.UU.). En la parte noreste, su rango de distribución se extiende al este de la divisoria continental, hasta la longitud 110° W en Montana, y al sur de “Snake River Plain” en Idaho (EE.UU.) (Oliver y Ryker, 2005). La distribución de pino ponderosa variedad *scopulorum* se extiende, por el este de la Divisoria Continental, desde los 48° N en el centro-norte de Montana, hacia el sudeste dentro de Dakota del Norte y Dakota del Sur, al este de Wyoming; y hacia el este, hasta el centro-norte de Nebraska (EE.UU.). Dentro de esta área, el pino ponderosa crece en montañas mesetas, cañones y en los quiebres de las praderas; los rodales más extensos se encuentran en Black Hills de Dakota del Sur y Wyoming (EE.UU.). Al sur de Wyoming, la variedad *scopulorum* se extiende al sur por ambos lados de la Divisoria Continental, hasta Arizona por el oeste y al límite este de la Gran Cuenca en Nevada y por el este hasta Texas, al oeste del Río Pecos, Nuevo México, extremo noroeste de Oklahoma y Colorado (EE.UU.) y norte de México (Little, 1979; citado por Oliver y Ryker, 2000). Dentro de este amplio rango, la especie está ausente en una extensa área que incluye el suroeste de Montana, oeste de Wyoming, sur de Idaho y parte de la Gran Cuenca. Una posible explicación para la ausencia de la especie en esta área es que la distribución de lluvias durante los meses de verano impide el establecimiento de plantas, excepto en mayores elevaciones, donde la especie tiene poca tolerancia a estaciones de crecimiento más cortas (Steele *et al.*, 1981; citado por Oliver y Ryker, 2005).

1.1.2 Aspecto de las variedades

Ante el ojo inexperto, las dos variedades principales de pino ponderosa, *ponderosa* y *scopulorum*, no presentan mayores diferencias. No obstante, los expertos indican varios aspectos que ayudan a diferenciarlas (Cuadro 1).

1.1.3 Requerimientos ecológicos

El pino ponderosa se encuentra en climas templados y secos, en cambio la variedad *scopulorum* crece en lugares cercanos al borde del desierto en altitudes bajas (Cuadro 2). Sobre la base de que la humedad del suelo es la variable que a menudo limita el crecimiento de árboles jóvenes de pino ponderosa, la ocurrencia de chubascos y lluvias estivales entrega la humedad, en algunos casos escasa, pero útil para el crecimiento de esta especie en el área de distribución más meridional (Oliver y Ryker, 2005).

El pino ponderosa crece en una amplia variedad de suelos, derivados de materiales ígneos, metamórficos y sedimentarios, incluyendo quartzos, argilitas, esquistos, pizarras, basaltos, andesita, granitos, cenizas, piedra pómez, caliza y piedra arenisca. Por tanto la especie crece en varios ordenes de suelos tales como, Entisoles, Inceptisoles, Mollisoles, Alfisoles y Ultisoles (Oliver y Ryker, 2005). Sin embargo, estudios citados por Oliver y Ryker

(2005) y Quiroz y Rojas (2004), muestran que las mejores tasas de sobrevivencia y crecimiento se encuentran en suelos arcillo-arenosos, ya que estos permiten una mejor proliferación del sistema radicular de pino ponderosa.

Cuadro 1. Resumen de características principales de las variedades *ponderosa* y *scopulorum* de pino ponderosa.

Características principales	Variedad <i>ponderosa</i>	Variedad <i>scopulorum</i>
Dimensiones	Alcanza grandes dimensiones, árboles de 70,7 m de altura y 263 cm de DAP; con rangos comunes de 27 a 40 m de altura y 76 a 127 cm de DAP.	Dimensiones menores, con alturas máximas de 50 m y DAP de 130 cm.
Acículas	De a tres por fascículo, con largos de 12,5 a 25 cm formando penachos al final de la rama.	Largos de 7 a 17 cm, raza del Norte de a dos por fascículo
Conos	Forma cónica ovalada, longitud entre 5 a 15 cm.	Dimensiones de 5 a 10 cm de largo.
Tronco	Recto y limpio de ramas bajas en su madurez.	Recto.
Corteza	En árboles jóvenes de color café oscuro a negra resquebrajada. En árboles maduros de color café acanalado a naranja amarillento compuesta de láminas escamosas irregulares y anchas que al unirse forman un puzzle de piezas irregulares. En días calurosos desprende un olor a vainilla.	Espesor de 8 cm en árboles adultos.
Copa y ramas	Estrecha, cónica y compuesta de ramas robustas.	Copas piramidales en su juventud que llegan a ser más anchas y redondeadas en la etapa adulta, en la raza del Norte las copas son compactas con forma de moño o copete. Las ramas son abiertas y presentan poda natural.
Razas	Raza Pacífico o californiana. Raza de la Meseta del Norte.	Raza del Norte o de las Montañas Rocallosas. Raza del Sur o del Suroeste.

Fuente: Burdon *et al.*, 1991; Wier, 1998; Quiroz y Rojas, 2004; Oliver y Ryker, 2005.

1.1.4 Asociaciones vegetales

El pino ponderosa es parte de tres tipos forestales del oeste de EE.UU., estos son: Pino ponderosa interior, Pino ponderosa del Pacífico – pino oregón y pino ponderosa del Pacífico siendo el tipo Pino ponderosa interior el de más amplia distribución.

El pino ponderosa forma parte del 65% de los tipos forestales del oeste de EE.UU., al sur del bosque boreal (Oliver y Ryker, 2005). Son varias las especies leñosas asociadas al pino ponderosa en su amplia área de distribución (Cuadro 3).

Cuadro 2. Resumen de requerimientos ecológicos de pino ponderosa.

Factor ambiental	Valor
Precipitación media anual	250 a 1.750 mm (con influencia de pp. sólida)
Temperatura media anual	5 a 10° C (verano entre 17 a 21° C)
Temperatura extrema mínima y máxima	-40° C y 43° C
Profundidad de suelos	Delgados a profundos
Drenaje de suelos	bueno a moderado
Meses secos	4
Período libre de heladas	90 a 154 días
Textura del suelo	liviana a pesada
Reacción del suelo	6 – 7 neutro
Altitud	Desde el nivel del mar hasta 3.050 msnm, entre 1.800 a 2.600 msnm el rango donde aparece más frecuentemente.

Fuente: Quiroz y Rojas, 2004; Oliver y Ryker, 2005.

1.1.5 Historia de vida

El pino ponderosa es una especie monoica. En el oeste de Montana, centro de Idaho y este de Oregon (EE.UU.) la floración comienza entre el 1 y 10 de Mayo, entre el 5 de Mayo y el 10 de Junio los estróbilos femeninos alcanzan una longitud de 2,54 cm, el polen se libera entre el 25 de Mayo y el 15 de Junio, el máximo desarrollo de los conos es entre el 20 de Julio y el 10 de Agosto del año siguiente, las semillas están maduras entre el 20 de Agosto y el 5 de Septiembre, la apertura de conos comienza entre el 1 y 13 de Septiembre y finalmente las semillas se liberan en Noviembre (Oliver y Ryker, 2005). Estudios realizados en Colorado (EE.UU.), indican que las flores carpelares emergen alrededor del 18 de Junio en boques ubicados a 2.710 msnm, de los cuales sólo un 36% sobrevive al principio del segundo año; esta emergencia inicial está fuertemente correlacionada con el final de las heladas.

La producción de semillas es irregular dentro de su distribución natural. En California se produce cada 2 o 3 años, pero es abundante cada 8 años, en promedio; en el noroeste del Pacífico los intervalos aumentan a 4 y 5 años. Los árboles a los 7 años ya tienen conos, y producen semillas hasta los 350 años, sin embargo la edad óptima para recolectar semillas

de mejor calidad es entre los 60 y 160 años. La cantidad de semillas por cono varía fuertemente en su área de distribución, por ejemplo en el norte de Arizona se presentan 31 semillas por cono, en el centro de Idaho entre 64 a 92 y en California 70 (Quiroz y Rojas, 2004; Oliver y Ryker, 2005). Las semillas de pino ponderosa no se diseminan naturalmente sobre grandes distancias. En el centro de Oregon, un 22% de las semillas alcanzaron los 37 m y tan sólo un 8% alcanzó una distancia de diseminación de 120 m.

Cuadro 3. Principales especies en asociaciones vegetales con pino ponderosa en su distribución natural.

Lugar	Especies
Noroeste	Pino oregón de las Rocallosas (<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>glauca</i> (Beissn.) Franco), pino contorta (<i>Pinus contorta</i> Dougl.), abeto gigante (<i>Abies grandis</i> (Dougl.) Lindl.) y alerce del oeste (<i>Larix occidentalis</i> Nutt.)
California	Abeto blanco de California (<i>Abies concolor</i> var. <i>lowiana</i> (Gord.) Lemm.), cedro de incienso (<i>Libocedrus decurrens</i> Torr.), pino amarillo (<i>Pinus jeffreyi</i> Grez. & Balf.), pino de azúcar (<i>Pinus lambertiana</i> Dougl.), pino oregón de la costa (<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>menziesii</i> (Mirb.) Franco), roble negro de California (<i>Quercus kelloggii</i> Newb.) y enebro del oeste (<i>Juniperus occidentalis</i> Hook.).
Montañas Rocallosas y Utah	Pino oregón de las Rocallosas, abeto colorado (<i>Picea pungens</i> Engelm.), pino contorta, pino flexible (<i>Pinus flexilis</i> E.James) y alamillo (<i>Populus tremuloides</i> Michx.).
Black Hills	Alamillo, picea blanca (<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss) y abedul papelero (<i>Betula papyrifera</i> Marsch.).
Arizona y Nuevo México	Abeto blanco (<i>Abies concolor</i> var. <i>concolor</i> (Gord. & Glend.) Lindl.), pino oregón de las Rocallosas, abeto colorado, alamillo, roble Gambel (<i>Quercus gambelli</i> Nutt.), y pino blanco del suroeste (<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.) en elevaciones altas; enebro de las Rocallosas (<i>Juniperus scopulorum</i> Sarg.), enebro caimán (<i>Juniperus deppeana</i> Steud.) y enebro de Utah (<i>Juniperus osteosperma</i> Torr.) en bajas altitudes.

Fuente: Oliver y Ryker, 2005.

A excepción de “Blacks Hills” y el lado oeste de la Sierra Nevada (California, EE.UU.) la regeneración natural es esporádica, debido a que requiere la ocurrencia de dos factores: alta producción de semillas y condiciones climáticas favorables durante la temporada de crecimiento siguiente. La textura del suelo, la competencia entre las plantas y las condiciones del semillero son otros factores que determinan la sobrevivencia de las plántulas.

La germinación de pino ponderosa es epigea. Estudios citados por Oliver y Ryker (2005) indican que el stress hídrico reduce la germinación como también la sobrevivencia y el crecimiento inicial de las plántulas. No obstante, el pino ponderosa presenta un crecimiento radicular rápido y vigoroso, en especial en sitios expuestos o donde no hay mucha competencia. La influencia de la competencia quedó demostrada en estudios realizados en

EE.UU. En Idaho, las plántulas sobrevivieron con humedad bajo en punto crítico en áreas libres de competencia. En las “White Mountains” en Arizona la sobrevivencia de plántulas no se produjo en áreas cubiertas por el pasto y en el norte de California y Oregon, la competencia con arbustos redujo la altura y diámetro de las plántulas.

La temperatura a menudo afecta el crecimiento de las plántulas de pino ponderosa. Las plántulas menores de 36 días son muy sensibles a temperaturas nocturnas menores de -5°C y pasados los 2 meses aumenta notablemente la resistencia a estas temperaturas. Cuando las plántulas tienen entre 1 y 2 años de edad sufren daños y muerte por heladas cuando el espesor de nieve es bajo. Las plántulas mayores tienen buena resistencia al frío, pero ante la presencia de vientos secos y heladas, se produce muerte invernal del follaje. En plántulas de 1 a 3 meses de edad se producen muertes por altas temperaturas del suelo, por sobre los 54°C , no obstante a medida que aumenta la edad de la planta, mejora la resistencia a las altas temperaturas (Oliver y Ryker, 2005).

El pino ponderosa no presenta reproducción vegetativa en forma natural, no obstante se ha logrado realizar propagación vegetativa mediante enraizamiento e injertos, pero su éxito disminuye rápidamente cuando se usan vástagos de árboles mayores de 5 años (Oliver y Ryker, 2005).

El crecimiento diametral puede ser rápido y constante por largos períodos cuando los árboles tienen un adecuado espacio, o sea libre de competencia. En California, en sitios buenos y libres de competencia pueden crecer 22 cm de DAP cada 10 años, mientras que en el centro de Oregon, en sitios poco productivos y libres de competencia, el crecimiento llega a 12 cm por década y en Arizona el promedio de crecimiento es de 4,3 cm cada 10 años en rodales raleados. En California el crecimiento diametral es menos de la mitad en rodales con fuerte competencia que en aquellos libres de competencia y el daño por insectos es mayor en rodales con competencia de arbustos.

El crecimiento en altura es más rápido en rodales cercanos a los 60 años, en el Pacífico Noroeste el crecimiento en altura de árboles dominantes en parcelas con moderada densidad es de 0,24 a 0,46 m por año entre los 20 y 60 años de edad. A medida que aumenta la edad el crecimiento en altura declina gradualmente, no obstante se ha determinado que la densidad del rodal afecta más de lo que se pensaba al crecimiento en altura incluso en sitios productivos (Oliver y Ryker, 2005).

Típicamente los árboles jóvenes son muy ramosos, ya que la poda natural es lenta. Solo se produce en árboles más viejos donde en promedio el largo de fuste libre de ramas puede llegar a los 3,5 m, lo que se observó en árboles de 250 años en el centro de Idaho.

El Cuadro 4 muestra la productividad de pino ponderosa en rodales naturales dentro de su distribución natural.

1.1.6 Plantaciones

En Estados Unidos, de las 15,2 millones de hectáreas de bosque de pino ponderosa que existen el 7% corresponde a plantaciones (1.048.648 ha) (Quiroz y Rojas, 2004).

Cuadro 4. Volumen total sin corteza (m³/ha) de rodales naturales de pino ponderosa entre 20 y 140 años de edad para cuatro calidades de sitio.

Edad (años)	Índice de Sitio a los 100 años			
	18 m	27 m	37 m	46 m
20	28	94	168	262
40	122	238	396	588
60	192	340	570	861
80	238	413	696	1.060
100	273	472	794	1.204
120	308	518	868	-
140	336	556	928	-

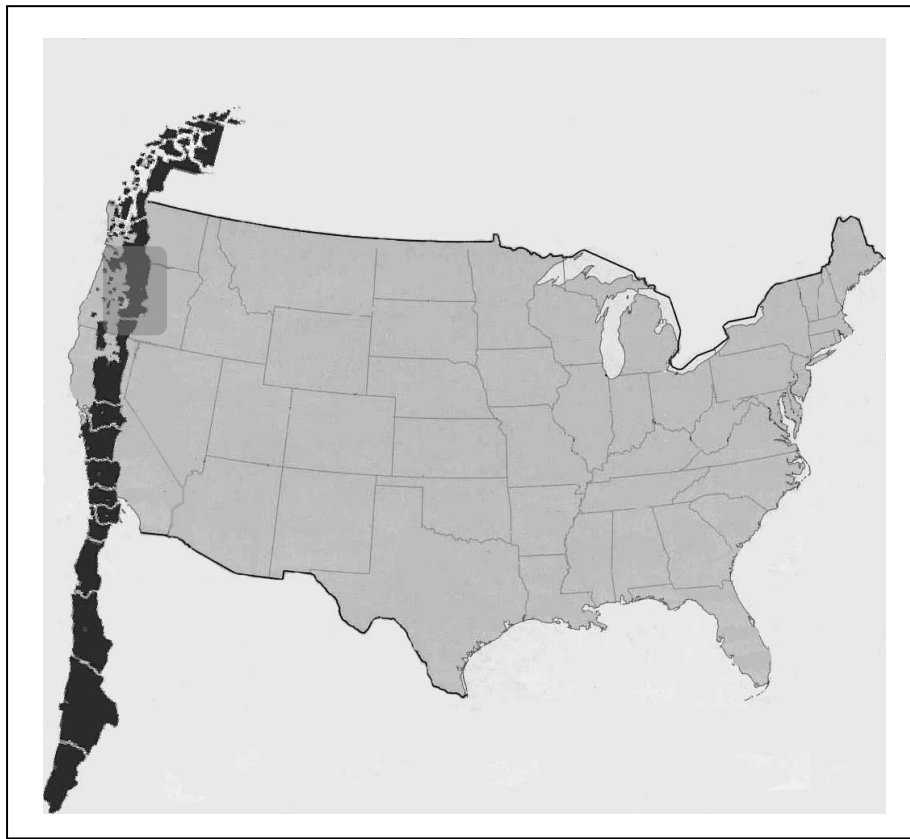
Fuente: Meyer, 1938; citado por Oliver y Ryker, 2005.

Fuera de su zona natural de distribución, la especie se encuentra presente en Sudáfrica, Australia, Nueva Zelanda y Sudamérica (Quiroz y Rojas, 2004). En Argentina hay aproximadamente 78.000 ha plantadas con pino ponderosa, ubicadas en la región denominada Andes Patagónicos. En la provincia de Neuquén se concentra la mayor cantidad de plantaciones de esta especie con 50.000 ha (CFI-FUNDFEAEP, 2007), y en las provincias de Río Negro y Chubut hay 5.000 y 23.000 ha respectivamente (Gonda, comunicación personal).

En Chile hacia el año 2002 habían 12.678 ha las que se concentraban entre la región de la Araucanía y la región de Aysén (Quiroz y Rojas, 2004). Hacia el año 2005 se superan las 13.959 ha, incluyendo a la región de Los Lagos, pero el 98% (13.693 ha) de la superficie plantada esta en la región de Aysén (datos proporcionados por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de la región de Aysén, Forestal MININCO Proyecto Aysén y el Instituto Forestal (INFOR) de la región de Aysén, 2005). Este aumento de la superficie se debe a la buena adaptación y crecimiento de la especie, debido a las similares características climáticas entre la Región de Aysén y su área de distribución natural (Figura 1). Sanhueza (1998) determinó en un ensayo de procedencia de pino ponderosa, instalado en el sector de Río Claro de la región de Aysén; que las mejores procedencias fueron las del estado de Oregón (EE.UU.), específicamente de la localidad de Paulina.

Las plantaciones establecidas en Chile se realizan con plántulas procedentes de viveros nacionales, y las semillas se obtienen de la Reserva Nacional Coyhaique, de EE.UU. y Argentina (Quiroz y Rojas, 2004).

Figura 1. Mapa de Chile superpuesto sobre el de EE.UU. haciendo coincidir la latitud y escala. La parte sombreada es el área de distribución de las plantaciones de pino ponderosa en Chile.



1.1.7 Productividad y crecimiento

Como se indicó en párrafos anteriores, pino ponderosa en su área de distribución natural, puede alcanzar grandes dimensiones; se han encontrado individuos con fustes de 263 cm de DAP y 70,7 m de altura (Curtis, 1965 citado por Oliver y Ryker, 2005).

En Nueva Zelanda, la productividad de plantaciones de pino ponderosa, proveniente de rodales de 30 años, varía entre 273 m³/ha con incrementos medios anuales de 6,83 m³/ha/año a los 338 m³/ha con incrementos de 8,24 m³/ha/año (mejor sitio) (Burdon *et al.*, 1991).

Antecedentes de crecimiento en Argentina, correspondiente a ensayos de procedencias en las provincias del Chubut y Río Negro, establecidos en cuatro sitios distintos en donde se midió la variable altura a los 11 y 16 años de edad y de diámetro a los 16 años, mostraron incrementos medios en altura que variaron entre 0,18 y 0,37 m/año, mientras que los incrementos medios en DAP entre 0,54 y 0,93 cm/año (Enricci *et al.*, 2000). Gonda (1999d) determinó la productividad de las plantaciones de pino ponderosa en la provincia de Neuquén (Argentina) alcanzando algunos rodales un crecimiento de 27 m³/ha/año y el crecimiento medio en altura varió entre 25 y 80 cm anuales y el índice de intercepción del

crecimiento (IIC) entre 1,5 y 4,8 m (variable que determina calidad de sitio en plantaciones jóvenes).

En la Reserva Nacional Coyhaique, región de Aysén, Chile, Gándara (1978) determinó que pino ponderosa es la especie forestal implantada que presenta mejores crecimientos en diámetro a la altura del pecho (DAP), altura (H), incremento diametral anual, área basal y presenta un alto porcentaje de individuos con fuste recto.

En un Cuadro, realizado por Quiroz y Rojas (2004), donde se muestra un resumen de resultados de estudios en diferentes rodales de Chile, referidos a crecimiento total y medio anual de altura y DAP; indican que en la provincia de Coyhaique el mayor valor de incremento medio anual de DAP es de 1,47 cm/año (rodal de 15 años) e incremento medio anual de altura es de 0,55 m/año (mismo rodal de 15 años).

1.2 Ecuaciones biométricas

1.2.1 Ecuaciones Altura-Diámetro

En inventarios forestales, por lo general, no se mide la altura de todos los árboles de las parcelas porque demanda mucho tiempo y además porque es factible estimar la altura a partir del diámetro en base a una muestra de relativamente pocas alturas. Esto último es factible por el hecho de que dentro de un mismo rodal la altura y el diámetro están altamente correlacionados. Generalmente se mide el diámetro de todos los árboles y la altura de una muestra que cubra el rango completo de diámetros. Con esta información se ajusta una ecuación para calcular la altura en función del diámetro y con ella se calcula la altura de los árboles a los que no se les midió dicho parámetro (Prodan *et al.*, 1997; Gonda *et al.*, 1998a).

Se han ajustado numerosas formas de ecuación H-D. Modelos lineales como no lineales han sido desarrolladas para pino ponderosa y otras coníferas, la mayoría en EE.UU. (Gonda *et al.*, 1998a). Los modelos lineales son más familiares para los silvicultores, pueden ser ajustadas con casi cualquier programa estadístico y son fáciles de usar si los datos son pocos y no representan el rango total de distribución del DAP (Curtis, 1967; Gonda *et al.*, 1998a). Se debe tener en cuenta que cuando los modelos lineales contienen la variable de respuesta (H) transformada logarítmicamente, al calcular el antilogaritmo de la ecuación para realizar predicciones se introduce un error o sesgo que pueden producir estimaciones con errores de hasta el 20% (Baskerville, 1972; Dolph *et al.*, 1995). Este sesgo se debe fundamentalmente al hecho de el cálculo del antilogaritmo de la altura produce como resultado la mediana y no el promedio. La corrección de este sesgo intrínseco de las ecuaciones logarítmicas es difícil de corregir (Flewelling y Pienaar, 1981) y este proceso no siempre brinda buenos resultados. Además la corrección del sesgo requiere que los datos utilizados para ajustar la ecuación sean normales (Baskerville, 1972; Bell *et al.*, 1981).

Las ecuaciones no lineales poseen como principal ventaja su flexibilidad la que permite formas biológicamente razonables, propiedad altamente deseable por los usuarios que a menudo usan estos modelos para extrapolar datos faltantes. Además, los modelos no lineales no requieren de una corrección del error logarítmico como los modelos lineales;

pero generalmente las ecuaciones necesitan ser transformadas o ponderadas para corregir la heterocedasticidad (Huang *et al.*, 1992; Vanclay, 1994; Gonda *et al.*, 1998a).

De las numerosas formas de ecuación H-D ajustadas para pino ponderosa tanto en EE.UU. como en la Argentina se eligieron las seis que se consideran podrían brindar los mejores resultados (Cuadro 5).

Cuadro 5. Ecuaciones H-D más usadas en pino ponderosa.

	Modelo	Referencias
<i>Lineales</i>		
[EHD1]	$H = \beta_0 + \beta_1 \text{LogDAP}$	Andenmatten y Letourneau, 1998.
[EHD2]	$\text{Log}[H - 1,3] = \beta_0 + \beta_1 \text{LogDAP}$	Gonda <i>et al.</i> , 1998a.
<i>No lineales</i>		
[EHD3]	$H = 1,3 + e^{\left(\beta_0 + \left(\frac{\beta_1}{\text{DAP}^{2,54}}\right)\right)}$	Dolph <i>et al.</i> , 1995; Moore <i>et al.</i> , 1996; Gonda <i>et al.</i> , 1998a.
[EHD4]	$H = 1,3 + e^{(\beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2)}$	Dolph <i>et al.</i> , 1995, Hanus <i>et al.</i> , (1999b).
[EHD5]	$H = 1,3 + \beta_0 e^{(\beta_1 \text{DAP}^2)}$	Larsen y Hann ,1987; Wang y Hann, 1988; Moore <i>et al.</i> , 1996; Gonda <i>et al.</i> , 1998a.
[EHD6]	$H = 1,3 + \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 \text{DAP}}]^{\beta_2}$	Garman <i>et al.</i> , 1995.

1.2.1.1 Ecuaciones H-D a nivel de rodal y regionales. Como se indicó anteriormente las ecuaciones H-D deben ajustarse para cada rodal, dado que el sitio, la edad, la densidad y el grado de competencia modifican esta relación. Gonda y otros (2004) demostraron para 127 rodales de la provincia de Neuquén (Argentina) el fuerte sesgo que incluye una ecuación H-D regional, cuando se aplica a distintos rodales en particular. Sin embargo Hanus y colaboradores (Hanus *et al.*, 1999a y 1999b) demostraron que para rodales de varias coníferas del noroeste de EE.UU., entre ellas el pino ponderosa, agregando al dato del DAP, la altura y el diámetro de los árboles dominantes de cada rodal, es posible corregir este sesgo. La forma de ecuación regional propuesta por Hanus y otros (1999a) produjo buenos resultados para las plantaciones de pino ponderosa de Neuquén (Argentina); la diferencia promedio máxima entre la H observada y la estimada en 127 parcelas fue del 4% y 16% respectivamente (Gonda *et al.*, 2004).

1.2.2 Ecuaciones de Volumen

La estimación del volumen del árbol individual es un problema relevante en dendrometría e inventarios forestales. La dificultad en la determinación directa del volumen mediante la cubicación de secciones hace conveniente contar con expresiones matemáticas que, basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permitan estimar el

volumen de los árboles sobre la base de mediciones simples, en especial la estimación del volumen del fuste o tronco principal que, por lo general, representa la porción del árbol con mayor valor comercial (Prodan *et al.*, 1997).

En general, el contenido volumétrico del fuste se considera en función de las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (H) y alguna expresión de la forma (*f*). No obstante, se distinguen dos tipos de ecuaciones de volumen; las locales o tarifas, usan sólo una variable explicativa o independiente (DAP o Área basal) y las regionales o generales que usan dos o tres variables (Prodan *et al.*, 1997; Gonda *et al.*, 1998b).

1.2.2.1 Ecuaciones de volumen local o tarifas. Las ecuaciones locales se aplican comúnmente en pequeños bosques, ya que cuando se aplican en áreas con un amplio rango de condiciones de sitio, las estimaciones de volumen no son tan precisas, comparándolas con ecuaciones que usan DAP y H (Prodan *et al.*, 1997; Gonda *et al.*, 1998b). Para la especie pino ponderosa, por ejemplo, fue demostrado por Chapman y otros (1982) que en plantaciones jóvenes ubicadas en el norte del estado de Washington (Estados Unidos) las estimaciones de volumen con ecuaciones locales eran menos precisas que las estimadas con ecuaciones que usan DAP y H. A pesar de estas restricciones, estas ecuaciones se usan comúnmente ya que, por lo general, no se dispone de información de H (Gonda *et al.*, 1998b).

1.2.2.2 Ecuaciones de volumen regional o generales. Las ecuaciones de volumen regional o generales incluyen DAP y H, y en algunos casos una expresión de la forma. Este último tipo de ecuaciones de volumen se denominan funciones de volumen de clase de forma, en Estados Unidos se usan corrientemente e incluyen como expresión de la forma, además de DAP y H, el coeficiente forma de Girard (Husch *et al.*, 1982). Otras características como calidad de sitio, edad, número de árboles por unidad de área o área basal, no son usualmente incluidas porque generalmente no mejoran la capacidad de predicción (Burkhart, 1977; MacLean y Berger 1976; Gonda *et al.*, 1998b). El radio de copa (RC) como tercera variable en el cálculo de volumen no fue significativo en plantaciones de pino ponderosa del suroeste de Oregon (EE.UU.) (Walters *et al.*, 1985; Walters y Hann, 1986); mismo resultado obtuvieron Gonda y otros (1998b) en plantaciones de Neuquén (Argentina).

Para este estudio se escogieron las ecuaciones locales (tarifas) y generales (regionales), con DAP y H como variables dependientes, más comúnmente usadas para estimar volumen sin corteza en pino ponderosa y otras especies (Cuadro 6).

1.3 Determinación de la Calidad de sitio

La importancia de la determinación de la Calidad de Sitio de un rodal, o de su índice, es fundamental, ya que si consideramos las relaciones que pueden establecerse entre las variables que definen el comportamiento de un bosque (productividad, crecimiento, rendimiento, etc.) y la potencialidad del sitio que lo sustenta, la determinación de este último es crucial y cada vez más utilizada como insumo para modelos forestales de predicción, por tanto, una temprana estimación permite realizar, con un menor grado de

incertidumbre, planificaciones, tanto silviculturales como económicas, que permiten precisar el manejo forestal (Andenmatten y Letourneau, 1997).

Cuadro 6. Ecuaciones de volumen local (tarifas) y generales (regionales) usadas en pino ponderosa y otras especies.

Modelo		Autores y especies
<i>Locales</i>		
[EV1]	$\text{LnV} = \beta_0 + \beta_1 \text{LnDAP}$	McDonald y Skinner, 1989 (pino ponderosa); Gonda <i>et al.</i> , 1998b (pino ponderosa)
[EV2]	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP} + \beta_2 \text{DAP}^2$	Gonda <i>et al.</i> , 1998b (pino ponderosa)
[EV3]	$V = \beta_0 \text{DAP}^{2\beta_1}$	Chapman <i>et al.</i> , 1982 (pino ponderosa, pino oregón, pino contorta, alerce del oeste); Gonda <i>et al.</i> , 1998b (pino ponderosa)
<i>Regionales</i>		
[EV4]	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H}$	MacLean y Berger, 1976 (pino ponderosa, pino amarillo, pino de azúcar, pino contorta, pino oregón, abeto blanco, abeto rojo de California (<i>Abies magnifica</i> Murr.), cedro de incienso; Burkhart, 1977 (pino americano (<i>Pinus taeda</i> L.); Oliver y Powers, 1978 (pino ponderosa); Cao <i>et al.</i> , 1980 (pino americano); Chapman <i>et al.</i> , 1982 (pino ponderosa, pino contorta, alerce del oeste, pino oregón); Andenmatten <i>et al.</i> , 1995 (pino ponderosa); INFOR-INFORA, [s.a.] (pino ponderosa); Gonda <i>et al.</i> 1998b (pino ponderosa); Casanova, 2002 (pino ponderosa).
[EV5]	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H} + \beta_2 \text{DAP}$	Bell <i>et al.</i> , 1981 (abeto montaños (<i>Tsuga mertensiana</i> (Bong.) Carr.); Ferreira, 1993 (ocote (<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.)); Gonda <i>et al.</i> , 1998b (pino ponderosa);
[EV6]	$V = \beta_0 + 10^{\beta_1} \text{DAP}^{\beta_2} (\text{H}^{\beta_3})^{\beta_4}$	Bell <i>et al.</i> , 1981 (abeto montaños); Gonda <i>et al.</i> 1998b (pino ponderosa).
[EV7]	$V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H} + \beta_2 \text{DAP} + \beta_3 \text{DAP}^3 + \beta_4 \text{DAP}^4$	INFOR – INFORA, [s.a.] (pino ponderosa)
[EV8]	$V = \beta_0 \text{DAP}^2 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H} + \beta_2 \text{H}^2 \text{DAP} + \beta_3 \text{H}^2$	Casanova, 2002 (pino ponderosa).

La determinación de la calidad de sitio con más éxito en plantaciones coetáneas puras es denominado Índice de Sitio (IS) (Corvalán y Hernández, 2006). Éste analiza la relación entre la edad y la altura del rodal y más específicamente la altura dominante (o sus expresiones equivalentes) ya que para muchas especies el crecimiento en altura de los

árboles más grandes del rodal está correlacionado con la capacidad productiva del sitio (Husch *et al.*, 1972; Corvalán y Hernández, 2006).

No obstante, el método IS no es conveniente cuando se usa en plantaciones de edades menores a 15 o 20 años, en estos rodales jóvenes la altura puede estar fuertemente influenciada por la competencia y otros factores y, además, pequeños errores en la determinación de la edad o pequeñas desviaciones en el patrón de crecimiento promedio pueden resultar en grandes errores en IS (Nigh, 1995; Andenmatten y Letourneau, 1997; Gonda *et al.*, 1998c).

1.3.1 Método de Intercepción del Crecimiento.

Hacia 1946, un estudio realizado por José Marrero (citado por Wakeley, 1954) determinó la capacidad del método de Intercepción del Crecimiento (IC) para distinguir con bastante certeza las variaciones de calidad de sitio en plantaciones de pino de hoja grande (*Pinus palustris* Mill.), pino elioti (*Pinus elliotii* Engelm.) y pino americano ubicadas al norte de Mississippi. En adelante varios autores indican que el método IC es una alternativa que ha demostrado ser más precisa como indicador de calidad de sitio que el IS en plantaciones jóvenes (Wakeley, 1954; Wakeley y Marrero, 1958; Richards *et al.*, 1962; Beck, 1971; Oliver, 1972; Powers y Oliver, 1978; Nigh, 1995; Gonda *et al.*, 1998c). El método IC consiste en la evaluación de la calidad de sitio usando información de crecimiento en altura de un rodal en un corto período de tiempo, su aplicación es posible si se conoce el patrón de elongación anual de la especie (Gonda *et al.*, 1998c; Corvalán y Hernández, 2006).

El método IC puede utilizar el crecimiento anual promedio en altura (Nigh, 1995) o definirse como la longitud total o promedio de un específico número de internudos o entrenudos anuales sucesivos (ENT); las dos opciones comenzando desde un punto definido del tronco o fuste (Thrower, 1990; citado por Andenmatten y Letourneau, 1997). El punto de partida es generalmente cerca o sobre la altura al pecho (1,3 m), de tal forma de evitar el errático crecimiento en altura durante el período de establecimiento de las plántulas (Gonda *et al.*, 1998c). El valor numérico del modelo de IC es denominado Índice de IC (IIC).

Numerosos son los factores que pueden causar irregularidades en el crecimiento durante el período de establecimiento de la plántula, tales como competencia; enfermedades y pestes; tipo de almacenamiento del semillero; técnicas de plantado; maltrato de plántulas; daños de roedores, etc. (Powers y Oliver, 1978; Wakeley y Marrero, 1958; Wakeley, 1954; Gonda *et al.*, 1998c). Husch (1956) y McCormack (1956) citados por Gonda y otros (1998c) reconocieron los efectos en el método IS del errático crecimiento temprano de las plántulas de algunas coníferas.

Un resumen se indica (Cuadro 7) con las principales especies y autores donde se ha utilizado el método IC para determinar calidad de sitio.

1.3.2 Uso del método IC en el pino ponderosa

El pino ponderosa es una especie adecuada para la aplicación del método IC, debido a que su crecimiento en altura es uninodal, forma un nudo de ramas cada año (Oliver, 1972); y las

diferencias de crecimiento en altura causadas por el sitio aparecen tempranamente cuando los rodales alcanzan la altura al pecho (1,3 m) (Oliver y Powers, 1971). Clutter y otros (1983) citado por Gonda y otros (1998c) indican que el método de IS es un buen estimador de calidad de sitio en pino ponderosa, cuando la producción de volumen y el crecimiento en altura están altamente correlacionados. El mismo caso se da si se usa el método IC, como lo demostró Oliver en 1972 el cual estimó índice de sitio usando la intercepción de cuatro años (o cuatro internudos) en plantaciones y rodales naturales de pino ponderosa del norte de California (EE.UU.); para los rodales menores de 20 años el método IC entregó valores tan precisos y certeros que el IS, pero con menos trabajo.

Cuadro 7. Especies y autores de estudios donde se ha utilizado el método IC para determinar calidad de sitio.

Especie	Autores y referencias
Pino blanco (<i>Pinus strobus</i> L.)	Beck, 1971; Brown y Stires, 1981.
Pino rojo (<i>Pinus resinosa</i> Ait.)	Ferree <i>et al.</i> , 1958; Day <i>et al.</i> , 1960; Richards <i>et al.</i> , 1962; Shallau y Miller, 1966; Wilde, 1964; Gunter, 1968; Alban, 1972; Alban, 1979.
Pino oregón	Warrack y Fraser, 1955; Smith y Ker, 1956; Smith <i>et al.</i> , 1960;
Abeto del oeste (<i>Tsuga heterophylla</i> (Raf.) Sarg.)	Gregory, 1960.
Picea de Sitka (<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carr.)	Gregory, 1960.
Pino de Crimea (<i>Pinus nigra</i> Arnold var. <i>pallasiana</i> C. K. Shneid.)	Economou, 1990.
Pino americano	Wakeley, 1954; Wakeley y Marrero, 1958.
Pino elioti	Wakeley, 1954; Wakeley y Marrero, 1958.
Pino de hoja grande	Wakeley, 1954; Wakeley y Marrero, 1958.
Pino de hoja pequeña (<i>Pinus echinata</i> Mill.)	Wakeley, 1954; Wakeley y Marrero, 1958.
Pino ponderosa	Oliver, 1972; Powers y Oliver, 1978; Andenmatten y Letourneau, 1997; Gonda <i>et al.</i> , 1998c.

Powers y Oliver (1978) elaboraron dos ecuaciones para determinar calidad de sitio (indicado como altura dominante a los 50 años) usando el método IC en rodales de pino ponderosa de California, EE.UU. Andenmatten y Letourneau (1997) determinaron calidad de sitio (altura a los 20 años) midiendo el largo total de cinco internudos en rodales de las provincias de Río Negro y Chubut, Argentina. Gonda y otros (1998c) analizaron la

estimación de calidad de sitio midiendo el largo de uno hasta cinco entrenudos desde diferentes puntos del fuste, determinando que la medición del largo total de los cinco primeros entrenudos desde la altura al pecho tiene mejor correlación con la altura total dominante en las parcelas estudiadas. Gonda y Cortés (2001) utilizaron la ecuación elaborada por Gonda y otros (1998c) para determinar un rango de calidad de sitio entre los valores más alto de largo de entrenudos y los más bajos, implicando que los valores más altos de largo de entrenudos indican los mejores sitios, los más bajos mostrarían los peores sitios.

1.3.3 Calidad de sitio en plantaciones de la comuna de Coyhaique

La literatura referente a determinar calidad de sitio en plantaciones de pino ponderosa en Coyhaique es muy limitada. Quiroz y Rojas (2004) citan un trabajo de INFOR-INFORA (1999) en el cual determinaron una función de IS (indicado como la altura de los 100 árboles más gruesos por hectárea) para plantaciones de la comuna de Coyhaique.

La particularidad del método IC la hace potencialmente útil en las plantaciones de la comuna de Coyhaique, en su mayoría son menores a 20 años; presenta facilidad en su medición lo que implica menor error que medir la altura total en rodales muy densos; se evita medir por debajo de la altura del pecho y así se elimina el errático crecimiento temprano; además la medición directa de ENT da una buena aproximación de la calidad de sitio y muchos autores la proponen como una medida directa del IIC para indicar calidad de sitio (Wakeley, 1954; Wakeley y Marrero, 1958; Ferre *et al.*, 1958; Gonda *et al.*, 1998c). La principal desventaja es que este método de determinación de calidad está basado sólo en edades tempranas de crecimiento en altura y no puede ser relacionada con el crecimiento en altura de edades tardías.

1.4 Ecuaciones de productividad

Las decisiones en la industria maderera requieren de predicciones precisas de la productividad de los rodales. La predicción volumétrica junto con modelos de análisis económicos apropiados, hacen posible tomar decisiones relativas a la óptima edad de rotación, densidad de plantación, época de raleo, etc. La idea de estimación de productividad fue aplicado primeramente en China hace más de 350 años atrás, no obstante, recién en el siglo XVIII, en Europa, se crearon las primeras técnicas de predicción de productividad en rodales coetáneos (Gonda *et al.*, 1998d).

MacKinney y Chaiken en 1939 y Schumacher también en 1939 desarrollaron las primeras ecuaciones de productividad, convirtiéndose en la base de construcción de numerosas funciones de productividad que, a menos que sean significativamente modificadas de las primeras versiones, predicen productividad basada en la edad, calidad de sitio y densidad (Gonda *et al.*, 1998d).

Los avances tecnológicos en el área de la informática han permitido la elaboración de sofisticados programas para la estimación de productividad, los cuales utilizan los criterios descritos anteriormente (Cuadro 8).

Dependiendo de la complejidad de los procedimientos matemáticos involucrados en estos programas, las funciones de productividad se clasifican usualmente como modelos de rodal-completo, clase-tamaño, o árbol-individual (Gonda *et al.*, 1998d). En el modelo rodal-completo la unidad básica es el rodal y usa las variables de estado referidas a la unidad de superficie como edad, altura dominante (sitio) y densidad (número de árboles ó área basal) (Prodan *et al.*, 1997; Vanclay, 1994).

Cuadro 8. Modelos de productividad de rodales de pino ponderosa del oeste de los EE.UU.

Nombre	Autores y referencias
PROGNOSIS	Wykoff <i>et al.</i> , 1982; Wykoff, 1986.
CACTOS	Wensel <i>et al.</i> , 1986.
PPSIM	DeMars <i>et al.</i> , 1987.
ORGANON	Hann <i>et al.</i> , 1993.
SYSTUM-1	Ritchie y Powers, 1993.

Fuente: Gonda *et al.*, 1998d.

Oliver y Powers (1978) usaron el modelo rodal-completo para elaborar ecuaciones de productividad en rodales de plantaciones no raleadas y con alta sobrevivencia de pino poderosa ubicadas en California, EE.UU. Las ecuaciones elaboradas incluyeron las variables de edad e índice de sitio del método de IC, estratificadas según densidad inicial. Gonda y otros (1998d) elaboraron dos ecuaciones de productividad para plantaciones jóvenes, también no raleadas, de pino ponderosa de la provincia de Neuquén, Argentina. Incluyeron las variables de edad, calidad de sitio (también usaron el método de IC) y densidad; en una ecuación usaron como expresión de densidad el número de árboles por hectárea y en la otra área basal por hectárea.

En la comuna de Coyhaique no se han elaborado ecuaciones de productividad. El mayor acercamiento es un estudio de Gilabert y Peters (1997), los cuales desarrollaron un modelo de crecimiento diametral, independiente de la distancia, el cual permite estimar incrementos en DAP para períodos de 3 y 5 años.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Determinar la productividad de las plantaciones de pino ponderosa existentes en la comuna de Coyhaique, provincia de Coyhaique, XI región.

1.5.2 Objetivos específicos

- Ajustar modelos de ecuaciones de altura en función del diámetro.
- Ajustar modelos de ecuaciones de volumen en función del diámetro (locales) y en función del diámetro y la altura (generales).
- Desarrollar un modelo que estime calidad de sitio usando el método de Intercepción del Crecimiento.
- Ajustar ecuaciones de productividad, en función de la edad, la densidad y el sitio, usando el modelo rodal-completo.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Material

El estudio se realizó en las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, provincia de Coyhaique, XI región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. La comuna de Coyhaique representa aproximadamente el 80,6% de las plantaciones de la región de Aysén y el 76,7% de las plantaciones en Chile (datos proporcionados por CONAF de la región de Aysén, Forestal MINICO Proyecto Aysén e INFOR de la Región de Aysén)

2.1.1 Antecedentes geográficos de la comuna de Coyhaique

INFOR (1994) zonificó la región de Aysén de tal manera de definir las actividades forestales, tales como introducción de especies, técnicas de plantación, mecanismo de apoyo a la sobrevivencia y manejo, compatibles con cada zona identificada.

Sobre la base de antecedentes climáticos y geográficos se definieron 6 zonas climáticas para la región, de las cuales tres están representadas en la comuna de Coyhaique, estas son:

2.1.1.1 Zona 1 BALMACEDA. Ubicada en el límite este de la comuna, el tipo climático que incide es el Templado frío con verano seco (Csc, según la Clasificación de Köppen). Presenta bajos niveles de precipitación, vientos moderados a fuertes. Los suelos se han desarrollado a partir de sedimentos finos, de origen fluvio-lacustre y lacustre, que han formado perfiles estratificados; en general son profundos, con moderada agregación de superficie y escaso desarrollo genético del perfil. Comprenden los sectores fronterizos de Estancia Baño Nuevo y Balmaceda.

2.1.1.2 Zona 2 VALLE SIMPSON. Representa la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, hay mayor altitud, por tanto se presenta en las cumbres el tipo climático Tundra por efecto de altura (ETH), aunque el predominante es el Csc, descrito anteriormente. En esta zona comienza a influir el tipo climático Continental Transandino con degeneración esteparia (Cfc). El viento es moderado a fuerte y hay un aumento, aunque leve, de las precipitaciones anuales. Comprende en la comuna el sector comprendido por la cuenca del río Simpson, los lagos Pólux, Cástor y Frío, sector este del cerro Divisadero y el sector de Ñiregüao.

2.1.1.3 Zona 4 COYHAIQUE. Predomina el clima Cfc, con aumento importante de las precipitaciones anuales; comprende las zonas aledañas a los poblados de Villa Ortega, Lago Atravesado y la capital regional Coyhaique. Los suelos de esta zona corresponden a depositaciones de material volcánico, específicamente pumicitas y cenizas, depositaciones que descansan sobre un sustrato geológico correspondiente a sedimentos marinos, glaciales, fluvio-glaciales y límnicos (Schalatter, 1979; Marín, 1987; citados por Sanhueza, 1998).

De los datos de estas zonas se desprende que en la comuna una de las principales restricciones para el crecimiento de las especies forestales son las temperaturas mínimas y la baja precipitación estival. Cabe destacar los cortos períodos vegetativos de la comuna (Cuadro 9).

Cuadro 9. Principales características de las diferentes zonas representadas en la comuna de Coyhaique, provincia de Coyhaique, región de Aysén (Chile).

Zonas	Precipitación anual (mm)	Temp. medias mín. (° C)	Temp. medias máx. (° C)	Temp. medias anuales (° C)	Duración del período seco	Duración del período vegetativo
Zona 1 <i>Balmaceda</i>	300 – 600	-4 – 0	16 – 18	4 – 8	más de 6 meses	2 – 4 meses
Zona 2 <i>Valle Simpson</i>	600 – 1.000	-4 – -2	14 – 18	4 – 8	2 – 6 meses	0 – 4 meses
Zona 4 <i>Coyhaique</i>	1.000 – 2.000	-4 – 0	14 – 18	4 – 8	2 – 6 meses	0 – 4 meses

Fuente: INFOR (1994).

Debido a la geomorfología de la comuna se produce un buen número de microclimas, en especial en sectores con lagunas, ríos, quebradas y llanuras; por tanto, hay una gran número de asociaciones y series de suelos (INFOR, 1994). No obstante, en términos generales la comuna presenta la Asociación Coyhaique, con las series de suelo Coyhaique, Ñiregüao, Pólux, Portezuelo, Puesto Viejo, Simpson y Villa Ortega (CIREN, 2005)

2.1.2 Antecedentes de las plantaciones de la comuna de Coyhaique

Aproximadamente el 95% de las plantaciones pertenecen a privados de las cuales el 83% es de la empresa Forestal Mininco S. A., las demás pertenecen al estado ubicadas en la Reserva Nacional Coyhaique bajo administración de CONAF.

Debido a la diferencia en los objetivos de plantación se observa una marcada distinción entre las plantaciones de más de 20 años y las más nuevas.

Las plantaciones más antiguas presentan un buen prendimiento y alta densidad inicial, originadas de forestaciones con objetivos de protección, esta alta densidad se mantiene debido a la baja mortalidad natural. Además, ninguna de estas plantaciones ha tenido algún tipo de intervención silvícola, lo cual se ha traducido en una reducción de los incrementos volumétricos posibles de obtener, existiendo una alta proporción de árboles delgados y de calidad deficiente (Morales y Canala-Echeverría, 1996).

En cambio las plantaciones más nuevas se han realizado con objetivos productivos en su mayoría. La densidad inicial no es alta, en especial en las plantaciones de la empresa Forestal Mininco S. A., además esta empresa tiene sus rodales insertos en programas de manejo (Eyzaguirre, conversación personal).

A pesar de estas diferencias, las plantaciones de la comuna en su mayoría no han tenido algún tipo de intervención silvícola. La excepción la dan algunos rodales de la Reserva Nacional Coyhaique y de plantaciones privadas en las cuales el raleo realizado tenía fines de investigación, por tanto a muy pequeña escala. Como se indico en el párrafo anterior, la empresa Forestal Mininco S. A. ha manejado sus plantaciones pero solo en lo referido a poda, aplicando como criterio la extracción de un 30% de copa viva; a inicios del 2005 comenzó la etapa del raleo pero solo en algunos rodales.

El origen de la mayoría de las plantas usadas en Coyhaique es del vivero privado de Mañihuales (perteneciente a Forestal Mininco S. A.). Las técnicas de plantación no difieren mayormente de las usadas en pino insigne (*Pinus radiata* D. Don.) en la zona centro de sur de Chile; se utiliza pala neozelandesa, transportándose las plantas en cajas plásticas; debido a las condiciones climáticas es necesario almacenar las plantas en barbecho, de tal forma de no sufrir daños por las condiciones meteorológicas extremas durante el invierno. La época de plantación es de Abril a Mayo y posteriormente entre Agosto y Octubre (Rodríguez, 1994).

El Cuadro 10 indica los valores mínimos, máximos y medios de las diferentes variables dasométricas de las plantaciones de la comuna de Coyhaique, datos obtenidos del muestreo realizado (plantaciones de 10 años y más).

Cuadro 10. Variables dasométricas de las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, con datos obtenidos del muestreo realizado.

	DAP (cm)	H(m)	Edad (años)	Densidad		DAP100 (cm)	H100 (m)
				Arb/ha	AB/ha (m ² /ha)		
MIN	0,5	1,32	10	568,20	1,29	5,24	2,57
MAX	48,0	21,00	41	3.125,00	144,77	40,48	20,35
PROM	14,1	6,45	18	1.621,79	37,99	19,84	7,72

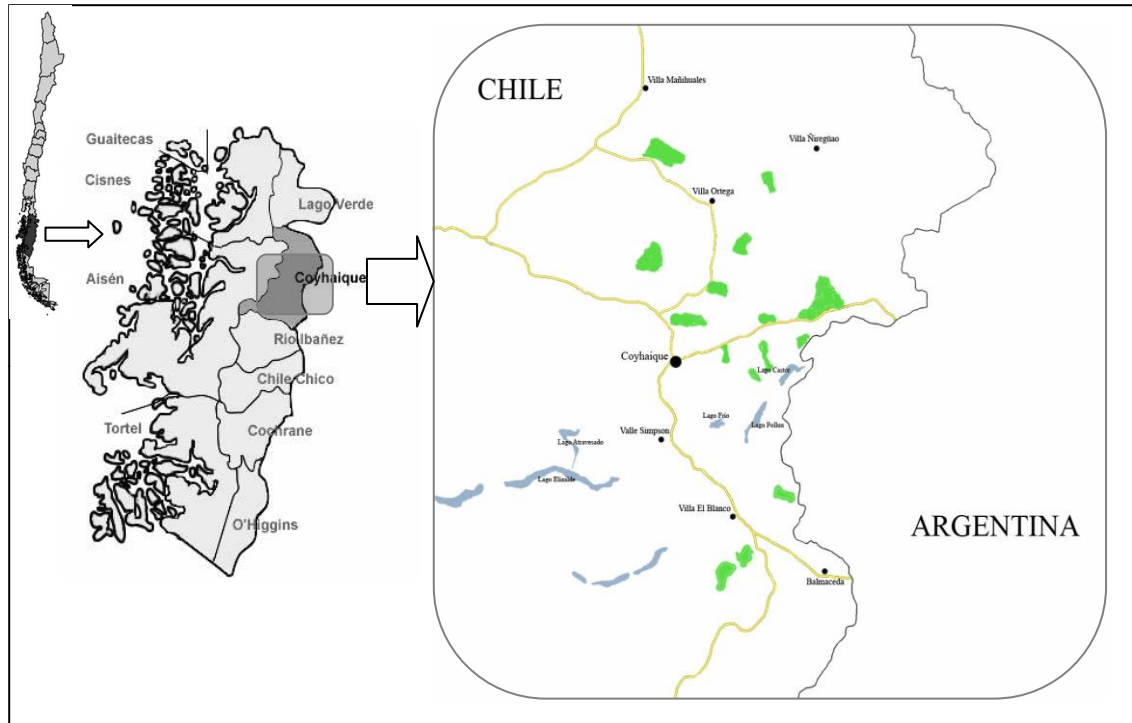
Nota : DAP100 = DAP promedio de los 100 árboles con mayor diámetro por hectárea
H100 = H promedio de los 100 árboles con mayor diámetro por hectárea.

2.2 Método

2.2.1 Origen de los datos

Los datos provienen de 91 parcelas instaladas en las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique (Figura 2). Tales parcelas fueron instaladas y medidas durante los meses de Marzo y Abril del año 2005, de tal forma de no medir variables durante el período de crecimiento de pino ponderosa.

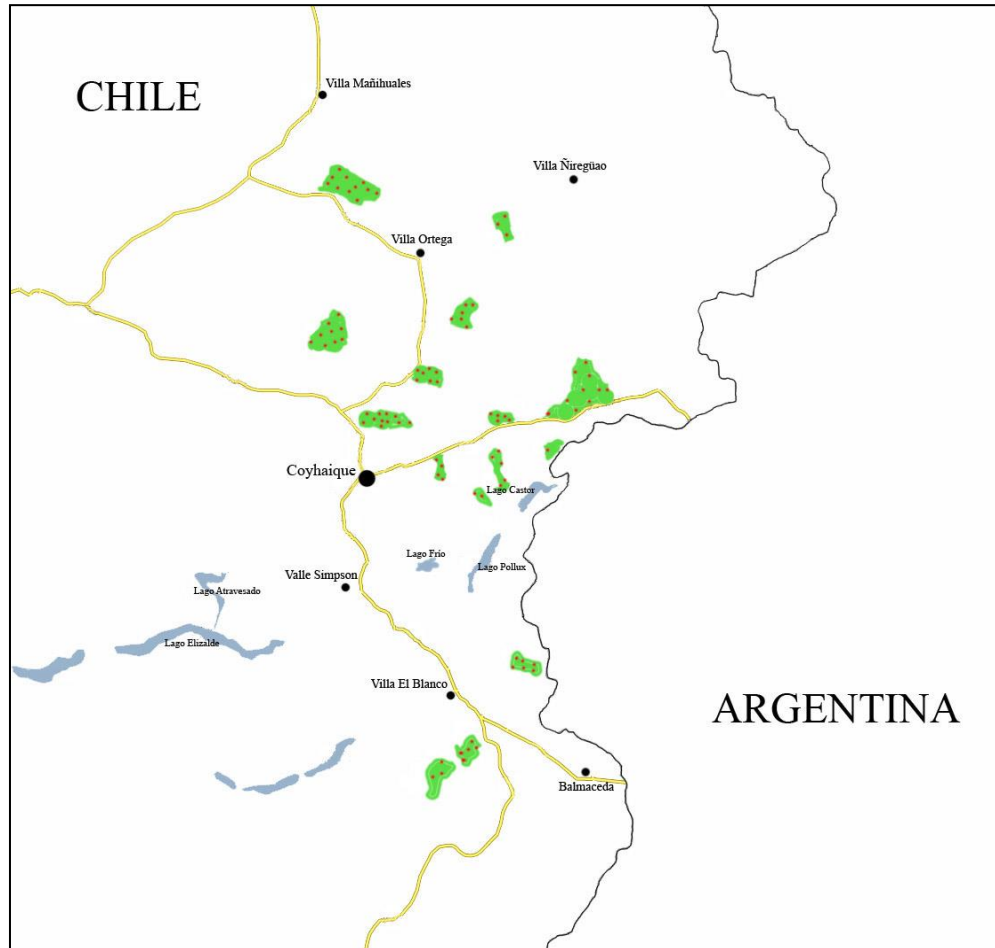
Figura 2. De izquierda a derecha, los siguientes mapas muestran la posición de la Región de Aysén en Chile y de la comuna de Coyhaique en la misma región. La zona ampliada corresponde al área de distribución de las plantaciones de pino ponderosa que fueron muestreadas, los sectores en verde corresponden a tales plantaciones.



La instalación de las parcelas obedeció al criterio de cubrir todo el rango de edades y número de árboles por hectárea, como también de distribución geográfica, de las plantaciones de pino ponderosa presentes en la comuna Coyhaique (Cuadro 10 y 11, Figura 3). No se incluyeron las plantaciones menores de 10 años ya que los modelos a ajustar entregan resultados poco confiables con rangos de edad muy jóvenes. Además, en el desarrollo del muestreo, se observó que al instalar parcelas en las plantaciones de 10 años y al medir la variable largo total de entrenudos, no se encontraba el número suficiente de estos para la medición (solo habían dos o tres entrenudos por sobre el DAP) por lo que se decidió no realizar el muestreo en las demás plantaciones de esa edad, de esta manera solo tres parcelas instaladas corresponden a la edad de 10 años. Se tomó esta decisión, ya que habría un número importante de parcelas con datos del largo de entrenudos extrapolados, lo que implica disminuir la certeza del estudio.

Se evitó instalar parcelas en plantaciones raleadas, ya que el modelo de productividad a elaborar, entrega rendimiento potencial de las plantaciones de pino ponderosa. Gonda y otros (1998d) observaron que la poda no tenía efecto significativo en la productividad, debido a que los rodales estaban recientemente podados y el procedimiento normal consiste en eliminar no más de 1/3 de la copa viva. En el caso de las plantaciones de Coyhaique hay cinco parcelas ubicadas en rodales podados recientemente.

Figura 3. Distribución aproximada de las 91 parcelas muestreadas (puntos rojos) en cada plantación de pino ponderosa en la comuna de Coyhaique.



Cuadro 11. Mínimo, máximo y promedio de los rangos de latitud, longitud, altitud, pendiente, precipitación anual y exposición en las 91 parcelas instaladas a través de la comuna de Coyhaique.

	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Pendiente (grados)	Precipitación (mm/año)	Exposición (grados)
MAX	45°54'00"	072°04'23"	992	47	1.358,5	360
MIN	45°19'52"	071°23'24"	430	0	522,3	4
PROM	45°30'47"	071°56'24"	726	13	1.018,7	214

La forma de las parcelas fue circular, pero de diferente área de manera tal de incluir a lo menos 40 árboles. En los terrenos con pendiente se realizaron los ajustes necesarios para definir exactamente el área y radio de cada parcela. No se midieron árboles muertos, ni se incluyeron en la cuenta de árboles de cada parcela. Los árboles con malformaciones (chuecos, doble o multiflecha) se incluyeron, pero sin medir el largo de entrenudos ni la

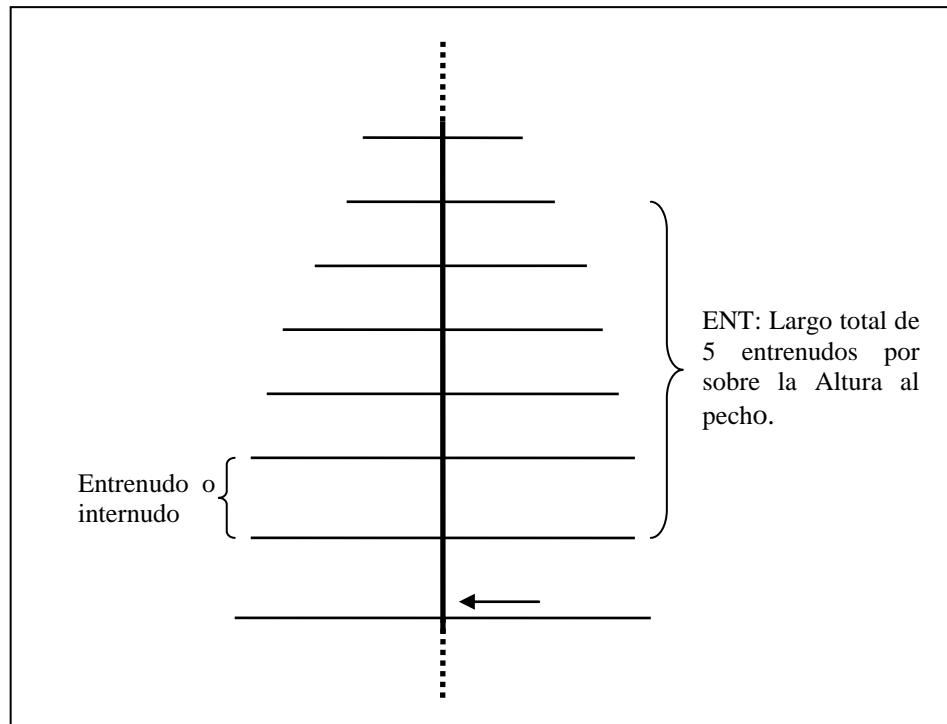
altura en caso que fueran del grupo de árboles más gruesos. No obstante, cuando la mayoría de los árboles presentaba la situación anterior en alguna parcela en particular, se midieron las variables del largo de entrenudos y altura en árboles con malformaciones, si correspondía, de esta forma se incluía alguna particularidad del sitio que producía tales deformaciones en los árboles (nieve, tipo de suelo, ataque de roedores).

2.2.2 Variables

En cada parcela se midieron y/o calcularon:

- **Diámetro a la Altura del Pecho (DAP).** El DAP se midió en todos los árboles de cada parcela, se utilizó forcípula con una precisión al milímetro.
- **Altura (H).** H se midió en los cinco árboles más delgados, cinco de diámetro medio y cinco más gruesos; total 15 árboles en cada parcela. Se utilizó vara telescópica de 8 m, precisión al centímetro; en aquellas parcelas donde habían árboles más altos de 8 m se utilizó clinómetro, con una precisión de 0,5 metros.
- **Largo total de los cinco entrenudos (o internudos) por sobre el DAP (ENT).** Esta variable se midió en un número tal de árboles que representen los 100 de mayor diámetro por hectárea, es decir si la parcela medía 300 m², se medía ENT en tres árboles. Se utilizó vara telescópica con una precisión al centímetro, la manera de medirlo se indica en la Figura 4.
- **Latitud y Longitud.** Medido en el centro de cada parcela con un equipo GPS. Los valores están expresados en coordenadas geográficas.
- **Altitud.** Medido en el centro de cada parcela con un equipo GPS. Los valores están expresados en metros sobre el nivel del mar.
- **Pendiente.** Medido sobre la pendiente más pronunciada de cada parcela. Se utilizó clinómetro, los valores se expresan en grados.
- **Exposición.** Se utilizó una brújula, los valores se expresan en grados.
- **Precipitación (PP).** Calculado utilizando mapas con líneas isohietas, los valores se expresan en total de milímetros en un año normal.
- **Edad.** Determinado por los correspondientes planes de manejo de cada predio.
- **Densidad (ARBHA).** Primeramente se calculó la densidad en cada parcela, para posteriormente extrapolar el dato a hectárea.
- **DAP Promedio de los 100 Árboles de Mayor Diámetro por Hectárea (DAP100).** Esta variable se calculó realizando un promedio ponderado del DAP de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea, es decir si la parcela medía 300 m², se promedia el DAP de los tres árboles más gruesos.

Figura 4. Esquema que indica la forma de medición de ENT.



- **H Promedio de los 100 Árboles de Mayor Diámetro por Hectárea (H100).** Esta variable se calculó realizando un promedio ponderado de H de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea, es decir si la parcela era de 300 m², se usaba la H medida de los tres árboles más gruesos.
- **ENT Promedio de los 100 Árboles de Mayor Diámetro por Hectárea (ENT100).** Esta variable se calculó realizando un promedio ponderado de ENT de los 100 árboles de mayor diámetro por gruesos.

2.2.3 Ajuste de ecuaciones H-D

Un total de 1.378 datos de H-D fueron utilizados para el ajuste de ecuaciones H-D, estos datos fueron obtenidos de las 91 parcelas indicadas anteriormente. Las seis ecuaciones H-D presentadas en la Introducción fueron ajustadas con los datos de las 91 parcelas separadamente. En las ecuaciones no lineales los coeficientes iniciales usados fueron $\beta_0 = 2$ y $\beta_1 = -3$, usados por Gonda y otros (1998a). Las ecuaciones fueron comparadas según el siguiente método:

- Número de rodales en los cuales hubo convergencia en la estimación de parámetros.
- Calidad del ajuste según error estándar de estimación ($S_{y,x}$), en esta comparación no se incluye la EHD2 por ser logarítmica.
- Análisis gráfico de los residuales y línea de regresión dibujada sobre la dispersión de datos observados.

La ecuación seleccionada será aquella que presente los mejores resultados en cada uno de las características a evaluar.

2.2.4 Ajuste de ecuaciones de volumen

Las ecuaciones de volumen mencionadas en la Introducción fueron ajustadas con datos provenientes del análisis fustal de 82 árboles muestra distribuidos entre las clases diamétricas de 5 a 40 cm, seleccionados de los alrededores de cada parcela. Los árboles seleccionados eran de fuste recto, sanos y sin malformaciones. Los cortes se hicieron a 5 cm del suelo, luego a 30 cm del suelo y posteriormente cada 1 m (Figura 5).

En cada troza se midió el diámetro inferior y superior sin corteza; además se midió la altura total de cada árbol y las alturas a los siguientes diámetros comerciales: 5, 10, 15 y 20 cm. Para el cálculo del volumen en cada troza se utilizó la forma de ecuación del Paraboloido Truncado de las Fórmulas de Smalian (ver Figura 5):

$$V = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \frac{d_i^2 + d_s^2}{2} \cdot L \quad \text{CONOIDE TRUNCADO}$$

Donde:

- V es el volumen (m³).
- L es el largo de la troza (m).
- d_i, d_s son el diámetro inferior y superior respectivamente (m).

En la última troza se utilizó la fórmula del cono:

$$V = 1/3 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot d^2 L \quad \text{CONO}$$

Donde:

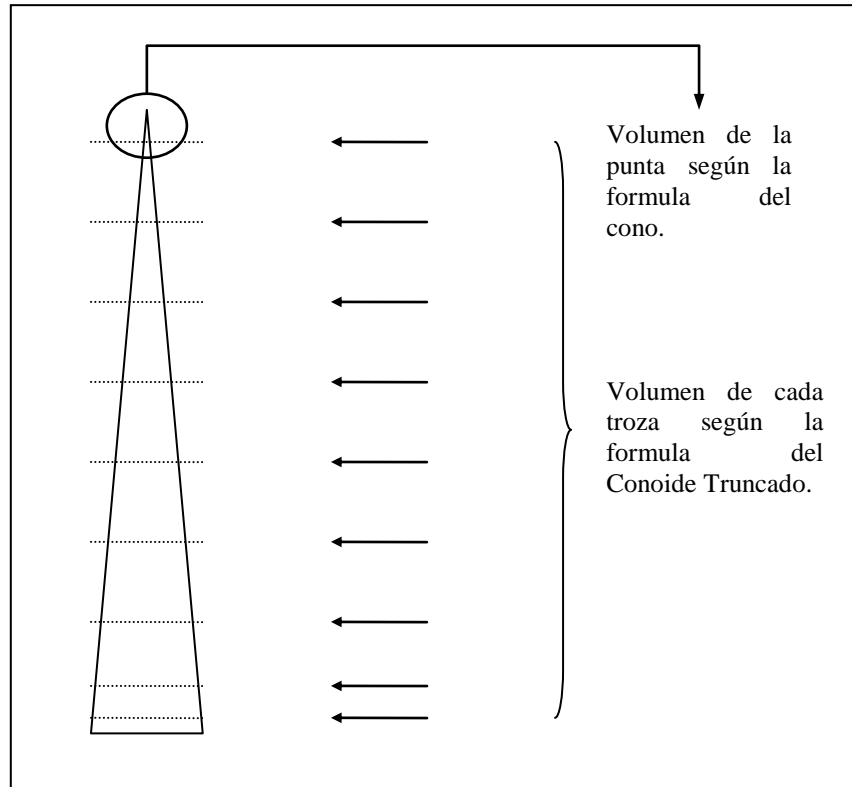
- d es el diámetro basal de la troza.

El análisis se realizó siguiendo el siguiente método:

- Calidad del ajuste según S_{y,x}.
- Significancia de los coeficientes según prueba t (α = 0,05).
- Los residuales se evaluaron gráficamente para analizar evaluar normalidad y homogeneidad de varianza, de tal manera de obtener estimaciones insesgadas.

La ecuación seleccionada será aquella que presente los mejores resultados en cada una de las características a evaluar.

Figura 5. Esquema que indica los puntos donde se realizaron los cortes y la fórmula utilizada para cubicar cada troza.



2.2.5 Determinación de un modelo de calidad de sitio

Tres ecuaciones lineares fueron ajustadas con los datos de H100 y ENT100 medidos del set de datos citados anteriormente. Prodan y otros (1997) recomiendan el uso de H100 como altura dominante por ser objetivamente obtenida. Se escoge como edad clave 20 años por ser más cercana a la edad de rotación esperada (entre 35 a 40 años), también porque la mayoría de las plantaciones de la comuna son menores a 25 años. Las funciones ajustadas fueron las siguientes:

$$H100_{20} = \beta_0 + \beta_1 ENT100 \quad [EIIC1]$$

$$H100_{20} = \beta_0 + \beta_1 ENT100^2 \quad [EIIC2]$$

$$H100_{20} = \beta_0 + \beta_1 ENT100 + \beta_2 ENT100^2 \quad [EIIC3]$$

Donde:

- H100₂₀ es la altura dominante a los 20 años (m).

Los datos de H100₂₀ fueron obtenidas de 30 parcelas de las cuales cuatro eran de 20 años, cuatro de 21, cinco de 25 y 17 de 26. Para determinar el valor de H100₂₀ en aquellas

parcelas de más edad, sus valores de H100 fueron interpolados linealmente a la edad de 20 años.

El mejor modelo será aquel con el coeficiente de determinación y error estándar más bajo, además de poseer todos sus coeficientes significativos. Con el modelo seleccionado se elaborará un Cuadro de calidad de sitio entre los mejores y peores valores de IIC, basados en ENT100 hallados y su correspondiente H100₂₀ estimado.

2.2.6 Determinación de la productividad

Para la determinación de la productividad se ajustaron dos modelos matemáticos utilizados por Gonda y otros (1998d) y propuestos por Schumacher en 1939. Estos modelos predicen productividad basado en tres variables: edad del rodal, alguna función de calidad de sitio, y alguna función de densidad.

En este estudio se utilizó la edad de la plantación como edad del rodal, el IIC basado en el largo total de los cinco entrenudos por sobre el DAP y el número de árboles por hectárea (ARBHA) como variable de densidad en un modelo, y en el otro, el área basal por hectárea (ABHA). Gonda y otros (1998d) indicaron que el modelo basado en ABHA permite obtener buenas estimaciones de volumen en la presente edad de la plantación, ya que se desconoce la variación de ABHA a diferentes edades, mientras que el modelo basado en ARBHA puede predecir el volumen a diferentes edades basado en el supuesto de mantener constante el ARBHA.

Oliver y Powers (1978) utilizaron un modelo similar basado en ARBHA estratificando los datos según densidad expresada en número de árboles por hectárea, ajustando un total de cuatro ecuaciones. Gonda y otros (1998d) no estratificó por densidad sino que incluyó esta variable en los dos modelos.

Gonda y otros (1998d) ajustaron los dos modelos de productividad utilizando las tres variables indicadas, investigando además si la adición de algunos de los factores ambientales que afectan el crecimiento, mejoraban el ajuste. Ellos determinaron que la precipitación, expresada como longitud, ayudaba a explicar la variación de productividad. Lo anterior debido al efecto de sombra de lluvia que produce la Cordillera de los Andes en la provincia de Neuquén, Argentina. Para este estudio se decidió incluir también la longitud ya que este valor es fácil de obtener y en el caso de la comuna de Coyhaique se observa este mismo efecto climático (Cuadro 8).

Además, para mejorar la heterocedasticidad, las ecuaciones fueron transformadas; dividiendo ambos términos de cada ecuación por un mismo denominador o factor de transformación. Gonda y otros (1998d) encontraron que para el modelo que determina productividad usando el ABHA el factor de transformación seleccionado fue $1/ABHA^{1,4}$, para el otro modelo que usa ARBHA el factor de transformación fue $1/E^{3,2}$. En este estudio también se transformaron las ecuaciones para mejorar la heterocedasticidad, usando los mismos factores de transformación seleccionados por Gonda y otros (1998d); debido al extra trabajo necesario para determinar los denominadores para el modelo usando los datos de la comuna de Coyhaique y a que las plantaciones de la provincia de Neuquén (Argentina) y las de la comuna de Coyhaique (Chile) tienen similares características.

Los modelos ajustados fueron:

$$VHA = e^{\beta_0} e^{(1/ENT100)\beta_1} e^{(1/E)\beta_2} ABHA^{\beta_3} e^{ABHA^2\beta_4} e^{E^2\beta_5} e^{LONG\beta_6} \quad [EP1]$$

Factor de transformación: $1/ABHA^{1,4}$

$$VHA = e^{\beta_0} e^{(1/ENT100)\beta_1} e^{(1/E)\beta_2} ARBHA^{\beta_3} e^{E^2\beta_4} e^{LONG\beta_5} \quad [EP2]$$

Factor de transformación: $1/E^{3,2}$

Donde:

- VHA es el volumen total sin corteza por hectárea (m^3/ha). Se obtuvo usando la ecuación de volumen elaborada para este estudio. En cada parcela se determinó el volumen por cada árbol y se extrapoló a la hectárea. Como en cada parcela no se midieron todas las H, estas se estimaron usando la ecuación H-D elaborada este estudio.
- ENT100 es el Índice de Intercepción del Crecimiento expresado por el promedio ponderado del largo total de los primeros cinco entrenudos sobre la altura al pecho (ENT) de los 100 árboles más gruesos por hectárea (cm).
- E es la Edad del rodal (años).
- ARBHA es el número de árboles por hectárea
- ABHA es el área basal por hectárea (m^2/ha)
- LONG es la longitud geográfica de la parcela. Los valores se ingresan como enteros con tres decimales, por ejemplo: $45^\circ 30' 47'' = 45,513$.
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 son los parámetros de la ecuación.

Los dos modelos fueron ajustados mediante regresión no lineal y se exponen sus diferentes indicadores estadísticos. Además, se elaborará un Cuadro de Productividad para diferentes calidades de sitio y densidades.

En todos los modelos ajustados se usó el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS), usando la subrutina PROC REG para las ecuaciones lineales y la PROC NLIN en las ecuaciones no lineales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ecuaciones H-D

Diferencias importantes no fueron observadas entre las seis ecuaciones ajustadas en términos de error estándar, cuando son comparadas por parcela (Apéndice 1) o cuando son comparadas los promedios de todas las parcelas (Cuadro 12).

Cuadro 12. Parámetros medios y error estándar para las seis ecuaciones H-D ajustadas y número de parcelas donde convergieron las ecuaciones no lineales.

	Parámetros medios			Error estándar ($S_{y,x}$)			Conv.
	β_0	β_1	β_2	Mínimo	Máximo	Media	
<i>Modelos Lineales</i>							
EHD1	0,40020	5,21522		0,11091	1,52993	0,60126	
EHD2	-0,12932	0,80925		0,01940	0,31034	0,08874	
<i>Modelos no lineales</i>							
EHD3	2,22133	-10,88034		0,07155	1,55467	0,58474	91
EHD4	9,44589	-824,32271	-0,8629	0,07603	1,32691	0,50256	59
EHD5	47,08104	$3,632 \times 10^{31}$	$-2,161 \times 10^{28}$	0,07603	1,52941	0,57747	56
EHD6	13.488,658	$-1,485 \times 10^{48}$	$-6,326 \times 10^{14}$	0,07662	2,36127	0,82748	72

La rutina usada para el ajuste de los modelos no lineales entregó como resultado que solamente la EHD3 convergió en todas las parcelas con los mismos parámetros iniciales. En el caso de las otras ecuaciones solo entre el 55 a 70% de las parcelas convergieron con los mismos parámetros iniciales (Cuadro 12).

La mejor calidad del ajuste corresponde a la EHD2, seguido por el modelo no lineal EHD3. No obstante, al tener la EHD2 la variable H transformada logarítmicamente se debe eliminar el sesgo del antilogaritmo, lo que representa un trabajo extra que no necesariamente eliminaría todo el error.

Además, de la observación del gráfico en que la respectiva línea de regresión es dibujada sobre la dispersión de puntos en cada parcela, se evidencia la alta flexibilidad de la EHD3 en parcelas de diferentes rangos de DAP (Figura 6 y 7). En comparación a la EHD2 la EHD3 tiene mejor desempeño en parcelas de DAP más pequeño y al observar los respectivos residuales, la EHD3 presenta menor sesgo que la EHD2 en aquellos rodales de menor DAP también (Apéndice 2).

Figura 6. Dispersión de datos H-D y línea de regresión elaborada con la EHD3 para la parcela con el mayor rango de DAP.

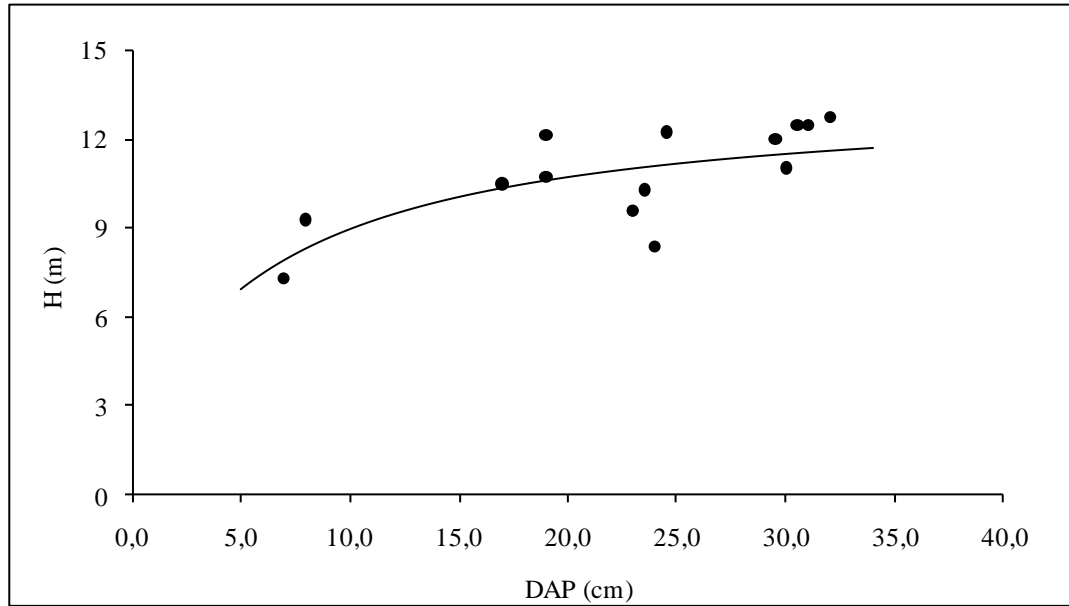
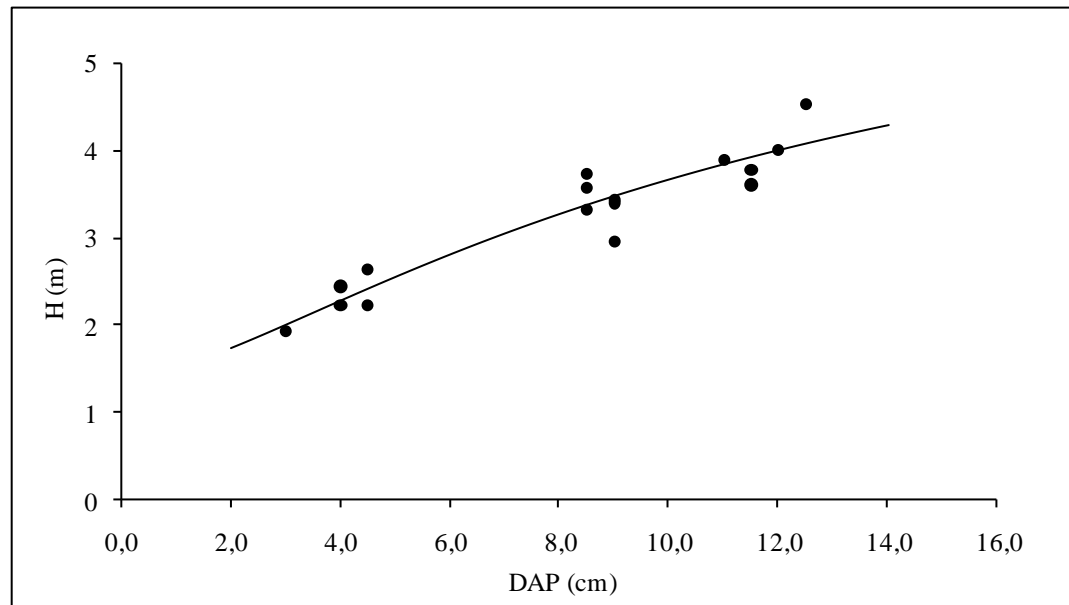


Figura 7. Dispersión de datos H-D y línea de regresión elaborada con la EHD3 para la parcela con el menor rango de DAP.



Para la EHD3 el proceso de ajuste entregó coeficientes estimados que no tuvieron un amplio rango de valores (Cuadro 13). Además, son similares a los rangos ajustados por Gonda y otros (1998a) en las plantaciones de pino ponderosa de Neuquén (Argentina), con similares rangos de distribución diamétrica (Cuadro 14 y Figura 8).

En resumen los cuatro modelos no lineales presentaron un buen ajuste (Cuadro 12) pero la EHD3 convergió utilizando los mismos coeficientes iniciales en todas las parcelas. Por ser esta ecuación no lineal, es lo suficientemente flexible para la estimación de alturas (Figura 6 y 7) sobre todo en el caso de los árboles de escaso diámetro (Apéndice 2). Por tanto se selecciona la EHD3 para la estimación de alturas en este estudio:

$$H = 1,3 + e^{\left(\beta_0 + \left(\frac{\beta_1}{DAP+2,54}\right)\right)} \quad \text{[EHD3]}$$

Cuadro 13. Comparación de parámetros estimados con la EHD3 con datos de plantaciones de pino ponderosa de Argentina y Chile.

	Neuquén, Argentina (Gonda <i>et al.</i> , 1998a)			Coyhaique, Chile		
	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo	Media
β_0	1,63331	3,52815	2,47223	1,18913	3,19885	2,22133
β_1	-19,86992	-3,80778	-11,81193	-19,6421	-4,5073	-10,88034

Cuadro 14. Rangos de H y DAP de los árboles medidos en plantaciones de pino ponderosa de este estudio y de plantaciones de pino ponderosa de Neuquén (Argentina) usados para ajustar ecuaciones H-D.

	Neuquén, Argentina (Gonda <i>et al.</i> , 1998a)			Coyhaique, Chile		
	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max
DAP (cm)	1,8	15,7	56,9	0,5	14,1	48
H (m)	1,7	7,2	29,5	1,3	6,5	21

3.1.1 Ecuación a nivel de rodal versus regional

Se decidió realizar una comparación del ajuste de la EHD3 con todos los datos H-D, los resultados se indican en la Cuadro 15.

Se observa que el error estándar de la EHD3 ajustada con todos los datos de todas las parcelas mezclados, es superior incluso al máximo error que presenta la EHD3 ajustada por parcela. Además, al dibujar la línea de regresión de la EHD3 ajustada con todos los datos H-D y la comparamos con la línea de regresión de algunas parcelas se observa claramente que hay significativos errores de estimación si aplicamos la EHD3 a nivel regional en comparación a su uso a nivel de rodal (Figura 9).

Figura 8. DAP y H de 1.378 árboles medidos para elaborar funciones H-D a nivel de parcela para plantaciones sin raleo de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique.

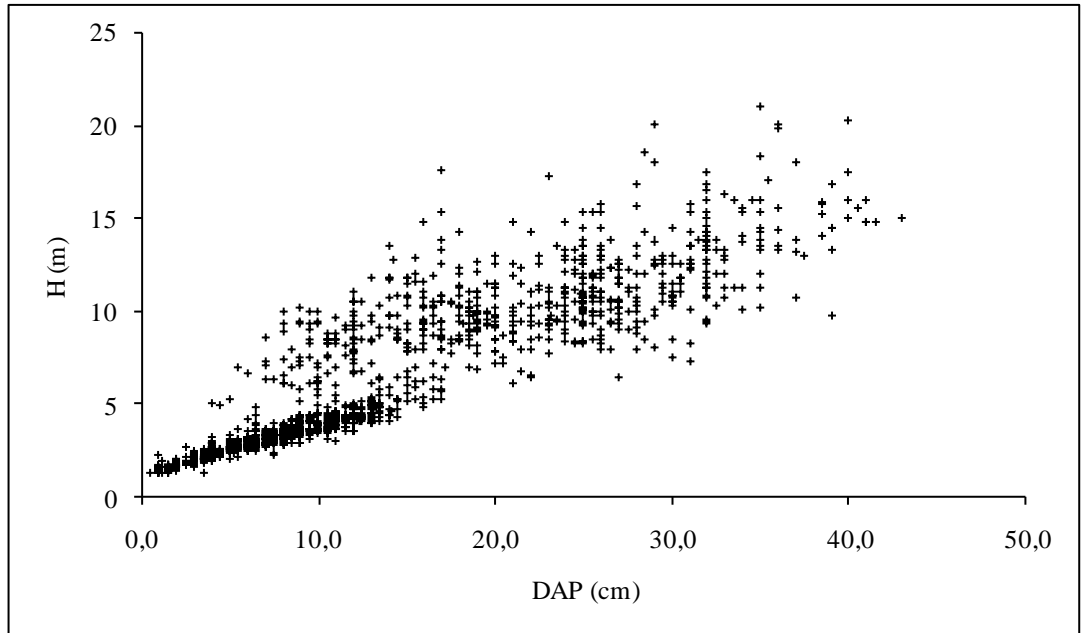
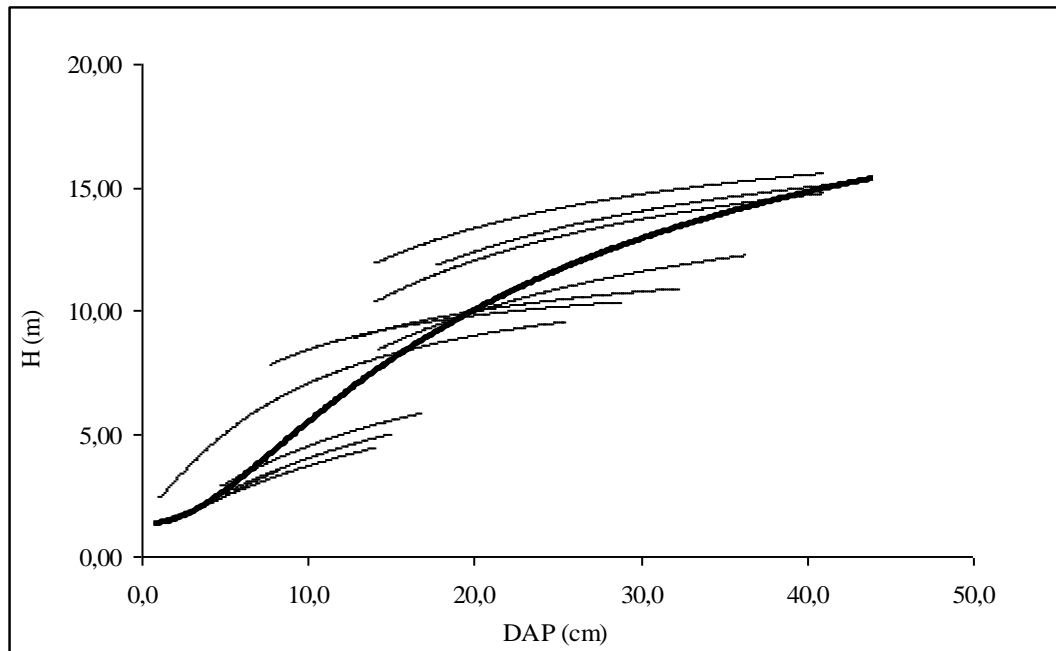


Figura 9. Líneas de regresión de la EHD3 ajustada con datos H-D de 10 parcelas (línea delgada) y línea de regresión de la EHD3 ajustada con todos los datos H-D de todas las parcelas en conjunto (línea gruesa) de las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique.



Cuadro 15. Comparación entre los parámetros estimados y error estándar de la EHD3 ajustada para el total de datos H-D y los del ajuste por parcela.

	Todos los datos H-D	Datos por parcela		
		Mínimo	Máximo	Media
β_0	3,0953	1,18913	3,19885	2,22133
β_1	-21,0018	-19,6421	-4,5073	-10,88034
$S_{y,x}$	1,71601	0,07155	1,55467	0,58474

3.2 Ecuaciones de volumen

En los Cuadro 16 y 17 se indican los coeficientes y error estándar de las 8 ecuaciones de volumen ajustadas, separando las ecuaciones de volumen locales (una variable) de las regionales (dos variables).

Como es de esperar las ecuaciones regionales tuvieron mejor ajuste que las locales, no obstante se presentan los resultados de las ecuaciones locales como antecedente para su uso en caso de que no se disponga el dato de H.

Respecto al sesgo, según se observa en el gráfico de residuales de cada ecuación esta característica no se presenta, a excepción de la EV1 en la cual se observa una tendencia a subestimar el volumen a medida que aumenta éste (Apéndice 3). Cabe hacer presente la heterocedasticidad de los residuales, lo que es muy normal en este tipo de ecuaciones; este problema se puede corregir transformando la ecuación o realizando regresión ponderada.

3.2.1 Ecuaciones de volumen regional

En términos de error estándar, las diferencias entre todas las ecuaciones regionales son tan pequeñas (no sobrepasan el 3%) que prácticamente pueden considerarse que los ajustes de todas ellas son equivalentes, por otra parte, el dibujo de la línea de regresión de cada modelo sobre la dispersión de datos de los árboles muestra es también muy similar (Apéndice 4); pudiendo un usuario forestal usar cualquiera de ellas. No obstante, un análisis detallado indicará leves diferencias entre ellas.

La EV7, fue la de más bajo error estándar, sin embargo, los términos DAP, DAP³ y DAP⁴ no son significativos y al eliminarlos sucesivamente se acercan claramente a la forma de la EV4, lo que hace suponer que la mejor calidad del ajuste se debía al mayor número de términos de ecuación. La segunda mejor ecuación es la EV8, también polinómica como la EV7, en ella el término H² se eliminó por no ser significativo, el error estándar aumenta a 0,020143, posteriormente se observa que el término DAP²H no es significativo, lo que indica que podría ser eliminado; no obstante hay bastante bibliografía que indica que el término DAP²H está fuertemente correlacionado con el volumen (Gonda *et al.*, 1998b), evidenciando de esta forma que, al igual que la EV7, su buena calidad de ajuste se debe exclusivamente a la gran cantidad de términos de la ecuación.

Cuadro 16. Coeficientes y error estándar de estimación para los tres modelos de ecuación de volumen local.

Coeficiente	Modelos		
	EV1	EV2	EV3
β_0	-9,44857	0,06119	0,000042
β_1	2,45269	-0,01125	1,3227
β_2		0,0006917	
S_{xy}	0,151616	0,04286	0,042071

Cuadro 17. Coeficientes y error estándar de estimación para los cinco modelos de ecuación de volumen regional.

Coeficiente	Modelos				
	EV4	EV5	EV6	EV7	EV8
β_0	0,01282	0,00702	0,0119	-0,01408	0,00013668
β_1	0,00002907	0,0000285	-4,47	0,00003263	0,00000607
β_2		0,0004448	1,8604	0,00288 (*)	0,00004863
β_3			5,6483	-6,55x10 ⁻⁶ (*)	-4,88x10 ⁻⁴ (*)
β_4			0,2	9,43x10 ⁻⁸ (*)	
S_{xy}	0,02027	0,02033	0,020174	0,01973	0,02002

* Coeficientes no significativos

La EV6 es la tercera mejor alternativa, sin embargo esta ecuación es de poco uso entre los usuarios de ecuaciones de volumen debido a su complejidad (Gonda *et al.*, 1998b). Las EV4 y EV5 finalmente, son buenas alternativas destacando la EV4 por su sencillez.

Teniendo en cuenta las discusiones anteriores es razonable elegir como ecuación final a la más sencilla, o sea la EV4 [$V = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 H$]. Cailliez (1980) indica que los modelos matemáticos para estimar volumen deben incluir variables independientes poco numerosas y fáciles de medir, fuertemente correlacionados con el volumen y débilmente correlaciones entre sí, como es el caso de la EV4. Además, esta ecuación es la más ampliamente utilizada para el cálculo del volumen de árboles forestales (Husch *et al.*, 1972) y del pino ponderosa en su zona de origen (Cochran, 1985; Oliver, 1972).

3.2.2 Ecuaciones de volumen local

Cuando no se dispone de los datos de H, las EV2 y EV3 pueden ser una alternativa para el cálculo de volumen. La EV3 se considera preferible porque a pesar de presentar un error estándar ligeramente inferior al de la EV2 incluye menos términos (Cuadro 16). La EV1 incluye el sesgo intrínseco de toda ecuación logarítmica que es difícil de corregir. El uso de estas ecuaciones se debe realizar tomando en cuenta las restricciones indicadas en la Introducción.

3.3 Índice de Intercepción del Crecimiento (IIC)

No se hallaron grandes diferencias entre los modelos ajustados, en términos de R^2 y S_{xy} . Por otro lado, los coeficientes fueron significativos en cada modelo (Cuadro 18). La EIIC1 se muestra como el modelo con los mejores resultados, por otra parte la línea de regresión al dibujarla sobre la dispersión de datos muestra claramente la tendencia lineal de la muestra (Figura 10).

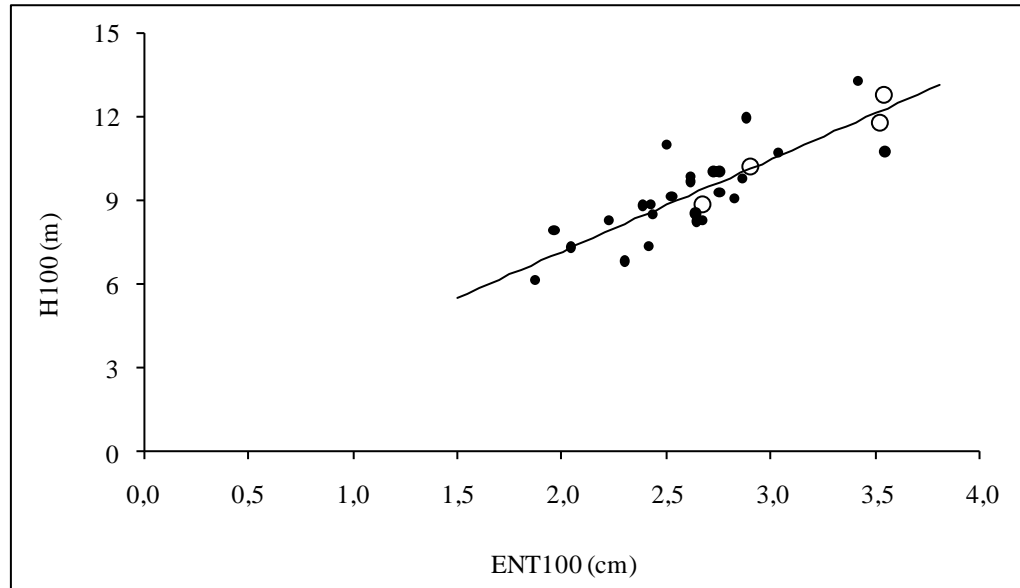
A pesar de la poca cantidad de datos para el ajuste, claramente se observa una relación entre ENT100 y H100, tal como lo indican varios autores; por lo que el uso de la medición de ENT es un buen acercamiento para conocer la calidad de sitio de diferentes rodales.

El más bajo valor de ENT100 de las 91 parcelas muestreadas fue 1,9 m, el más alto fue de 3,5 m. En atención a que las parcelas fueron instaladas a lo largo de la distribución de pino ponderosa, se puede inferir que tales valores incluyen la variación total de calidades de sitio presentes en la comuna de Coyhaique (Cuadro 19). No obstante, la mayoría de las plantaciones se encuentran en sitios con valores de ENT100 entre 2,0 y 2,9 m.

Cuadro 18. Coeficiente de determinación (R^2) y error estándar (S_{xy}) de cada EIIC a la edad de 20 años de plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique.

Coeficiente	Ecuaciones		
	EIIC1	EIIC2	EIIC3
β_0	0,55695	5,08139	-0,05029
β_1	3,30971	0,59041	3,75918
β_2			-0,08116
R^2	0,72	0,71	0,72
S_{xy}	0,9037	0,9191	0,9200

Figura 10. Línea de regresión de la EIIc1 dibujada sobre la dispersión de datos H100 y ENT100 para parcelas de rodales de 20, 21, 25 y 26 años; los círculos grandes son los datos de parcelas de 20 años.



Cuadro 19. Altura dominante a los 20 años ($H100_{20}$) predicho para 11 valores de IIC basado en ENT100; se indica además el Incremento Periódico Anual (IPA) de $H100_{20}$, en plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, Chile.

ENT100 (cm)	$H100_{20}$ (m)	IPA $H100_{20}$ (m)
3,7	12,80	0,64
3,5	12,14	0,61
3,3	11,48	0,57
3,1	10,82	0,54
2,9	10,16	0,51
2,7	9,49	0,48
2,5	8,83	0,44
2,3	8,17	0,41
2,1	7,51	0,38
1,9	6,85	0,34
1,7	6,18	0,31

Como es de esperar, los sitios más productivos no alcanzarían los volúmenes de los sitios más productivos de Neuquén y EE.UU, debido, principalmente, a que las plantaciones de Coyhaique se encuentran a una mayor latitud.

3.4 Ecuaciones de productividad

3.4.1 Ecuación de productividad basada en el área basal

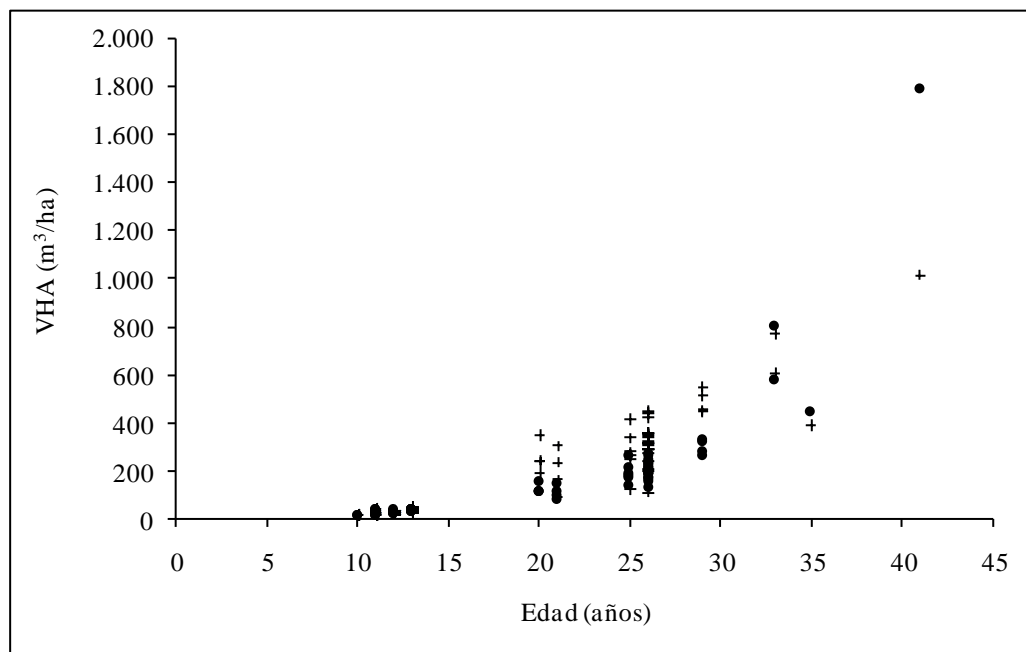
Al igual que en la provincia de Neuquén (Argentina), la longitud o precipitación anual fue incluida dentro del modelo por que explica parte de la variación de productividad.

Los residuales mostraron que no había tendencia cuando eran graficados con los valores estimados, ENT100, edad y ABHA (Apéndice 5), el gráfico de los valores de productividad observados versus los estimados ilustra la buena habilidad predictiva de la ecuación con el set de datos usado a pesar de su moderado error estándar (Figura 11). El modelo final que predice la presente productividad de plantaciones de pino ponderosa sin ralea de la comuna de Coyhaique basada en ABHA tiene a siguiente forma:

$$VHA = e^{24,0796} e^{(1/ENT100)(-0,0519)} e^{(1/E)(-4,0356)} ABHA^{0,3248} e^{-ABHA^2 0,000039} e^{E^2 0,00128} e^{LONG(-0,02922)}$$

$$S_{xy} = 0,3937$$

Figura 11. Gráfico de volumen sin corteza por hectárea observado (cruces) y estimado (puntos) de una ecuación de productividad basada en área basal por hectárea para plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique.



El modelo de productividad basado en ABHA tiene el potencial de acelerar las estimaciones de volumen en terreno, ya que permite eliminar la necesidad de medir la

altura total y diámetros, simplificando la toma de datos en terreno. No obstante se debe seguir estudiando otros factores de transformación de tal forma de disminuir el error estándar encontrado en este modelo. Si bien es cierto que la longitud es una variable significativa, la presencia de microclimas en la comuna hace necesario evaluar más detalladamente la influencia de los otros factores ambientales en esos sectores.

3.4.2 Ecuación de productividad basada en el número de árboles por hectárea

Al igual que en la ecuación anterior, la longitud fue incluida dentro del modelo final. El modelo que predice la productividad en las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique basada en ARBHA es la siguiente:

$$VHA = e^{-4.8295 \cdot (1/ENT100) - 2.832 \cdot (1/E) - 33.2999} \cdot ARBHA^{0.5306} \cdot E^{2.00103} \cdot LONG^{0.1157}$$

$$S_{xy} = 0,002564$$

Los residuales mostraron que no había tendencia cuando fueron graficados con los valores predichos, IIC (ENT100), edad y ARBHA (Apéndice 6). Se espera que el modelo entregue estimaciones precisas entre las edades de de 10 a 30 años ya que 87 de 91 parcelas están en ese rango de edades. Además, representa la característica actual de las plantaciones de pino ponderosa presentes en la comuna de Coyhaique. A pesar de que el error estándar es bajo se recomienda estudiar otros factores de transformación de tal forma de, eventualmente, mejorar el ajuste. Al igual que en el EP1, la presencia de microclimas en la comuna hace necesario evaluar más detalladamente la influencia de los otros factores ambientales en esos sectores.

Las curvas de productividad elaboradas indican que no hay mayores diferencias de productividad entre las diferentes zonas, principalmente a que algunas plantaciones al este de la comuna se encontraban en situaciones de microclimas favorables; no obstante se debe tener presente que a medida que nos desplazamos al este y la situación microclimática es desfavorable la productividad disminuye (Cuadro 12, 13 y 14).

3.4.3 Comparación de productividad con plantaciones no raleadas de pino ponderosa de Neuquén (Argentina), norte de California (EE.UU.) y de la comuna de Coyhaique (Chile)

Al comparar la productividad de estas plantaciones con la productividad de plantaciones de similares características de Neuquén (Argentina) y norte de California (EE.UU.) en rodales de igual densidad y edad y calidad de sitio, se observan valores superiores en las plantaciones de Coyhaique (Cuadro 20); al contrario de lo que pudiese pensarse por hallarse estas plantaciones en la latitudes más altas. La situación se puede explicar por la forma más cilíndrica de los árboles en Coyhaique.

Sobre los 30 años, las diferencias de productividad se incrementan, pudiendo explicarse por la alta densidad de las plantaciones en la comuna de Coyhaique. Además, la alta estimación de productividad podría ser razonable por los altos valores de área basal por hectárea (ABHA) observados en la comuna de Coyhaique, 16 parcelas tienen valores superiores a 80 m²/ha. En el norte de California al máximo que alcanza el ABHA es de aproximadamente

64 m²/ha y en Neuquén algunas parcelas tiene ABHA cercano a 100 m²/ha. Por otra parte, se debe considerar que estas estimaciones son hipotéticas ya que se observaron muy pocas parcelas con edades superiores a 30 años.

Figura 12. Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la Zona 4 Coyhaique (longitud 72,17° W) en la comuna de Coyhaique. Las curvas son indicadas para rodales de 1.600 árboles por ha con seis diferentes IIC.

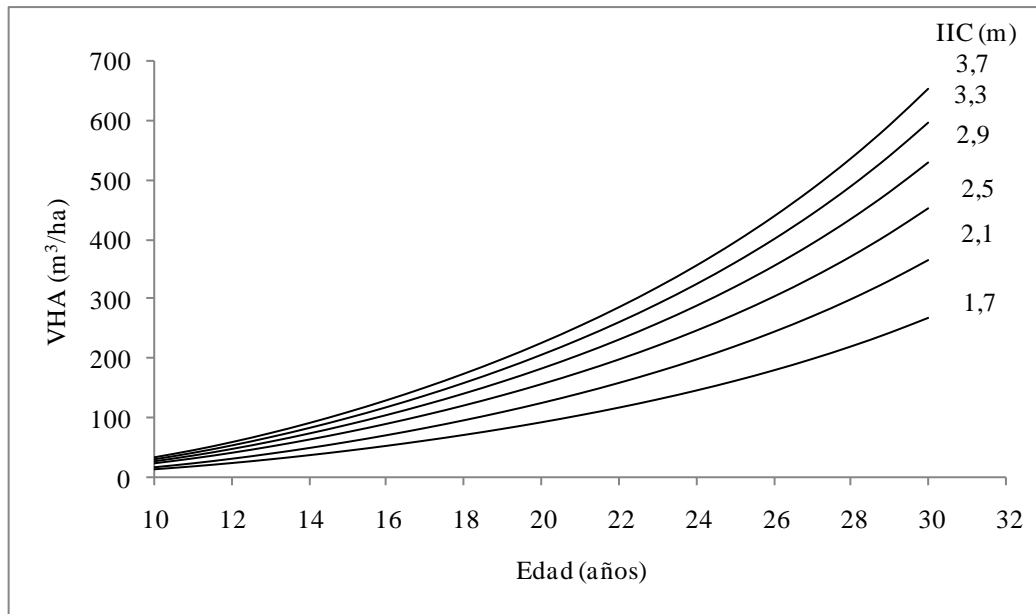


Figura 13. Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la Zona 2 Valle Simpson (longitud 71,75° W) en la comuna de Coyhaique. Las curvas son indicadas para rodales de 1.600 árboles por ha con seis diferentes IIC.

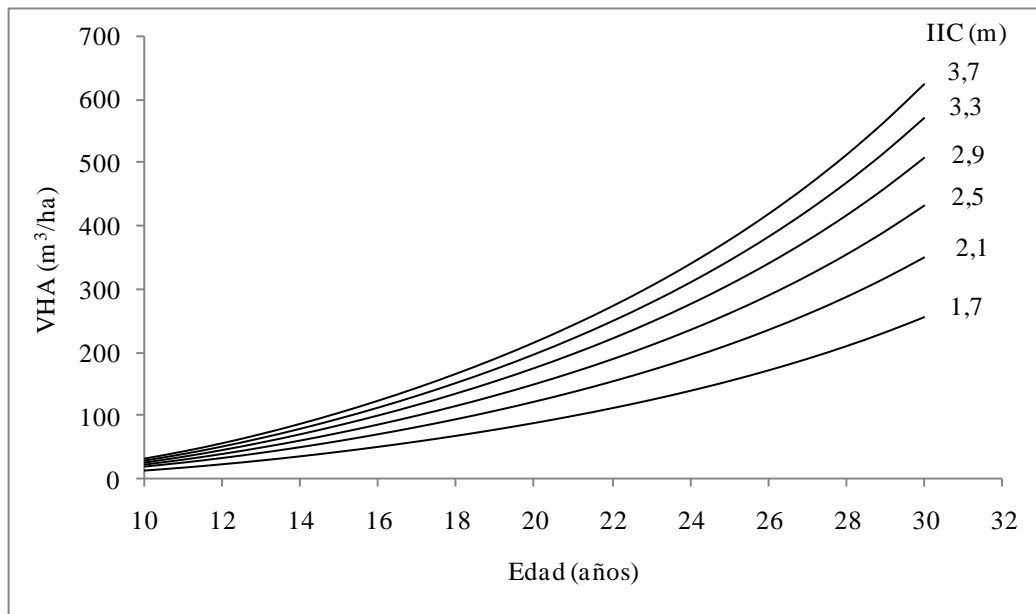
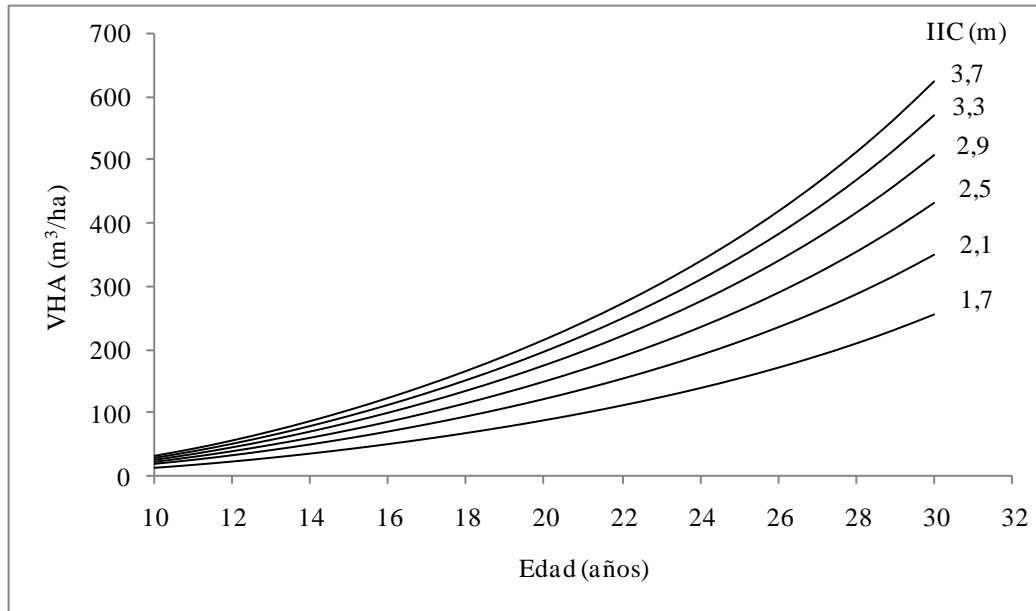


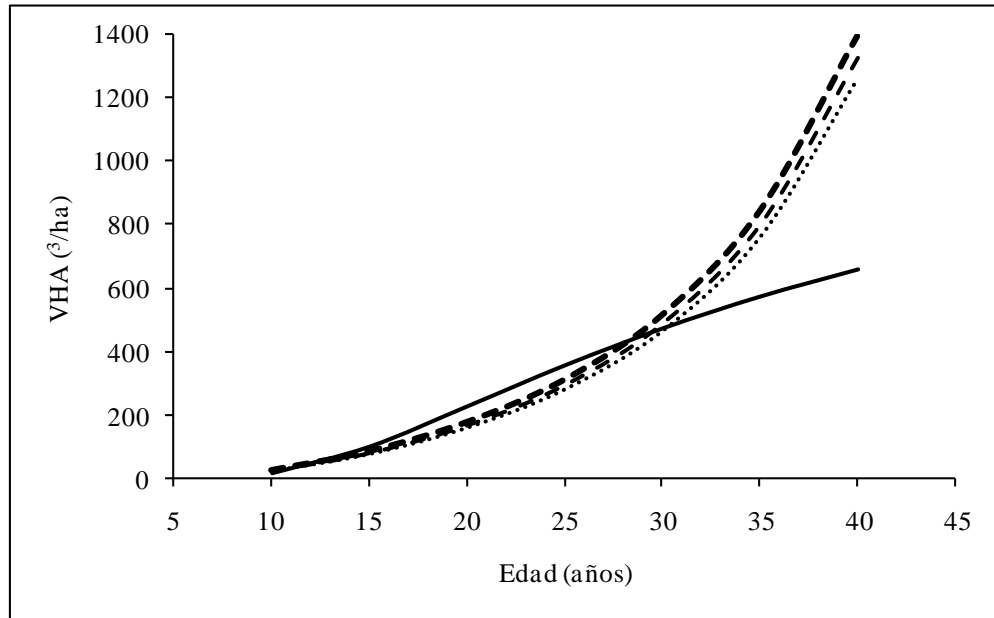
Figura 14. Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la Zona 1 Balmaceda (longitud 71,33° W) en la comuna de Coyhaique. Las curvas son indicadas para rodales de 1.600 árboles por ha con seis diferentes IIC.



Moreno y Obando (2006) elaboraron estimaciones de productividad o rendimiento a partir de ecuaciones en área basal y volumen con ensayos establecidos en el predio Miralejos, a 37 km al norte de la ciudad de Coyhaique, y en la Reserva Nacional Coyhaique, ubicada a 10 km al norte de la misma ciudad. Estos autores estimaron productividad con ARBHA variable, esto es, con una densidad inicial la cual varía con la edad.

Al comparar los valores de productividad de Moreno y Obando (2006) con este estudio, se observa que las estimaciones son bastante similares (Cuadro 21), a pesar que estos autores presentan estimaciones con densidad que varía con la edad. La mayor similitud se aprecia entre los rangos de edades de 10 a 15 años y 25 a 30 años. No obstante las estimaciones por sobre los 30 años son mayores que las calculadas por estos autores (Figura 15).

Figura 15. Curvas de productividad para las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, con densidad inicial de 1.550 arb/ha, IIC de 2,85 m (IS: 10 m). En línea continua la curva de productividad de Moreno y Obando (2006) en seria de líneas discontinuas, las curvas de productividad elaboradas para la Zona 4 COYHAIQUE (guiones largos), Zona 2 VALLE SIMPSON (guiones cortos) y Zona 1 BALMACEDA (puntos).



Cuadro 20. Productividad de las plantaciones de pino ponderosa en el norte de California, EE.UU. (Calif.) (Oliver y Powers, 1978), en el rango este y oeste de los rodales de la provincia de Neuquén, Argentina (Gonda *et al.*, 1998d) y en las Zonas Coyhaique (Coy.), Valle Simpson (V. Simp.) y Balmaceda (Balma.) de la comuna de Coyhaique para tres diferentes densidades y tres calidades de sitios definidos en términos de IIC, entre las edades de 10 a 40 años.

		Productividad (volumen total sin corteza en m ³ /ha)																				
		747 arb/ha						1076 arb/ha						1682 arb/ha								
Calidad de sitio	Edad	Calif.	Neuquén			Comuna de Coyhaique			Calif.	Neuquén			Comuna de Coyhaique			Calif.	Neuquén			Comuna de Coyhaique		
			Este	Oeste	Coy.	V. Simp.	Balma.	Este		Oeste	Coy.	V. Simp.	Balma.	Este	Oeste		Coy.	V. Simp.	Balma.			
IIC: 2,20 m	10	1	4	4	12	11	11	1	5	5	15	14	14	2	6	7	19	18	17			
	15	7	16	19	43	41	39	8	21	24	52	49	47	9	27	32	66	63	60			
	20	23	37	43	89	85	81	25	47	54	108	103	98	27	62	72	137	131	125			
	25	50	66	77	157	149	142	54	83	97	190	181	173	58	110	128	241	230	219			
	30	87	106	124	260	248	236	92	133	155	315	301	286	98	175	205	400	381	363			
	35	130	163	190	426	406	387	138	204	238	517	492	469	145	269	314	655	624	595			
	40	178	246	287	705	672	641	188	308	359	856	816	778	195	406	474	1.085	1.034	986			
IIC: 3,38 m	10	3	10	11	19	18	18	3	12	14	24	22	21	4	16	19	30	28	27			
	15	20	42	49	67	64	61	22	53	62	81	77	74	25	70	82	103	98	94			
	20	66	96	112	140	133	127	71	120	140	170	162	154	76	159	185	215	205	195			
	25	139	170	199	246	234	223	146	214	249	298	284	271	152	282	329	378	360	343			
	30	231	273	318	407	388	370	240	342	399	494	471	449	242	451	526	627	597	569			
	35	333	418	488	667	636	606	341	524	612	810	772	735	340	692	807	1.026	978	932			
	40	440	632	737	1.106	1.054	1.004	445	792	924	1.342	1.279	1.219	437	1.045	1.219	1.701	1.621	1.545			
IIC: 4,16 m	10	11	14	16	23	22	21	12	18	21	28	26	25	14	23	27	35	33	32			
	15	49	61	72	78	75	71	54	77	90	95	91	86	62	102	119	121	115	109			
	20	132	139	162	164	156	148	141	174	203	198	189	180	151	230	268	252	240	228			
	25	244	247	288	288	274	261	252	309	361	349	333	317	257	408	476	442	422	402			
	30	369	395	461	477	454	433	369	495	578	579	551	525	360	654	763	733	699	666			
	35	494	605	706	781	744	709	481	759	886	948	903	860	455	1.002	1.170	1.201	1.144	1.091			
	40	613	915	1.067	1.294	1.233	1.175	584	1.147	1.338	1.570	1.496	1.426	538	1.513	1.766	1.990	1.897	1.807			

La productividad presentada en la tabla está dentro del rango de datos de la comuna de Coyhaique, pero solo fueron establecidas 4 parcelas entre los 31 y 40 años. El valor de IIC de 4,16 m no fue observado en la comuna de Coyhaique, por lo que sus estimaciones de productividad son sólo hipotéticas.

Cuadro 21. Productividad de las plantaciones de pino ponderosa en predio Miralejos (M.) y Reserva Nacional Coyhaique (RN Coy.) (Moreno y Obando, 2006) y en las Zonas Coyhaique (Coy.), Valle Simpson (V. Simp.) y Balmaceda (Balma.), todas de la comuna de Coyhaique; para tres diferentes densidades y cuatro calidades de sitios definidos en términos de IIC, entre las edades de 10 a 40 años.

Calidad de sitio	Edad	Productividad (volumen total sin corteza en m ³ /ha)											
		1550 arb/ha				1115 arb/ha				820 arb/ha			
		M. y RN Coy.	Coy.	V. Simp.	Balma.	M. y RN Coy.	Coy.	V. Simp.	Balma.	M. y RN Coy.	Coy.	V. Simp.	Balma.
IIC: 2,25 m	10	3,1	18,8	17,9	17,0	3,0	15,8	15,0	14,3	2,8	13,4	12,8	12,2
	15	52,4	64,8	61,7	58,8	46,1	54,4	51,8	49,4	29,2	46,2	44,0	42,0
	20	149,9	135,1	128,8	122,7	128,6	113,5	108,1	103,0	93,9	96,4	91,9	87,5
	25	259,9	237,7	226,5	215,9	220,3	199,6	190,2	181,2	183,7	169,6	161,6	154,0
	30	364,2	394,0	375,4	357,8	306,3	330,8	315,2	300,4	253,4	281,0	267,8	255,2
	35	456,9	645,2	614,9	585,9	382,3	541,8	516,3	492,0	314,6	460,3	438,6	418,0
	40	537,1	1069,4	1019,0	971,1	447,9	897,9	855,6	815,3	367,1	762,8	726,9	692,7
IIC: 2,85 m	10	12,6	24,5	23,3	22,2	11,5	20,5	19,6	18,7	10,3	17,5	16,6	15,8
	15	97,3	84,4	80,5	76,7	84,1	70,9	67,6	64,4	71,6	60,2	57,4	54,7
	20	225,4	176,1	167,9	160,0	191,2	147,9	140,9	134,3	159,7	125,6	119,7	114,1
	25	355,8	309,8	295,3	281,4	299,1	260,2	247,9	236,2	247,4	221,0	210,6	200,7
	30	473,2	513,5	489,4	466,3	395,7	431,2	410,9	391,5	325,3	366,3	349,1	332,6
	35	574,5	841,0	801,4	763,7	478,6	706,2	672,9	641,2	391,9	599,9	571,7	544,8
	40	660,6	1393,8	1328,2	1265,7	548,8	1170,3	1115,2	1062,7	448,0	994,2	947,4	902,8
IIC: 3,46 m	10	--	29,2	27,8	26,5	--	24,5	23,3	22,2	--	20,8	19,8	18,9
	15	--	100,6	95,9	91,4	--	84,5	80,5	76,7	--	71,8	68,4	65,2
	20	--	209,9	200,0	190,6	--	176,2	167,9	160,0	--	149,7	142,7	135,9
	25	--	369,2	351,8	335,2	--	310,0	295,4	281,5	--	263,3	250,9	239,1
	30	--	611,8	583,1	555,6	--	513,7	489,6	466,5	--	436,4	415,9	396,3
	35	--	1002,1	954,9	909,9	--	841,4	801,8	764,0	--	714,8	681,1	649,1
	40	--	1660,7	1582,5	1508,0	--	1394,4	1328,7	1266,2	--	1184,6	1128,8	1075,7
IIC: 4,06 m	10	49,0	32,9	31,4	29,9	42,5	27,6	26,3	25,1	36,4	23,5	22,4	21,3
	15	203,5	113,5	108,2	103,1	172,3	95,3	90,8	86,6	143,6	81,0	77,2	73,5
	20	386,0	236,9	225,7	215,1	323,6	198,9	189,5	180,6	266,8	169,0	161,0	153,4
	25	554,2	416,6	397,0	378,3	462,0	349,8	333,4	317,7	378,7	297,2	283,2	269,9
	30	697,8	690,5	658,0	627,0	579,8	579,8	552,5	526,5	473,5	492,6	469,4	447,3
	35	817,8	1130,9	1077,7	1026,9	677,9	949,5	904,9	862,3	552,1	806,7	768,7	732,5
	40	917,3	1874,2	1786,0	1701,9	759,1	1573,7	1499,6	1429,0	617,1	1336,9	1274,0	1214,0

La productividad presentada en la tabla está dentro del rango de datos de la comuna de Coyhaique, pero solo fueron establecidas 4 parcelas entre los 31 y 40 años. El valor de IIC de 3,46 no estaba presente en Moreno y Obando (2006). El valor de IC de 4,06 m no fue observado en la comuna de Coyhaique por lo que sus estimaciones de productividad son sólo hipotéticas.

4. CONCLUSIONES

4.1 Ecuaciones H-D

La EHD3 es el modelo recomendado para ajustar ecuaciones H-D de plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, cuando la altura es una submuestra en algún inventario. Fue la que convergió más eficientemente que las otras tres ecuaciones no lineales ajustadas (EHD4, EHD5 y EHD6) y fue la más flexible al compararse con los dos modelos lineales probados (EHD1 y EHD2). No obstante, en futuros estudios se pueden probar otros coeficientes iniciales en los modelos no lineales.

La ecuación seleccionada podría predecir con bastante certeza H en rodales con DAP entre 5 y 40 cm, por la poca cantidad de datos con DAPs superiores, se desconoce como funcionaría el modelo propuesto.

La ecuación recomendada se debe aplicar con datos a nivel de rodal, no obstante se puede “regionalizar” incluyendo dentro del modelo algunas variables como altura y diámetro de los árboles dominantes (Gonda *et al.*, 2004).

4.2 Ecuaciones de volumen

De acuerdo a lo discutido, la EV4 se recomienda para estimar volumen en plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique. A pesar de tener un error estándar muy levemente mayor que las ecuaciones polinómicas (EV7 y EV8) y no lineal (EV6), es preferible por su sencillez, ya que no precisa de más términos dentro de la ecuación para mejorar significativamente las estimaciones.

Cuando no se dispone del dato de H se recomienda la EV3 para estimar volumen en plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique.

Las estimaciones para DAPs superiores a 40 cm no son recomendadas, ya que no se muestrearon árboles con esas medidas.

4.3 Determinación de calidad de sitio

Los resultados de este estudio sugieren que es posible usar el método de Intercepción del Crecimiento para estimar altura dominante a los 20 años, así como estimador de calidad de sitio. Su fácil y económica aplicación lo hace altamente atractivo, cuando se quiere estimar calidad de sitio, en especial en rodales jóvenes, como es la gran mayoría de las plantaciones de pino ponderosa en Coyhaique.

Se recomienda realizar más estudios de tal manera de observar si el método IC puede lograr mejores estimaciones midiendo tres, seis o siete entrenudos por sobre el DAP.

El modelo para estimar IIC fue desarrollado con datos de rodales sin raleo y que no tuvieron ninguna preparación de sitio. Además, se recomienda aplicar el método para estimar calidad de sitio a partir de rodales de 11 años, ya que muchas plantaciones de 10 años no alcanzaban a tener cinco entrenudos por sobre el DAP.

4.4 Ecuaciones de productividad

Los modelos de productividad pueden predecir satisfactoriamente el volumen de un rodal de plantaciones no raleadas de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, entre las edades de 10 a 30 años.

En ambas ecuaciones la longitud resultó ser la característica medioambiental que explica la variación de productividad en la comuna de Coyhaique, debido al gradiente oeste-este de la precipitación anual por la presencia de la cordillera de los Andes. No obstante se debería realizar estudios para determinar con mayor certeza el efecto de los otros factores medioambientales debido a la presencia de microclimas en la comuna.

La EP1, basada en ABHA, mediante futuros estudios puede mejorar su ajuste utilizando otros coeficientes iniciales en la rutina de ajuste no lineal, no obstante permite acelerar la estimación de volumen de inventarios.

La productividad de las plantaciones de pino ponderosa de la comuna de Coyhaique, estimada con la EP2, son mayores que las ubicadas en la provincia de Neuquén (Argentina) y con las del norte de California (EE.UU.) a la misma edad, calidad de sitio y densidad, explicado al parecer por la forma cilíndrica de los árboles en la comuna de Coyhaique.

Lo anterior se comprobó al comparar los resultados de productividad de este estudio con los resultados presentados recientemente por Moreno y Obando (2006), los cuales presentan resultados similares entre los rangos de edades de 10 a 30 años.

BIBLIOGRAFÍA

ALBAN, D. 1972. An improved growth intercept method for estimating site index of red pine. EE.UU. USDA Forest Service. North Central Station. Research Paper NC-80. 7 p.

ALBAN, D. 1979. Estimating site potential from the early height growth of red pine in the Lake States. EE.UU. USDA Forest Service. North Central Station. Research Paper NC-166. 7 p.

ANDENMATTEN, E.; REY, M. y LETOURNEAU, F. 1995. Pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws). Tabla de volumen estándar de aplicación en la región andina de Río Negro y Chubut. En: IV Jornadas Forestales Patagónicas. San Martín de los Andes, Neuquén, Argentina. pp.266-271.

ANDENMATTEN, E. y LETORNEAU, F. 1997. Funciones de intercepción de crecimiento para predicción de índice de sitio en pino ponderosa de aplicación en la región andino patagónica de Río Negro y Chubut, Argentina. Quebracho. (5):5-9.

ANDENMATTEN, E. y LETOURNEAU, F. 1998. Estimación de alturas para su empleo en tablas de volumen de árbol individual. Quebracho. (6):27-34.

BASKERVILLE, G. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plan biomass. Canadian Journal of Forest Research. (2):49-53.

BECK, D. 1971. Growth intercept as an indicator of site index in natural stands of white pine in the Southern Appalachians. EE.UU. USDA Forest Service. Southern Station. Research Note SE-154. 6 p.

BELL, J.; MARSHALL, D. y JOHNSON, G. 1981. Tariff tables for mountain hemlock developed from an equations of total stem cubic-foot volume. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. School of Forestry. Forest Research Laboratory. Research Bulletin 35. 46 p.

BROWN, J. y STIRES, J 1981. A modified growth intercept method for predicting site index in young white pine stands. Forest Science. (27):162-166.

BURDON, R.; MILLER, J. y KNOWLES, F. 1991. Introduced forest trees in New Zealand: Recognition, role, and seed source, Ponderosa and Jeffrey Pines. EE. UU. Forest Research Institute. FRI Bulletin N° 124. 23 p.

BURKHART, H. 1977. Cubic-foot volumen of loblolly pine to any merchantable top limit. Southern Journal of Applied Forestry. (1):7-9.

CAILLIEZ, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma. Vol 22/1: Estimación del volumen. Estudio FAO Montes. 92 p.

CAO, Q.; BURKHART, H. y MAX, T. 1980. Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. Forest Science. (26):71-80.

CASANOVA, J. 2002. Función de volumen para la especie pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.) en la Cordillera de Los Andes, IX Región. Tesis (Título de Ingeniero Forestal). Temuco, Chile. Universidad Mayor, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 68 p.

CIREN. 2005. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Estudio agrológico XI región. Centro de Investigación de Recursos Naturales. Santiago. Publicación CIREN N° 130. 125 p.

CHAPMAN, R.; BALDWIN, V. y CLAUSNITZER, R. 1982. Cubic-foot volume, bole green weight and total above ground green weight of small diameter lodgepole pine, larch, ponderosa pine and Douglas-fir in Northeastern Washington. Pullman, Washington, EE.UU. Agricultural Research Center. Research Bulletin XB 0914. 7 p.

CFI-FUNDFEAEP, 2007. Inventario del bosque implantado de la provincia de Neuquén. Buenos Aires. Argentina. Consejo Federal de Inversiones. 109 p.

COCHRAN, P. 1985. Site index, height growth, normal yields, and stocking for larch in Oregon and Washington. Portland, Oregon. EE.UU. USDA Forest Service. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. Research Note PNW-424. 24 p.

CORVALÁN, P. y HERNÁNDEZ, J. 2006. El Sitio. La Pintana, Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo de Recursos Forestales. Documento de la Cátedra de Dasometría. 9 p.

CURTIS, R. 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. Forest Science. (13):265-375.

DAY, M.; BEY, C. y RUDOLPH, V. 1960. Site index for planted red pine by the 5-year growth intercept method. Journal of Forestry. (58):198-202.

DOLPH, L.; MORI, S. y OLIVER, W. 1995. Height-Diameter relationships for conifer species on the Blacks Mountain Experimental Forest. Albany, California, EE.UU. USDA Forest Service. PSW Research Station. Research Note 418. 5 p.

ECONOMOU, A. 1960. Growth intercept as an indicator of site quality for planted and natural stands of *Pinus nigra* var. *pallasiana* in Greece. Forest Ecology and Management. (32):103-115.

ENRICCI, R.; PASQUINI, N.; PICCO, O. y MONDINO, V. 2000. Ensayos de procedencia de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. en la Patagonia de los Andes de Argentina. [en línea] Recursos Genéticos Forestales (28) <<http://www.fao.org/docrep/008/x9662s/X9662S07.htm>> [consulta: 30 marzo 2009]

FERREE, M.; SHEARER, T. y STONE, J. 1958. A method of evaluating site quality in young red pine plantations. Journal of Forestry. (56):328-332.

FERREIRA, O. 1993. Fórmulas, funciones y tablas usadas en medición forestal. Siguatepeque. Honduras. Escuela Nacional de Ciencias Forestales (ESNACIFOR). Proyecto CAFOR.

FLEWELLING, J y PIENAAR, L. 1981. Multiplicative regresión with lognormal errors. Forest Science. 27(4):337-341.

GÁNDARA, E. 1978. Comportamiento de tres especies de coníferas en la XI región, Aysén. Memoria (Título de Ingeniero Forestal). La Pintana, Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 78 p.

GARMAN, S.; ACKER, S.; OHMANN, J. y SPIES, T. 1995. Asymptotic height-diameter equations for twenty-four tree species in Western Oregon. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. School of Forestry. Forest Research Laboratory. Research Contribution 10. 22 p.

GILABERT, H y PETERS, R. 1997. Modelos de crecimiento y rendimiento para plantaciones de pino oregón y pino ponderosa en la XI región de Chile. En: Modelling growth of fast-grown tree species. Proceedings. IUFRO Conference. 5-7 Septiembre 1997, Valdivia, Chile. pp. 10-18.

GONDA, H.; MAGUIRE, D.; CORTÉS, G. y TESCH, S. 1998a. Stand-level height-diameter equations four young ponderosa pine plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. A comparison with equations developed in the western United States. pp. 20-49. Capítulo II. En: Tesis doctoral de H. Gonda: Height-diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length Site Quality Indicators, and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Oregon, EE.UU. Oregon State University. 198 p.

GONDA, H.; MARSHALL, D.; CORTÉS, G. y TESCH, S. 1998b. Tree volume equations for unthinned young-growth ponderosa pine plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. A comparison with equations developed in the western United States. pp. 50-82. Capítulo III. En: Tesis doctoral de H. Gonda: Height-diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length Site Quality Indicators, and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Oregon, EE.UU. Oregon State University. 198 p.

GONDA, H.; TESCH, S.; MARSHALL, D. y CORTÉS, G. 1998c. A growth intercept index for unthinned young-growth ponderosa pine plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. pp. 83-119. Capítulo IV. En: Tesis doctoral de H. Gonda: Height-diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length Site Quality Indicators, and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Oregon, EE.UU. Oregon State University. 198 p.

GONDA, H.; TESCH, S.; MARSHALL, D. y CORTÉS, G. 1998d. Variable-density yield equations for unthinned young-growth ponderosa pine plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. pp. 145-172. Capítulo VI. En: Tesis doctoral de H. Gonda: Height-diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length Site Quality Indicators, and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Oregon, EE.UU. Oregon State University. 198 p.

GONDA, H. y CORTÉS, G. 2001. Ecuaciones para el Manejo de las Plantaciones de Pino Ponderosa en Neuquén. Esquel. Argentina. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico. Publicación Técnica N° 30. 24 p.

GONDA, H.; MAGUIRE, D.; CORTÉS, G. y TESCH, S. 2004. Stand-level height-diameter equations for young ponderosa pine plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina: Evaluating applications of equations developed in western United States. Western Journal Applications Forestry. 19(3):202-210.

GREGORY, R. 1960. Estimating site index in sapling and pole stands in southeast Alaska. EE.UU. USDA Forest Service. Alaska Forest Research Center. Technical Note 48. 3 p.

GUNTER, J. 1968. Site index for released red pine plantations by the modified growth intercept method. Journal of Forestry. (66):862-863.

HANUS, M.; HANN, D. y MARSHALL, D. 1999a. Height-diameter equations for six species in the Coastal Regions of the Pacific Northwest. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. Forest Research Laboratory. Research Contribution 25. 11 p.

HANUS, M.; HANN, D. y MARSHALL, D. 1999b. Predicting height for undamaged and damaged trees in southwest Oregon. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. Forest Research Laboratory. Research Contribution 27. 21 p.

HOWARD, J. 2003. Pinus ponderosa var. scopulorum. [en línea] Fire Effects Information System. USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Fire Sciences Laboratory Online document <<http://www.fs.fed/us/database/feis/plants/tree/pinpons/introductory.html>> [Consulta: 30 de marzo 2009].

HUANG, S.; TITUS, S. y WIENS, D. 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. Canadian Journal of Forest Research. (22):1297-1304.

HUSCH, B.; MILLER, C. y BEERS, T. 1972. Forest Mensuration. New York. EE.UU. Ed. Ronald Press. 410 p.

INFOR. 1994. Proyecto investigación y desarrollo. Plantaciones forestales industriales. XI región de Aysén. Zonificación del área de estudio. Coyhaique, Chile. Instituto Forestal/Fondo Fomento Desarrollo Científico Tecnológico. 20 p.

INFOR-INFORA. [s.a.]. Ajuste y prueba de modelos fustales y de volumen para pino oregón y pino ponderosa en la provincia de Coyhaique. Coyhaique, Chile. 28 p.

LARSEN, D. y HANN, D. 1987. Height-diameter equations for seventeen tree species in southwest Oregon. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. School of Forestry. Forest Research Laboratory. Research Paper 49. 16 p.

MACLEAN, C. y BERGER, J. 1976. Softwood tree volume equations for a major California species. Portland, Oregon, EE.UU. USDA Forest Service. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. Research Note. PNW-266. 34 p.

McDONALD, P. y SKINNER, C. 1989. Local volume tables for young-growth conifers on a high quality site in the northern Sierra Nevada. Berkeley. California, EE.UU. USDA Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Research Note. PSW-341. 7 p.

MEISENBACH, I. y HOLZMAN, B. 2005. The Biogeography of the Ponderosa Pine (*Pinus ponderosa*). [en línea] Proyecto final de Biogeografía de la cátedra de Geografía 316: Biogeografía. San Francisco, EE.UU. San Francisco State University <<http://bss.sfsu.edu/holzman/courses/Spring%2005%20projects/PonderosaPine/PonderosaPine.htm>> [Consulta: 30 de Marzo 2009].

MORALES, R.; CANALA-ECHEVERRIA, J. 1996. Estudio de raleo y poda en plantaciones de *Pinus ponderosa*, XI región de Aysén (resultados preliminares). En: Ciencia e Investigación Forestal 10(2):249-263.

MORENO, P. y OBANDO, M. 2006. Pino ponderosa en Aysén, biometría y genética. Chile. Proyecto Bases genéticas y biométricas de pino ponderosa en la XI región. Instituto Forestal. 192 p.

MOORE, J.; ZHANG, L. y STUCK, D. 1996. Height-diameter equations for ten tree species in inland northwest. Western Journal of Applied Forestry. (11):132-137.

NIGH, G. 1995. Variable growth models for Lodgepole pine in the Sub-boreal Spruce Biogeoclimatic Zone, British Columbia. Victoria, British Columbia, Canada. Ministry of Forest Research Program. Research Report 02. 22 p.

OLIVER, W. 1972. Height intercept for estimating site index in young ponderosa pine plantations and natural stands. Berkeley. California, EE.UU. USDA Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Research Note 276. 4 p.

OLIVER, W. y POWERS, R. 1978. Growth models for ponderosa pine: I. Yield of unthinned plantations in northern California. Berkeley. California, EE.UU. USDA Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Research Paper. PSW-133. 21 p.

OLIVER, W. y RYKER, R. 2005. *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. Ponderosa pine. [en línea] Silvics of North America Vol 1: Conifers. USDA Forest Service.

<http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/Volume_1/pinus/ponderosa.htm>
[Consulta: 30 de marzo 2009].

POWERS, R. y OLIVER, W. 1978. Site classification of ponderosa pine stands under stocking control in California. Berkeley, California, EE.UU. USDA Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Research Paper PSW-128. 9 p.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F. y REAL, P. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y educación en desarrollo sostenible. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GMBH. 586 p.

QUIROZ, I. y ROJAS, Y. 2004. Pino ponderosa y pino oregón, coníferas para el sur de Chile. Valdivia, Chile. Instituto Forestal, Sede Los Lagos. 302 p.

RICHARDS, N; MORROW, R y STONE, E. 1962. Influence of soil and site on red pine plantations in New York. Ithaca. New York, EE.UU. Cornell University, Agr. Exp. Sta. Bulletin 977. 24 p.

RODRÍGUEZ, C. 1994. Forestación de pino oregón, pino ponderosa y pino contorta en la XI región. En: Tercer Taller Silvícola. Diversificación y silvicultura, nuevas experiencias. Concepción, Chile. Fundación Chile - Grupo Silvícola – Corporación Nacional Forestal. pp 23-28.

SANHUEZA, O. 1998. Evaluación de un ensayo de procedencias de *Pinus ponderosa* Laws. en el sector de Río Claro, XI región. Tesis (Título de Ingeniero Forestal). Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 62 p.

SCHALLAU, C. y MILLER, W. 1966. Intercept index equations for red pine damaged by European pine shoot moth. Journal of Forestry. (64):538-540.

SMITH, J. y KER, J. 1956. Some problems and approaches in classification of site in juvenile stands of Douglas-fir. Forestry Chronicle. (32):417-428.

SMITH, J.; KER, J. y HEGER, L. 1960. Natural and conventional height-age curves for Douglas-fir and some limits to their refinement. En: Fifth World Forestry Congress Proceedings. 1960. Vol 1. pp. 546-551.

VANCLAY, J. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. Wallingford, Oxon. UK. Ed. CAB International. 312 p.

WAKELEY, P. 1954. The growth intercept method of site classification. Proc. En: Third Annual Forestry Symposium. Louisiana State University. School of Forestry. Baton Rouge, EE.UU. 1954. pp. 32-33.

WAKELEY, P y MARRERO, J. 1958. Five-year intercept method as site index in southern pine plantations. Journal of Forestry. (56):332-336.

WALTERS, D.; HANN, D. y CLYDE, M. 1985. Equations and tables predicting gross total stem volumes in cubic feet for six major conifers of southwest Oregon. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. School of Forestry. Forest Research Laboratory. Research Bulletin 50. 37 p.

WALTERS, D. y HANN, D. 1986. Predicting merchantable volume in cubic feet to a variable top and in Scribner board feet to a 6-inch top for six major conifers of Southwest Oregon. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. School of Forestry. Forest Research Laboratory. Research Bulletin 52. 107 p.

WANG, C. y HANN, D. 1988. Height-diameter equations for sixteen tree species in the central western Willamette Valley of Oregon. Corvallis, EE.UU. Oregon State University. Forest Research Laboratory. Research Paper 51. 7 p.

WARRACK, G. y FRASER, A. 1955. Estimation of site quality in juvenile Douglas-fir stands. Canada. British Columbia Forest Service. Research Note 28. 5 p.

WIER, S. 1998. The ponderosa pine of the Southern Rocky Mountains. [en línea] The native trees of the Southern Rocky Mountains from Yellowstone to Santa Fe <http://home.earthlink.net/~swier/PonderosaPine.html> [Consulta: 30 de marzo 2009].

WILDE, S. 1964. Relationship between the height growth, the 5-year intercept, and site conditions of red pine plantations. Journal of Forestry. (62):245-248.

APÉNDICES

- Apéndice 1** Error estándar de los seis modelos H-D ajustados por parcela.
- Apéndice 2** Gráficos de dispersión de datos H-D y líneas de regresión basadas en la EHD2 y EHD3, y gráficos de residuales de ambas ecuaciones de parcelas de diferentes diámetros identificadas con diámetro cuadrático medio (DCM).
- Apéndice 3** Gráficos de residuales de los tres modelos de EV local (EV1, EV2 y EV3) y de los cinco modelos de EV regional (EV4, EV5, EV6, EV7 y EV8).
- Apéndice 4** Gráficos de dispersión de datos de volumen observado y líneas de regresión basados en los cinco modelos de EV regional.
- Apéndice 5** Gráficos de residuales vs. VHA estimado, ENT100, Edad y ABHA de la EP1.
- Apéndice 6** Gráficos de residuales vs. VHA estimado, ENT100, Edad y ABHA de la EP2.

APÉNDICE 1

ERROR ESTÁNDAR DE LOS SEIS MODELOS H-D AJUSTADOS POR PARCELA

EHD1: $H = \beta_0 + \beta_1 \text{LogDAP}$

EHD2: $\text{Log}[H - 1,3] = \beta_0 + \beta_1 \text{LogDAP}$

EHD3: $H = 1,3 + e^{\left(\beta_0 + \left(\frac{\beta_1}{\text{DAP} + 2,54}\right)\right)}$

EHD4: $H = 1,3 + e^{(\beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^{\beta_2})}$

EHD5: $H = 1,3 + \beta_0 e^{(\beta_1 \text{DAP}^{\beta_2})}$

EHD6: $H = 1,3 + \beta_0 [1 - e^{-\beta_1 \text{DAP}}]^{\beta_2}$

Donde: H = altura total

DAP = diámetro a la altura del pecho

β_0, β_1 y β_2 = coeficientes.

P	EHD1	EHD2	EHD3	EHD4	EHD5	EHD6
1	0,319	0,277	0,332	0,338	0,338	0,340
2	0,465	0,116	0,308	0,316	0,316	0,318
3	0,351	0,073	0,325	0,654*	0,360*	0,317
4	0,229	0,051	0,198	0,197	0,205*	0,191
5	0,382	0,130	0,309	0,633*	0,355*	0,638*
6	0,172	0,112	0,171	0,174	0,174	0,170
7	0,147	0,072	0,127	0,134*	0,347*	0,443
8	0,284	0,159	0,194	0,193	0,193	0,192
9	0,270	0,195	0,233	0,235	0,235	0,235
10	0,389	0,053	0,306	0,312	0,322*	0,840*
11	0,407	0,237	0,338	0,353	0,353	0,992*
12	0,375	0,180	0,382	0,385	0,385	0,390
13	0,592	0,100	0,504	0,630*	0,543*	0,458
14	0,259	0,061	0,252	0,259	0,259	0,250
15	0,432	0,077	0,336	0,1501*	0,398*	0,289
16	0,281	0,052	0,283	0,293	0,293	0,771
17	0,259	0,033	0,240	0,242	0,242	0,935
18	0,224	0,080	0,184	0,194	0,194	0,768
19	0,360	0,046	0,543	0,491*	0,398*	0,767
20	0,318	0,047	0,230	0,820*	0,329*	0,957
21	0,439	0,074	0,339	0,360	0,360	0,928
22	0,852	0,083	0,836	0,830	0,830	0,840
23	0,925	0,057	0,928	0,964	0,964	0,930

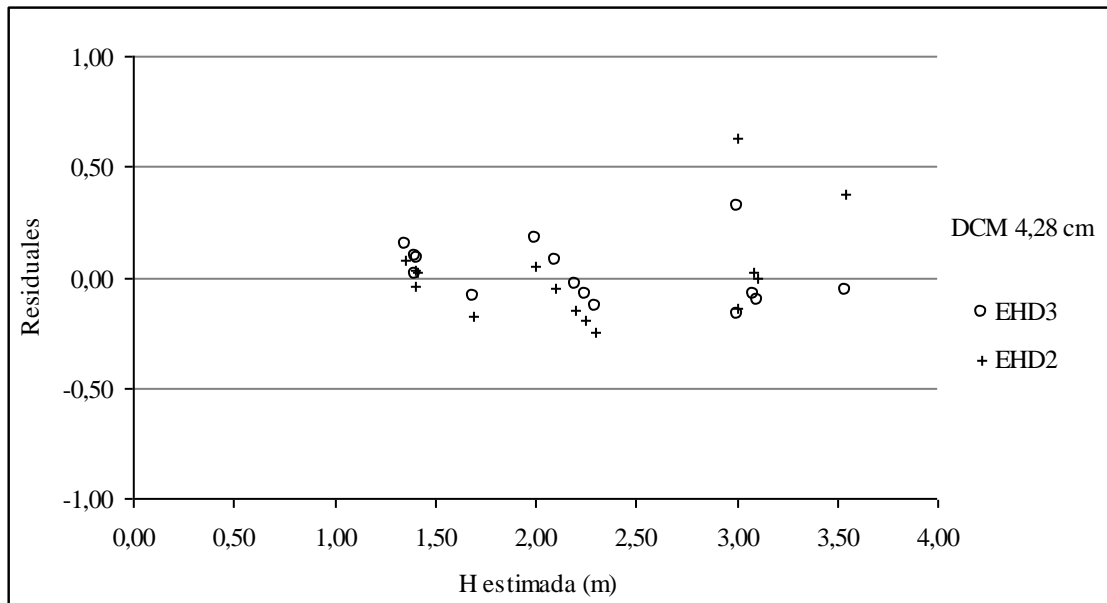
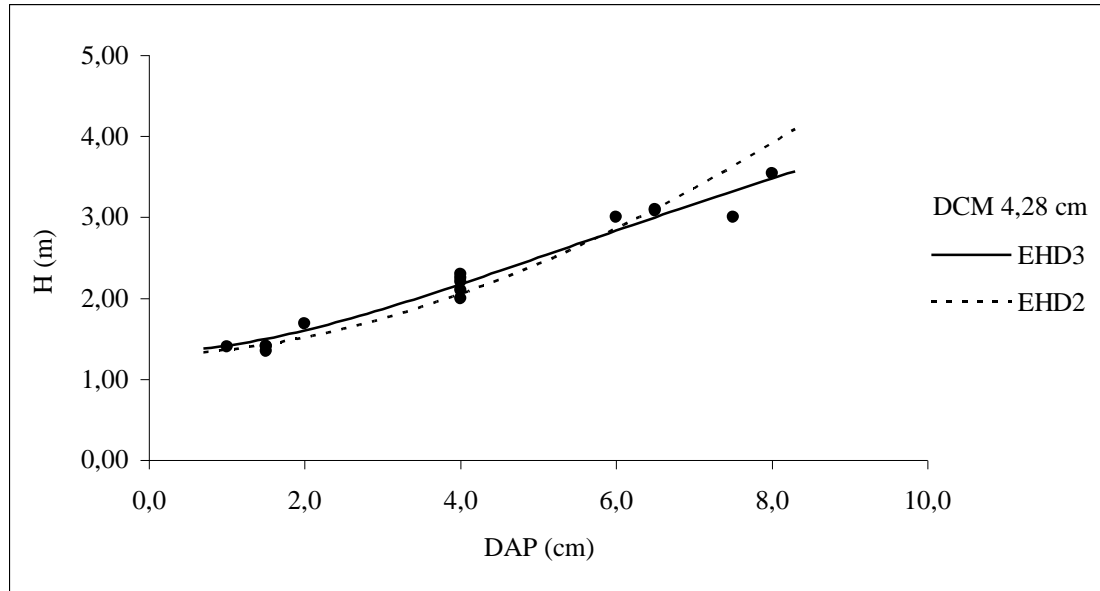
24	0,945	0,064	0,908	0,864	0,864	0,894
25	0,603	0,046	0,618	5,518*	0,933*	0,582
26	0,666	0,033	0,689	0,912*	0,594*	1,501*
27	0,830	0,045	0,817	0,832	0,832	0,833
28	0,668	0,047	0,636	0,621	1,397*	0,603
29	0,849	0,046	0,832	0,849	1,061	0,845
30	1,230	0,060	1,253	1,468*	1,785*	1,378
31	0,845	0,047	0,868	1,296*	1,419	0,816
32	0,752	0,035	0,806	8,551*	1,237	1,237
33	0,691	0,038	0,692	0,718	0,718	0,743
34	1,186	0,059	1,167	1,196	1,196	1,233
35	0,666	0,031	0,676	0,691	0,691	1,327
36	0,754	0,032	0,783	4,835*	3,489*	1,180
37	1,258	0,051	1,269	1,308	1,729*	1,885
38	0,748	0,037	0,764	24,916*	0,974	0,974
39	1,049	0,048	1,041	1,077	1,077	1,233
40	0,890	0,040	0,883	0,915	0,915	2.343*
41	0,909	0,040	0,931	1,452*	3,618*	1,736
42	1,309	0,057	1,336	4,847*	3,331*	1,769
43	1,048	0,067	1,040	1,038	1,309	1,309
44	1,071	0,052	1,064	1,086	1,692*	1,193
45	0,829	0,034	0,879	10,247*	4,433*	1,333
46	1,006	0,057	1,012	8,158*	1,337	1,001
47	0,991	0,035	0,997	1,032	1,032	1,850
48	1,428	0,060	1,443	11,459*	7,433*	5,112*
49	1,530	0,059	1,555	16,420*	1,529	2,361
50	0,770	0,070	0,773	0,753	0,753	0,760
51	0,952	0,037	0,983	32,955*	1,551*	1,454
52	0,924	0,032	0,984	11,912*	0,746	1,671
53	1,277	0,065	1,302	1,327	3,311*	4,396*
54	0,579	0,019	0,574	0,597	0,597	1,108
55	1,506	0,086	1,493	5,802*	2,817*	2,298*
56	0,881	0,028	0,896	1,563*	0,914	1,499
57	1,394	0,038	1,422	11,362*	10,344*	2,345
58	0,720	0,052	0,713	0,722	0,722	0,726
59	1,024	0,078	0,985	1,041	1,041	0,994
60	1,217	0,075	1,214	1,262	1,262	1,761*
61	0,761	0,032	0,748	0,752	1,103	1,103
62	1,519	0,080	1,543	5,341*	2,234*	2,098*
63	0,247	0,165	0,140	0,137	0,137	0,634*
64	0,245	0,105	0,241	0,244	0,244	0,246
65	0,215	0,203	0,156	0,394	0,377*	0,533*
66	0,303	0,089	0,242	0,851*	0,272*	0,578*
67	0,222	0,181	0,181	0,177	0,177	0,181
68	0,197	0,249	0,142	0,133	0,133	0,136
69	0,509	0,072	0,496	0,515	0,515	1,201
70	0,564	0,081	0,563	1,964*	0,608*	1,090
71	0,245	0,045	0,238	0,248	0,248	0,886
72	0,325	0,069	0,288	0,299	0,299	0,712*
73	0,209	0,054	0,207	0,214	0,214	0,598

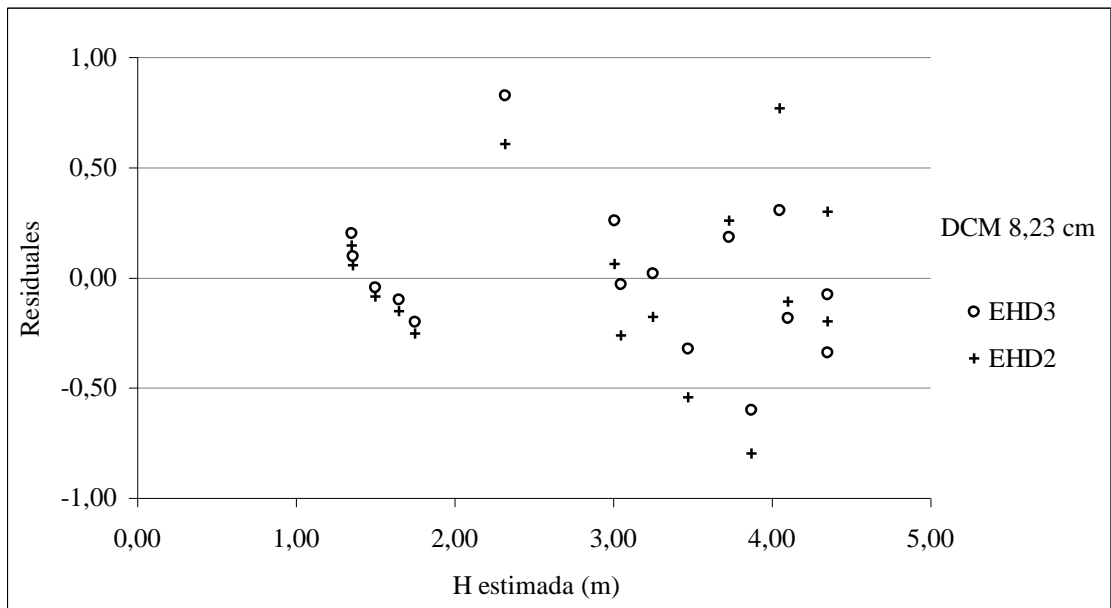
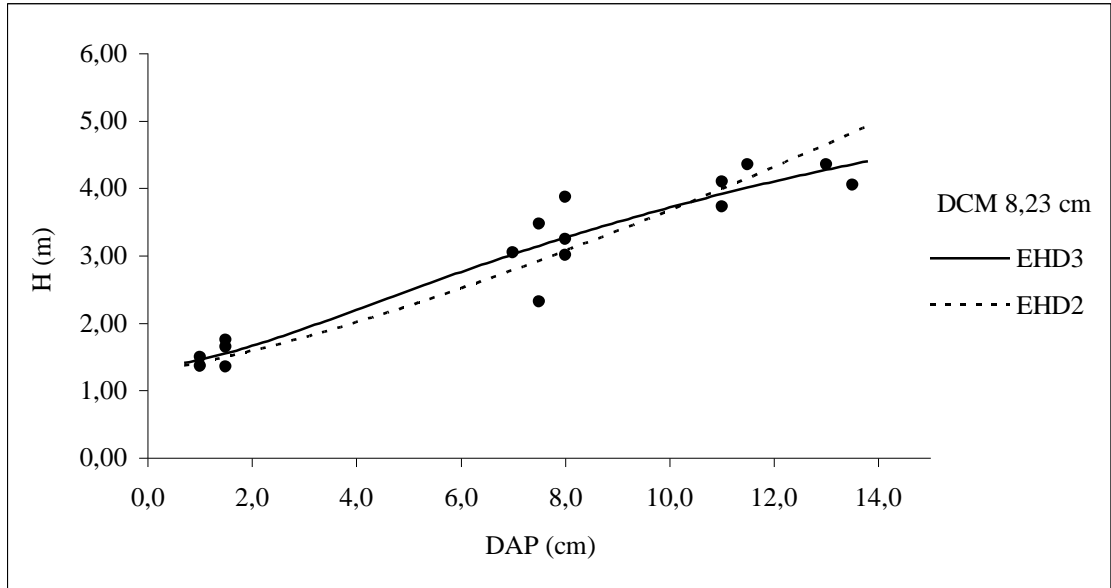
74	0,300	0,149	0,199	0,199	0,591*	0,559*
75	0,403	0,074	0,320	0,367	0,337*	0,815*
76	0,412	0,076	0,386	0,556*	0,464*	0,778
77	0,353	0,064	0,316	0,837*	0,327*	0,292*
78	0,111	0,294	0,145	0,103	0,103	0,101
79	0,273	0,310	0,136	0,139	0,139	0,617*
80	0,197	0,086	0,179	0,181	0,181	0,621
81	0,151	0,111	0,104	0,163*	0,118*	0,103*
82	0,221	0,295	0,223	0,230	0,230	0,231
83	0,155	0,200	0,112	0,105	0,105	0,104
84	0,266	0,125	0,288	0,246	0,246	0,244
85	0,142	0,091	0,115	0,110	0,110	0,110
86	0,189	0,086	0,114	0,492	0,178*	0,109
87	0,125	0,042	0,072	0,076	0,076	0,077
88	0,132	0,288	0,132	0,122	0,122	0,125
89	0,434	0,058	0,411	0,560*	0,489*	0,899
90	0,319	0,068	0,319	0,332	0,332	0,492
91	0,246	0,066	0,263	0,261	0,261	0,884

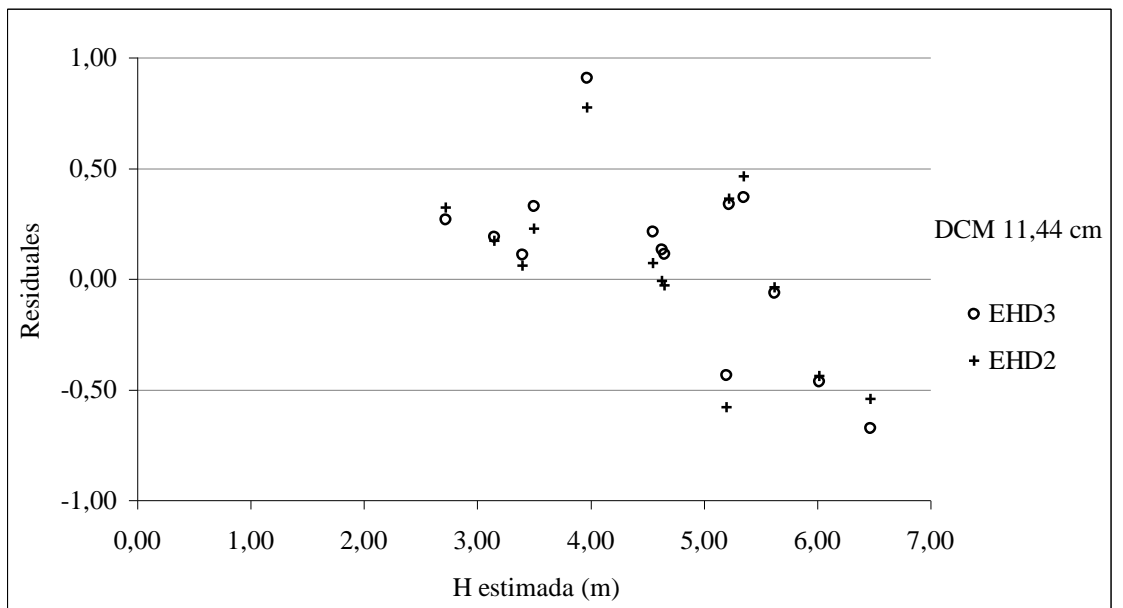
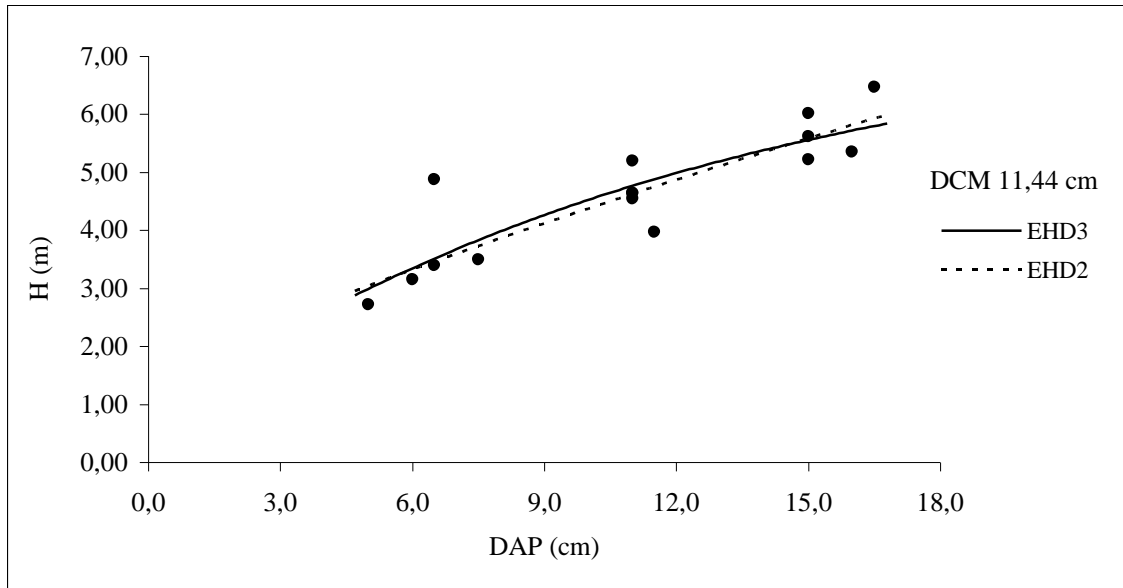
* Ecuaciones que no convergieron

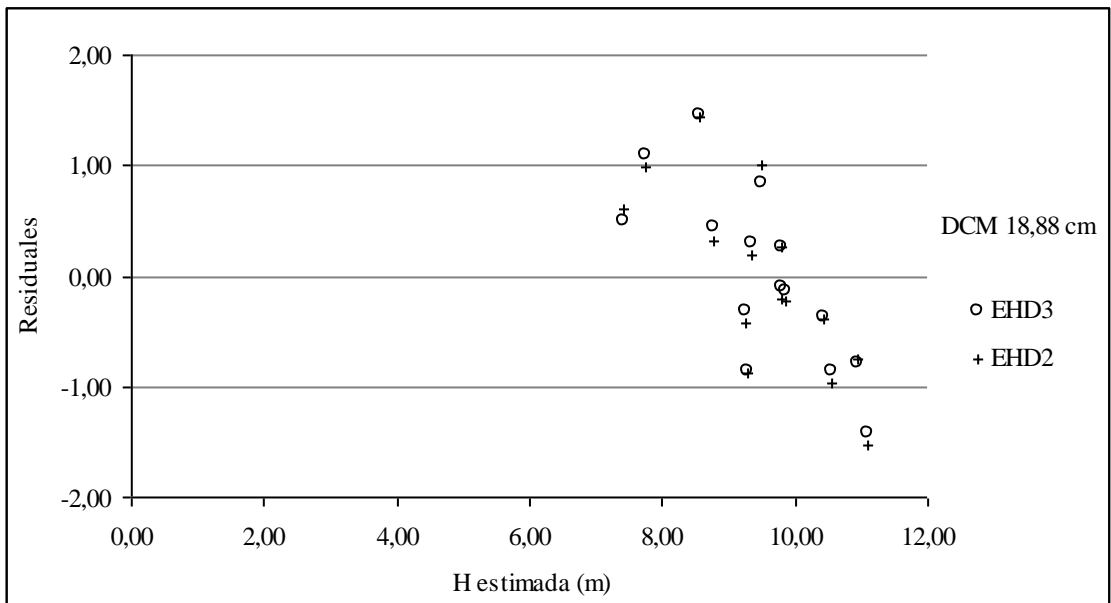
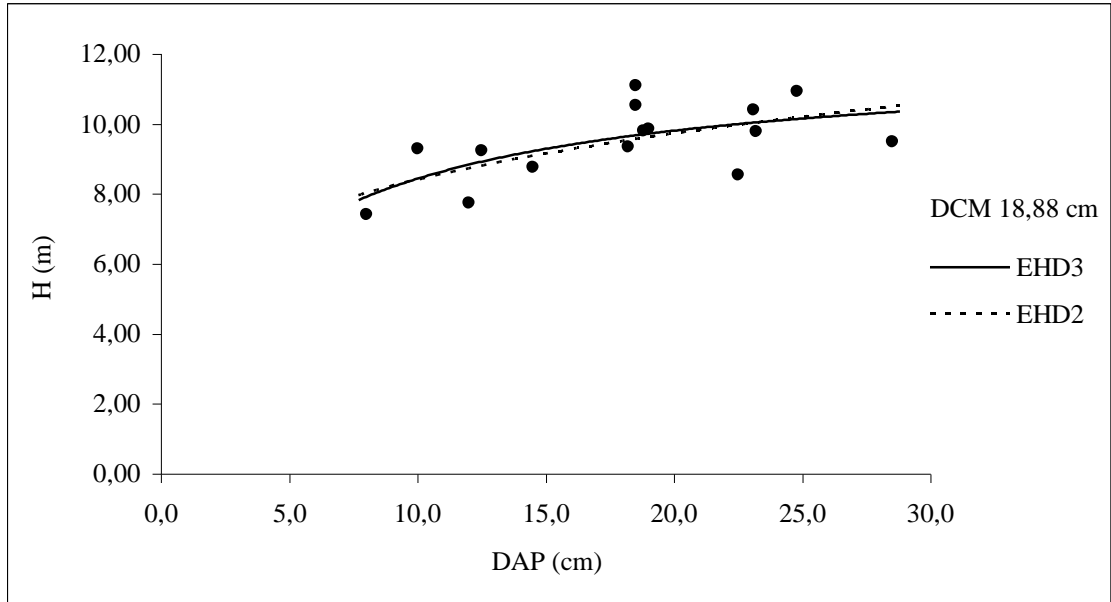
APÉNDICE 2

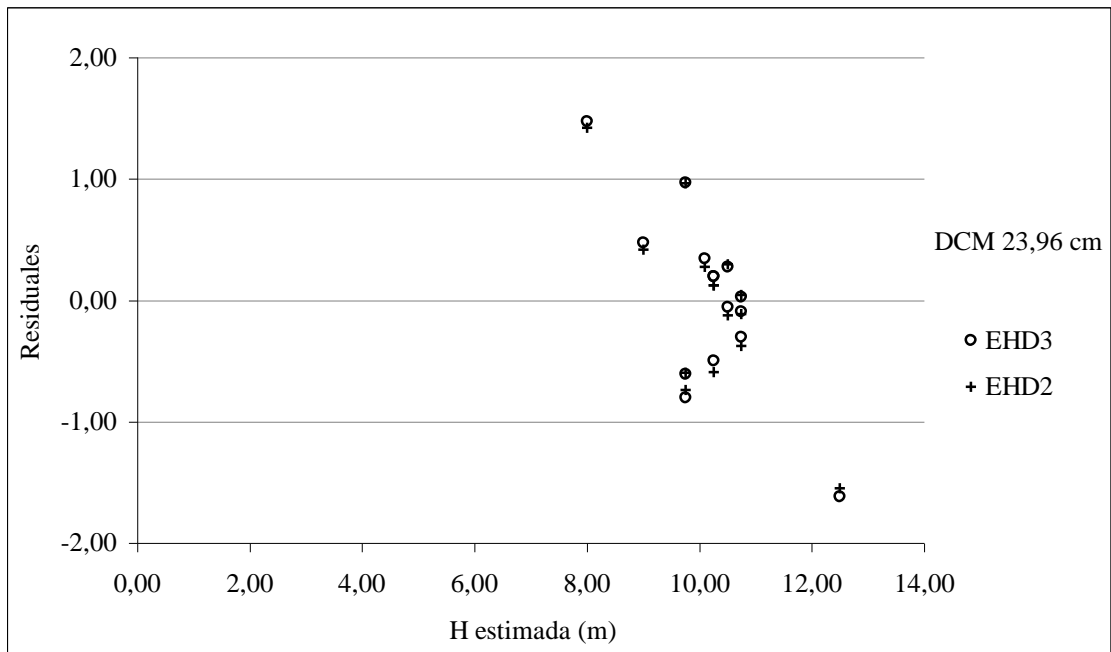
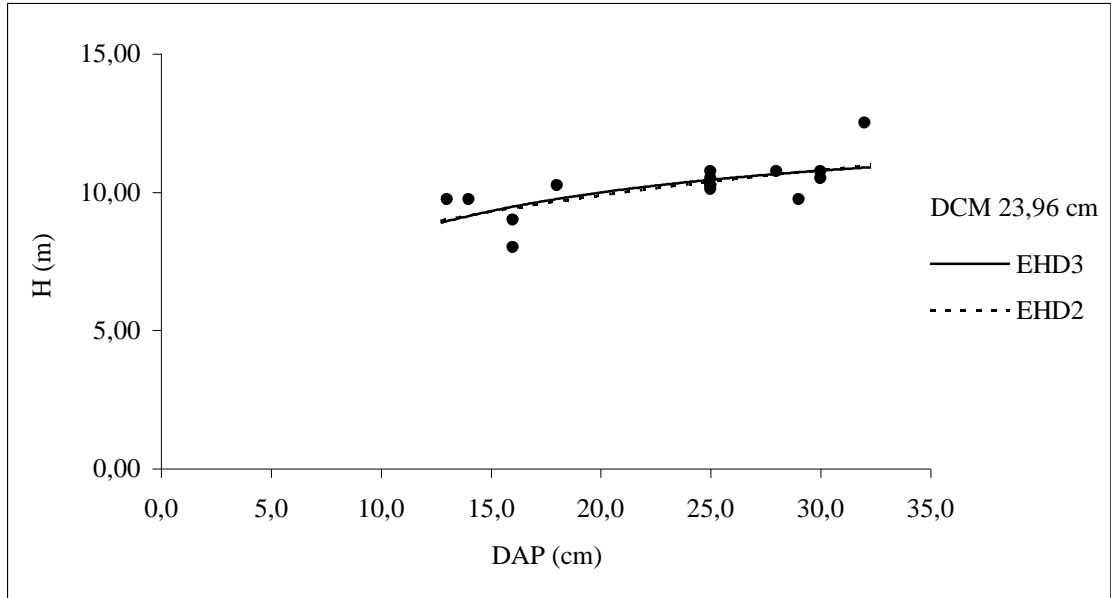
GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE DATOS H-D Y LÍNEAS DE REGRESIÓN BASADAS EN LA EHD2 Y EHD3, Y GRÁFICOS DE RESIDUALES DE AMBAS ECUACIONES DE PARCELAS DE DIFERENTES DIÁMETROS IDENTIFICADAS CON DIÁMETRO CUADRÁTICO MEDIO (DCM)

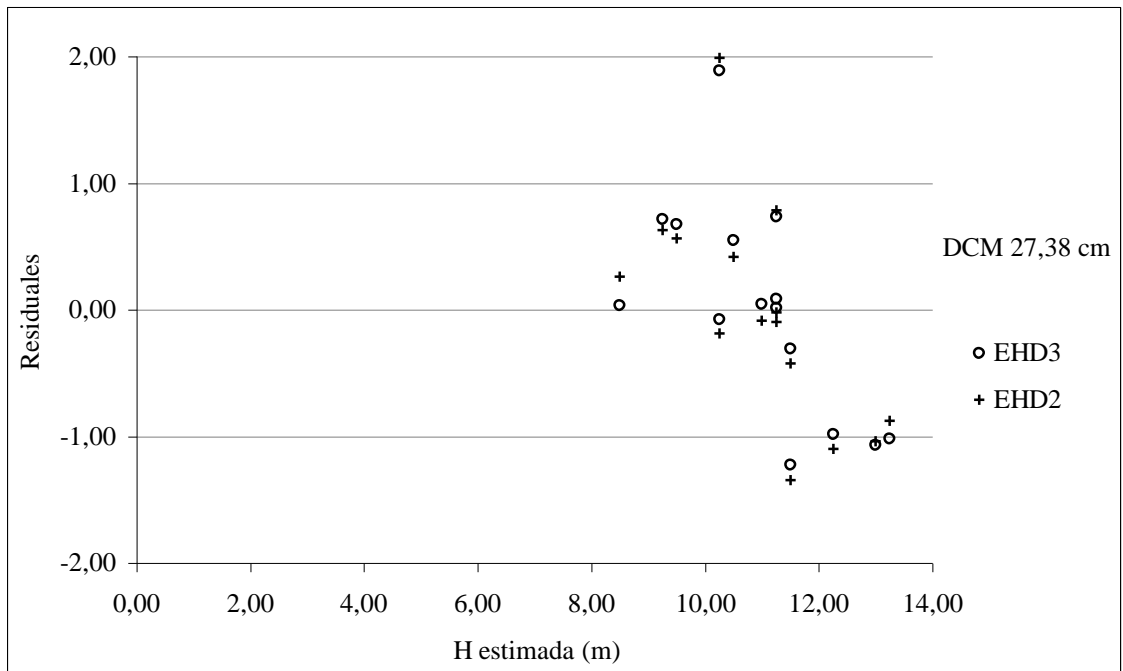
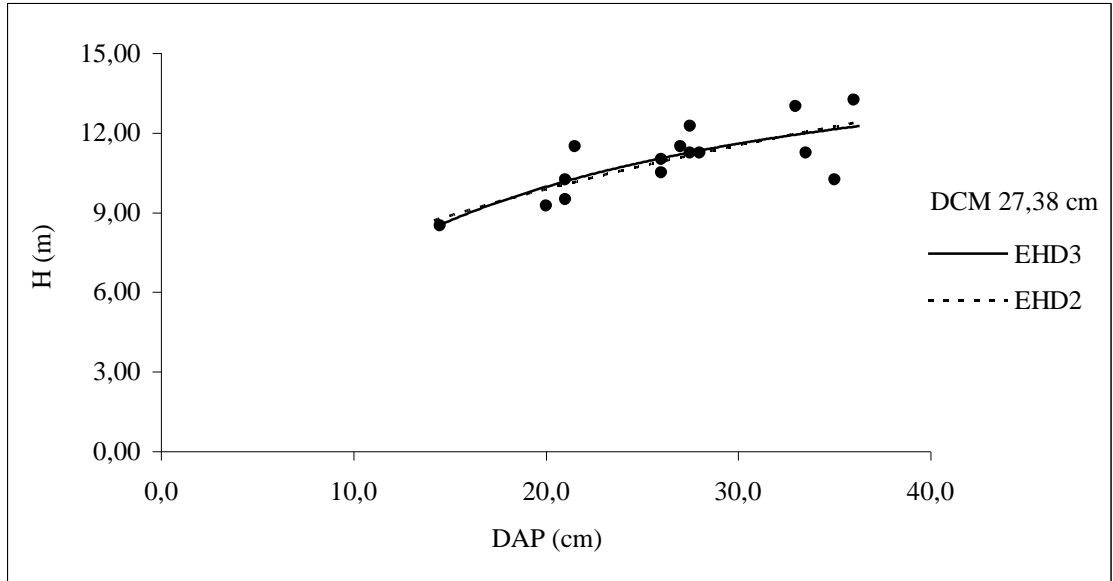


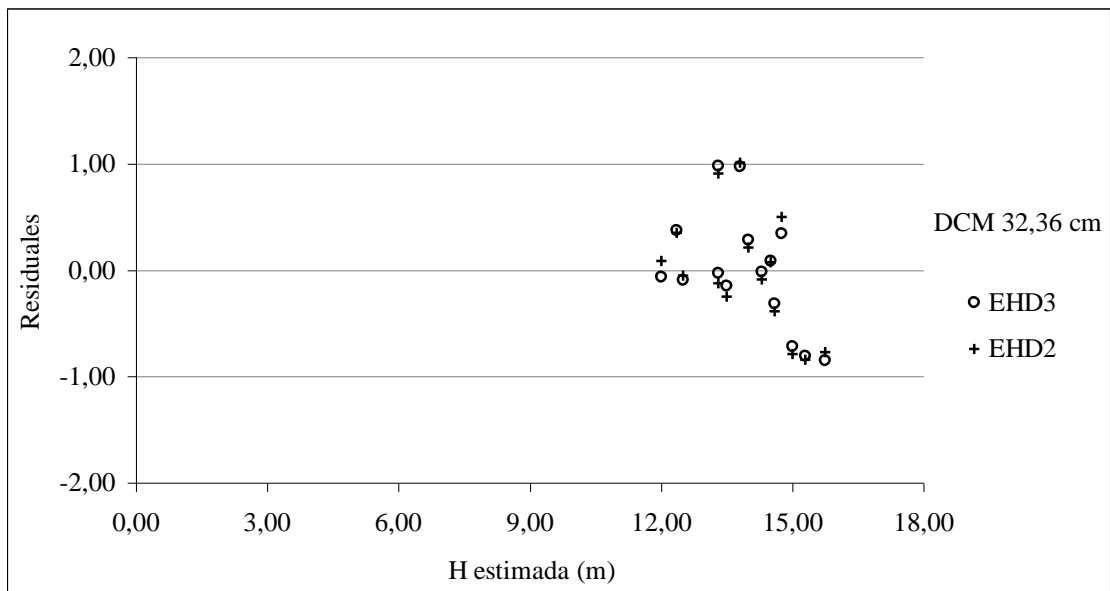
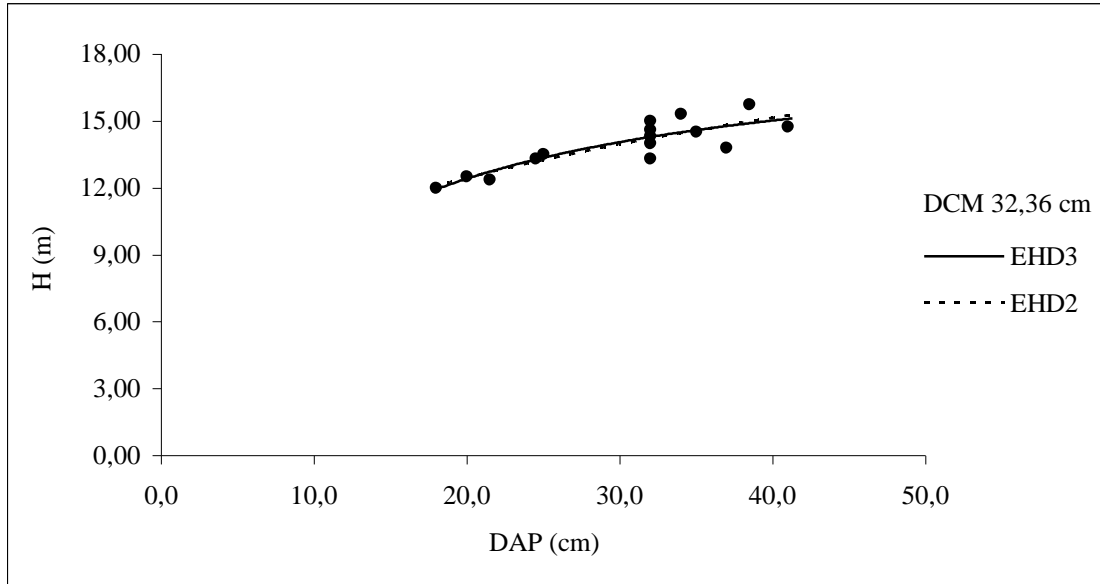








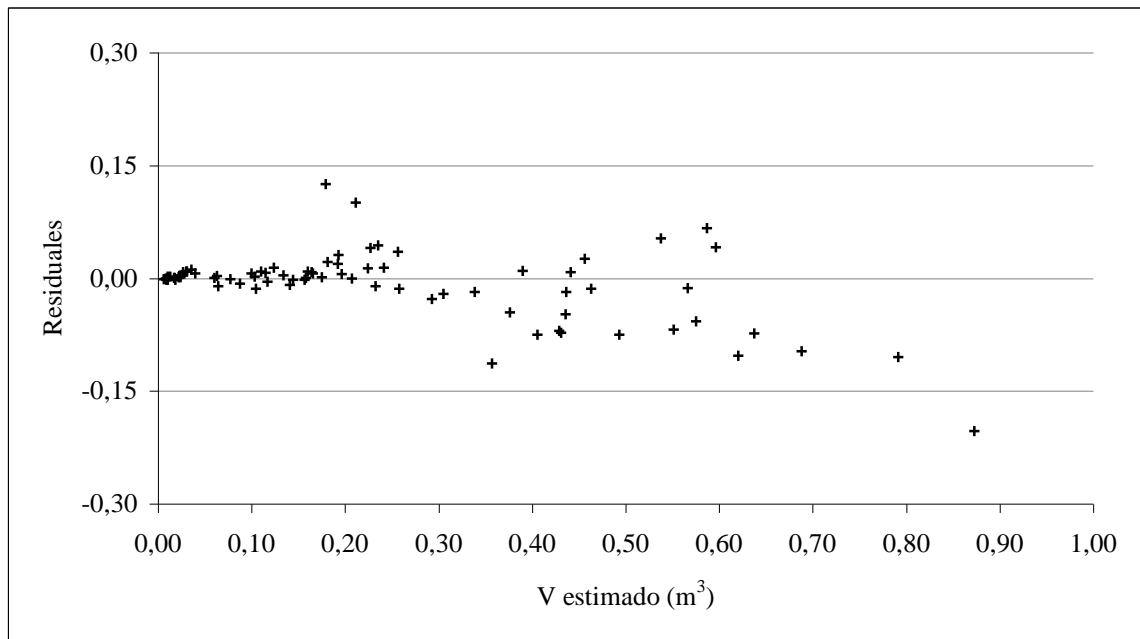




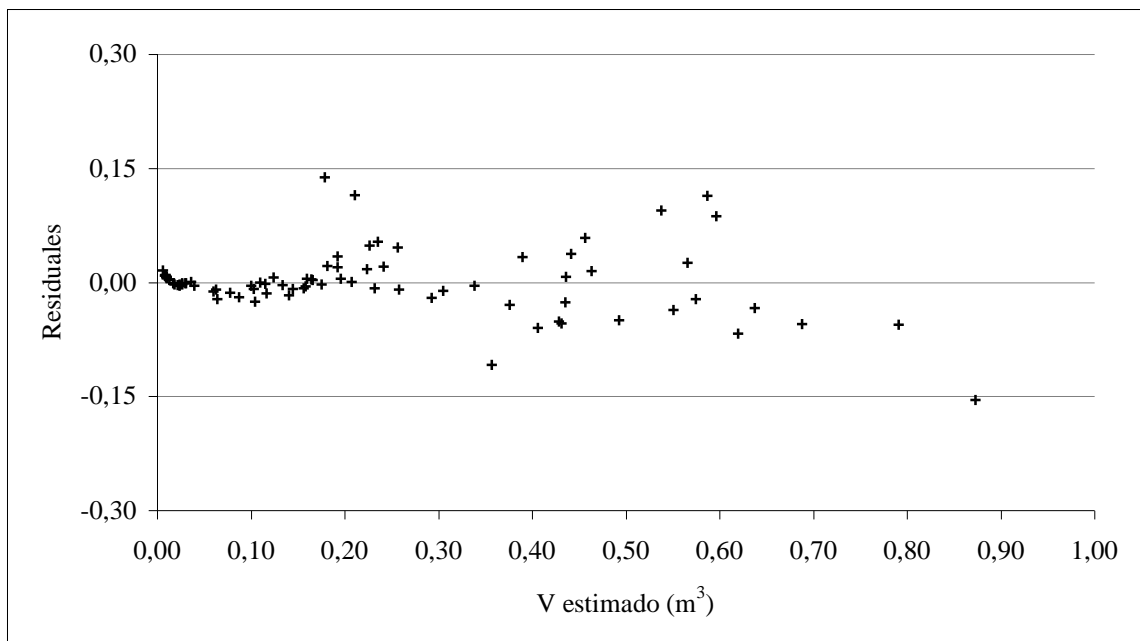
APÉNDICE 3

GRÁFICOS DE RESIDUALES DE LOS TRES MODELOS DE EV LOCAL (EV1, EV2 Y EV3) Y DE LOS CINCO MODELOS DE EV REGIONAL (EV4, EV5, EV6, EV7 Y EV8)

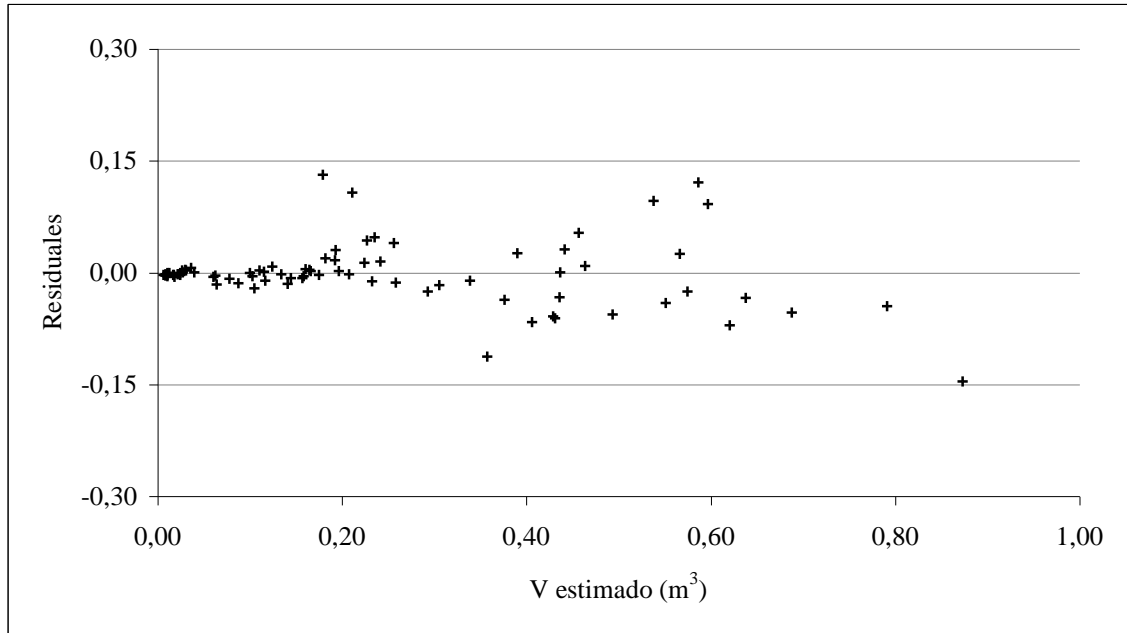
EV1: $\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP$



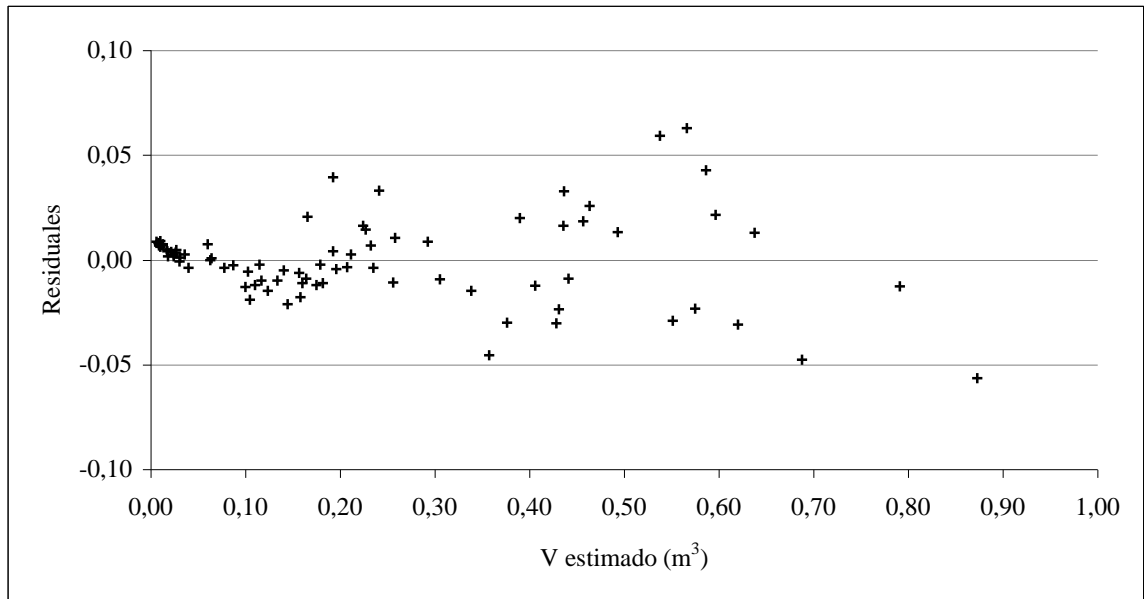
EV2: $V = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2$



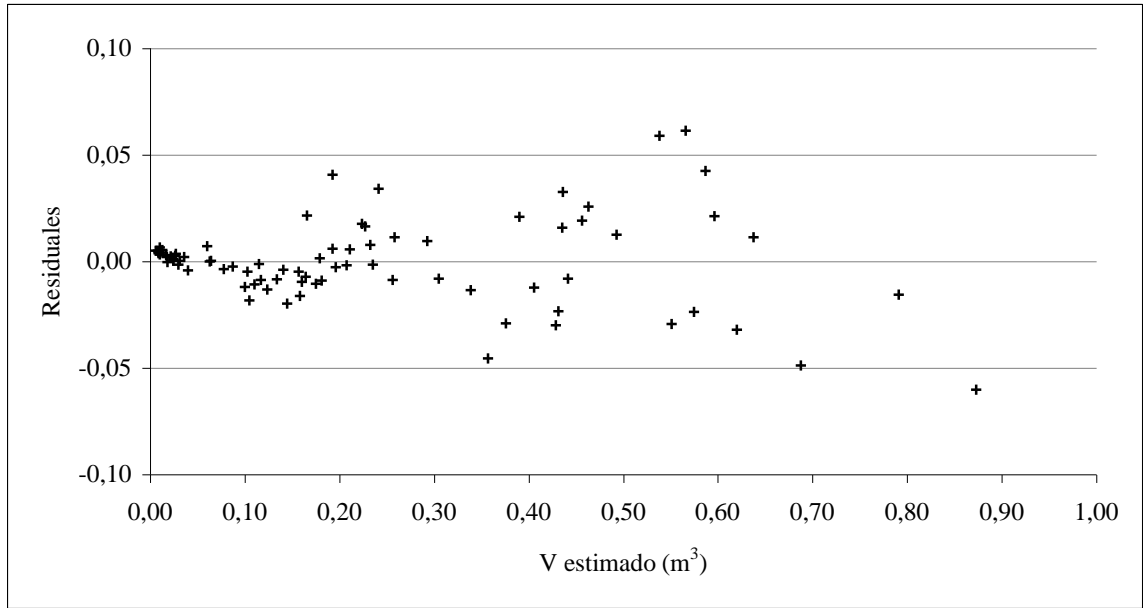
$$\text{EV3: } V = \beta_0 \text{DAP}^{2\beta_1}$$



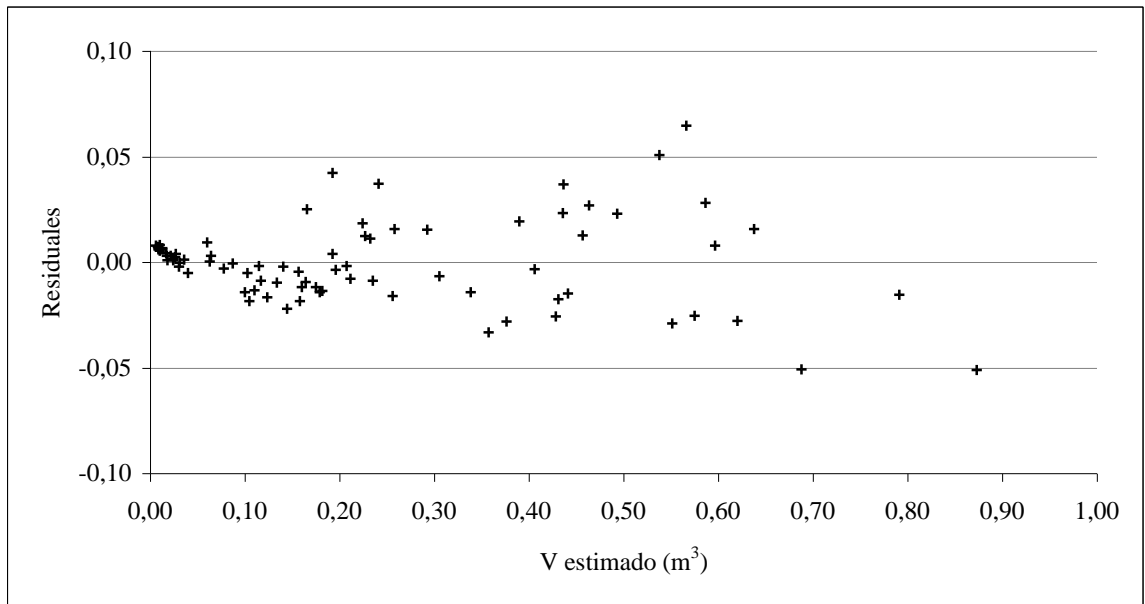
$$\text{EV4: } V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H}$$



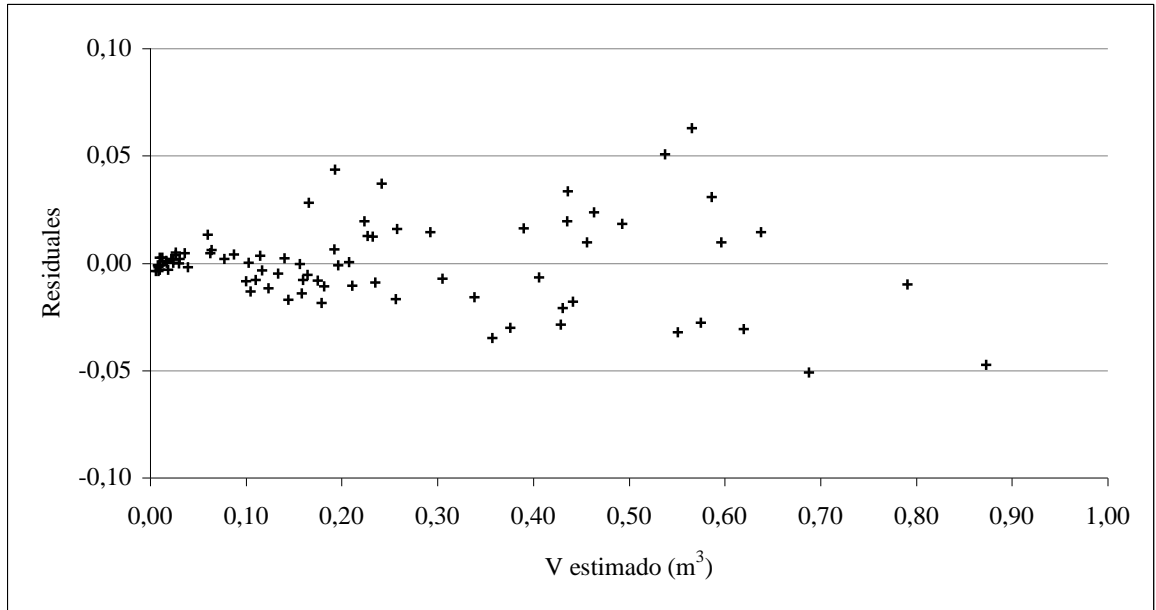
$$\text{EV5: } V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H} + \beta_2 \text{DAP}$$



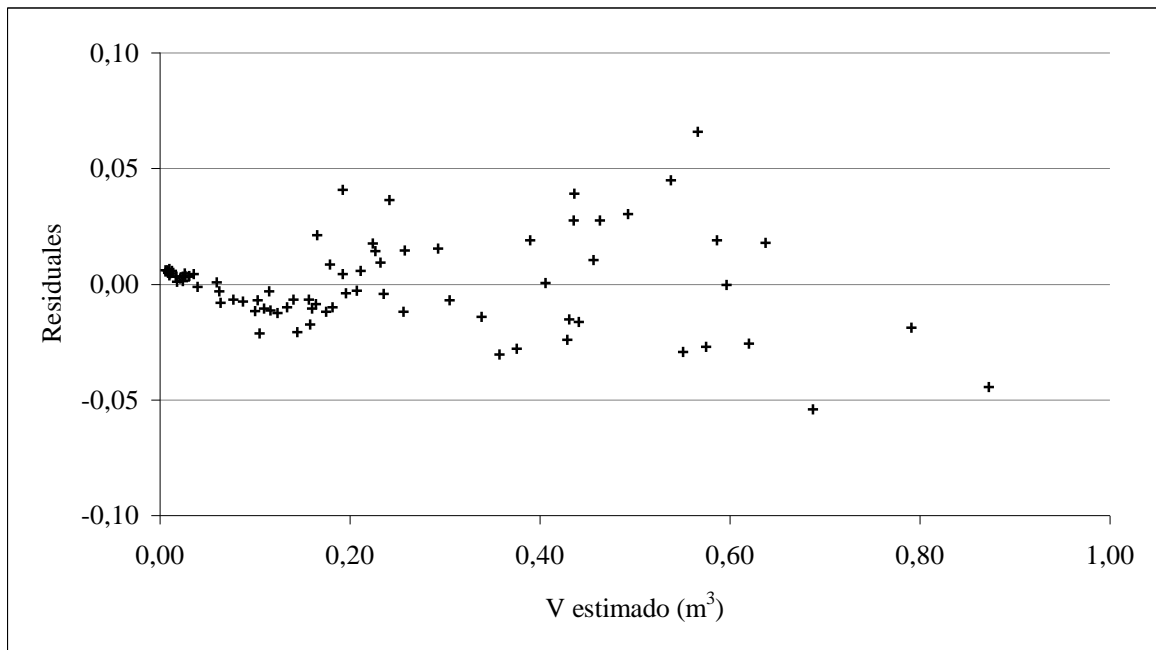
$$\text{EV6: } V = \beta_0 + 10^{\beta_1} \text{DAP}^{\beta_2} (\text{H}^{\beta_3})^{\beta_4}$$



$$\text{EV7: } V = \beta_0 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H} + \beta_2 \text{DAP} + \beta_3 \text{DAP}^3 + \beta_4 \text{DAP}^4$$

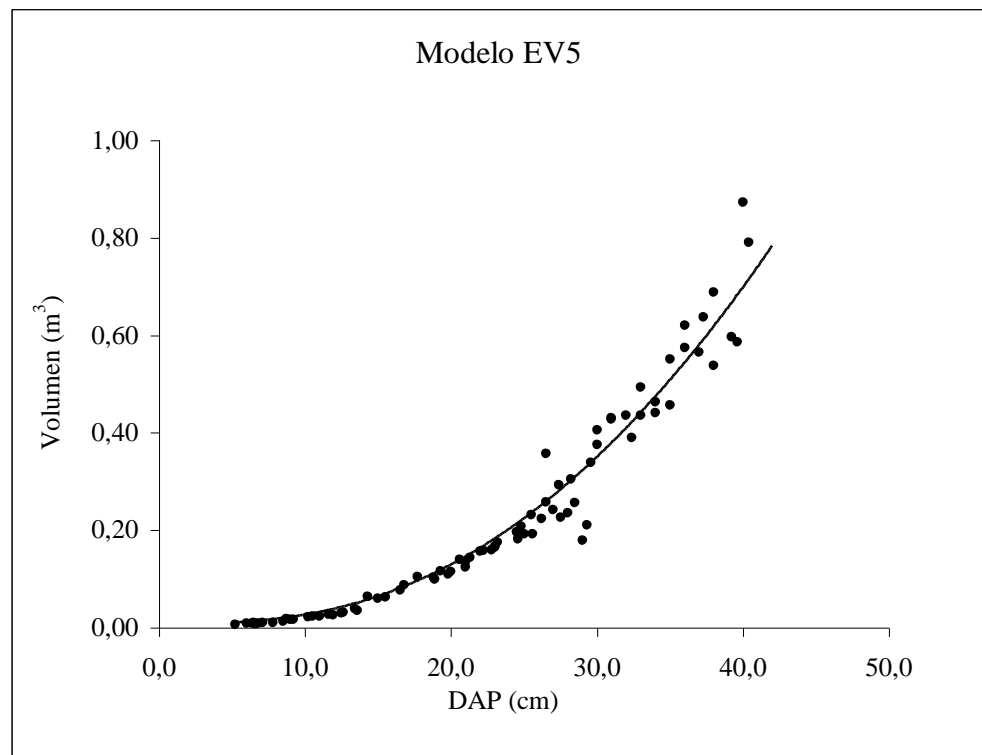
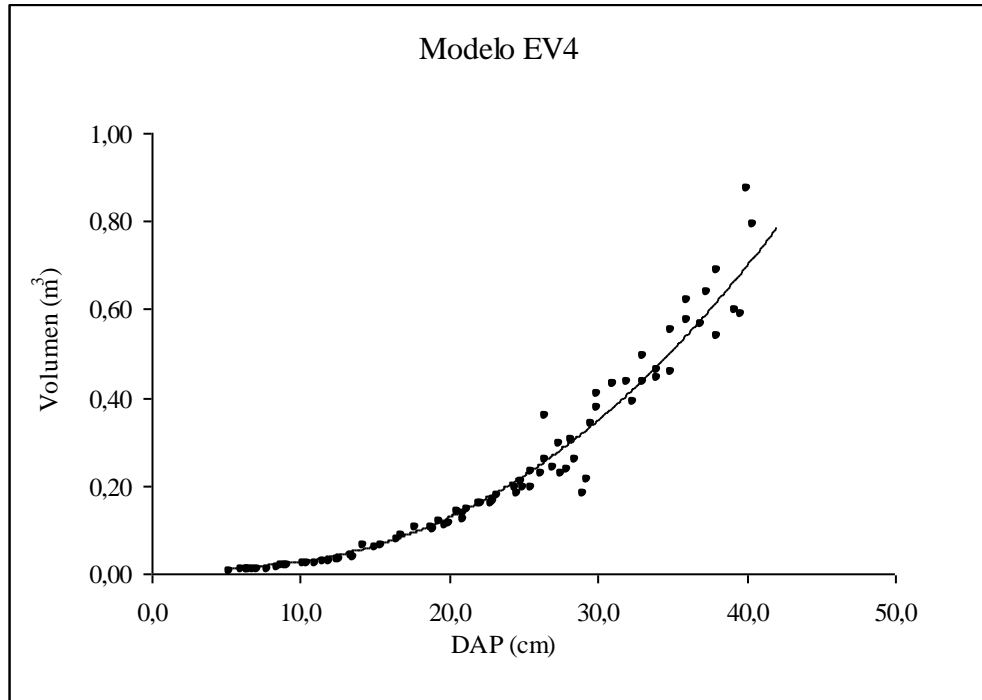


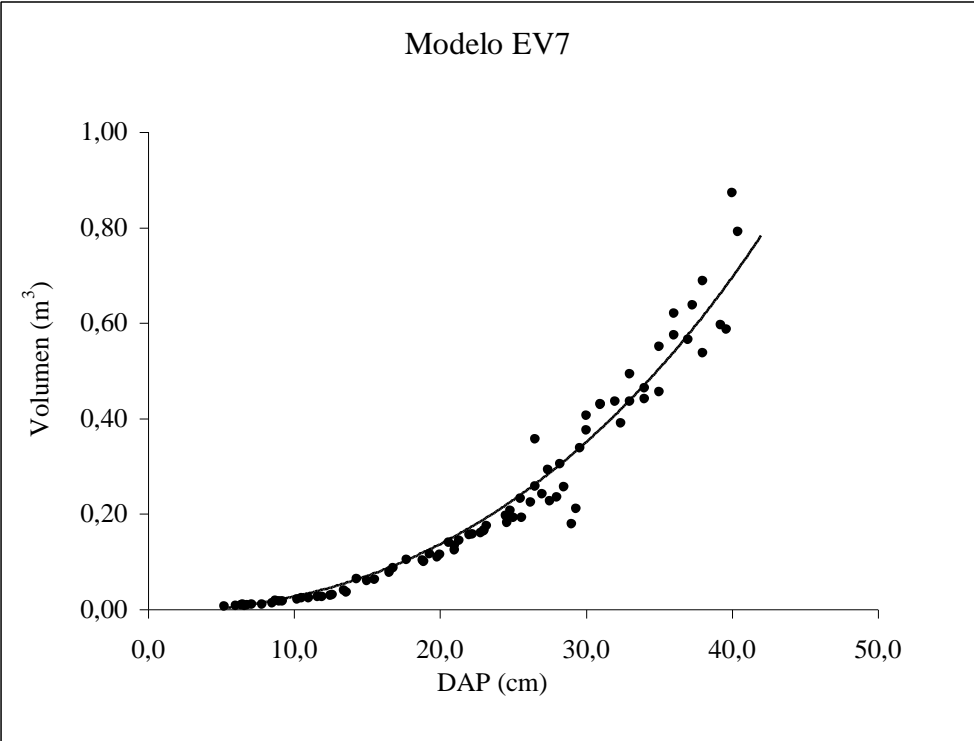
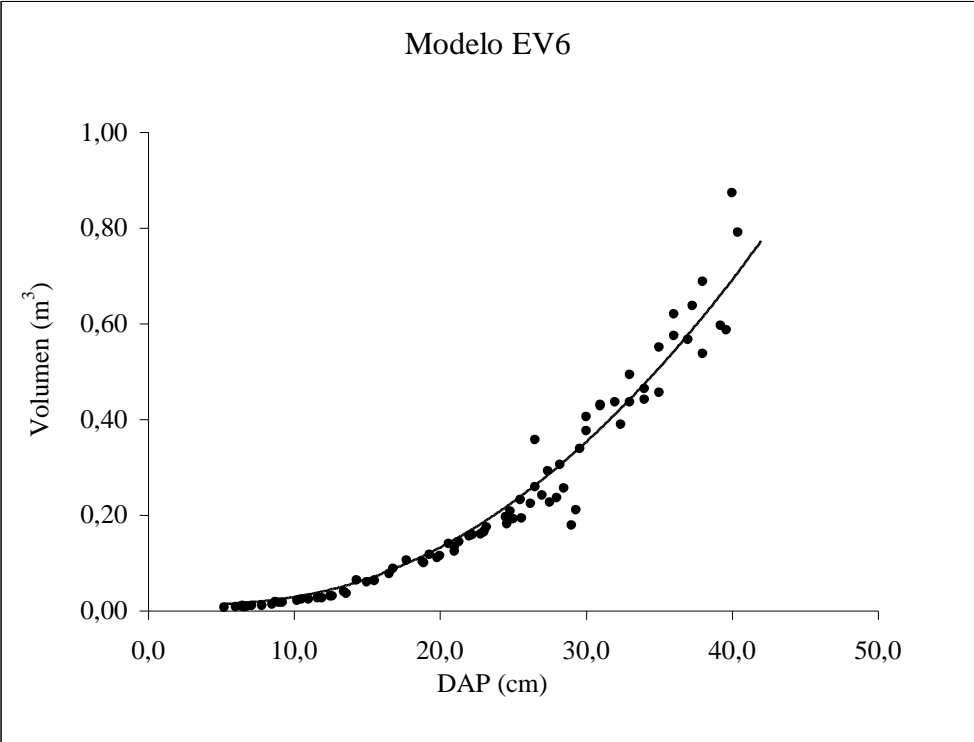
$$\text{EV8: } V = \beta_0 \text{DAP}^2 + \beta_1 \text{DAP}^2 \text{H} + \beta_2 \text{H}^2 \text{DAP} + \beta_3 \text{H}^2$$

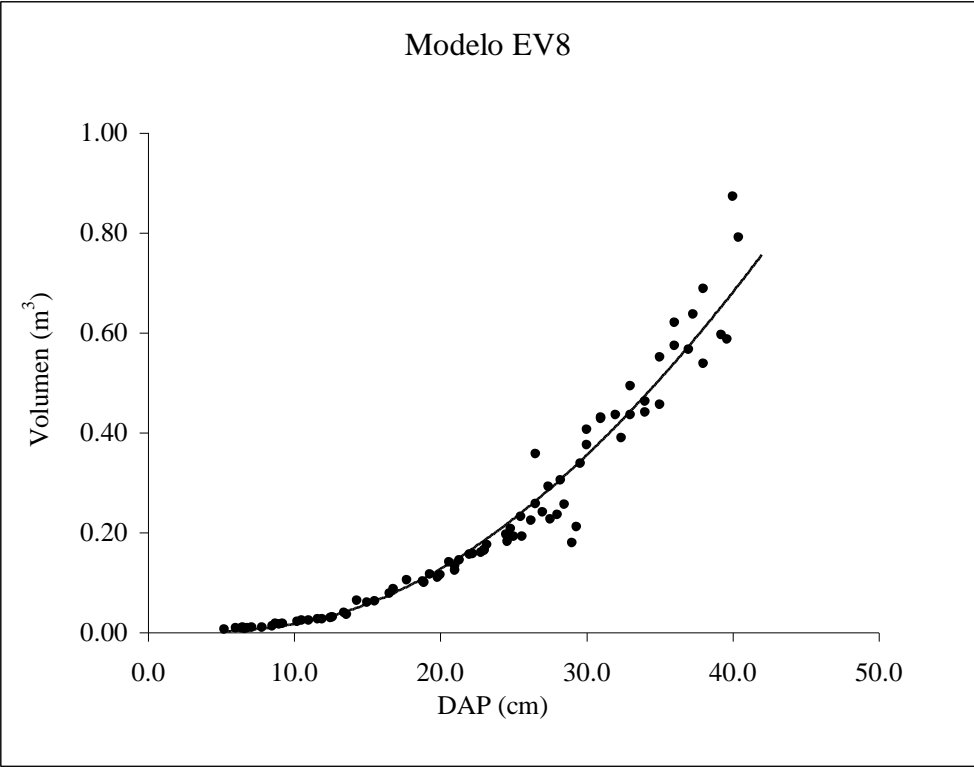


APÉNDICE 4

GRÁFICOS DE DISPERSIÓN DE DATOS DE VOLUMEN OBSERVADO Y LÍNEAS DE REGRESIÓN BASADOS EN LOS CINCO MODELOS DE EV REGIONAL

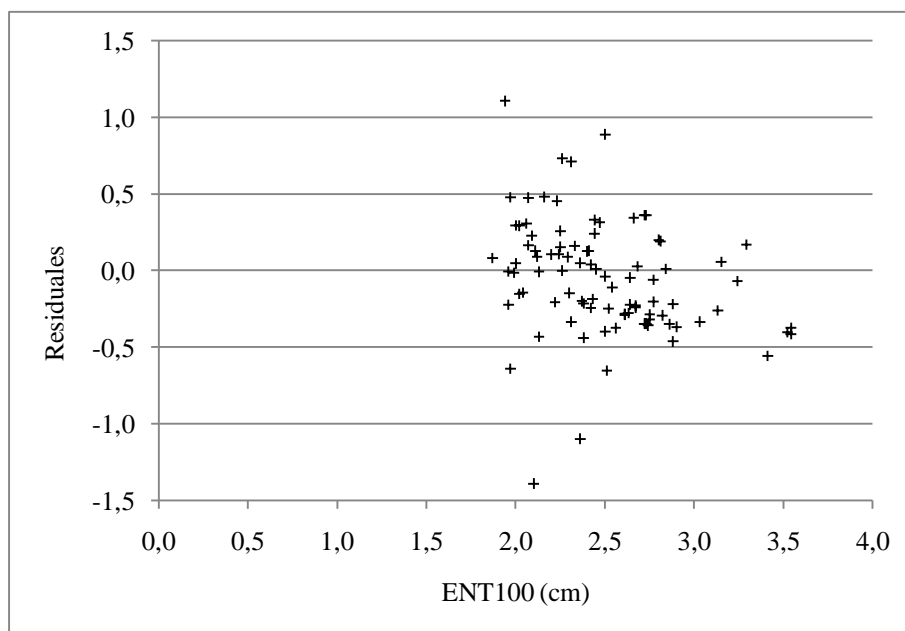
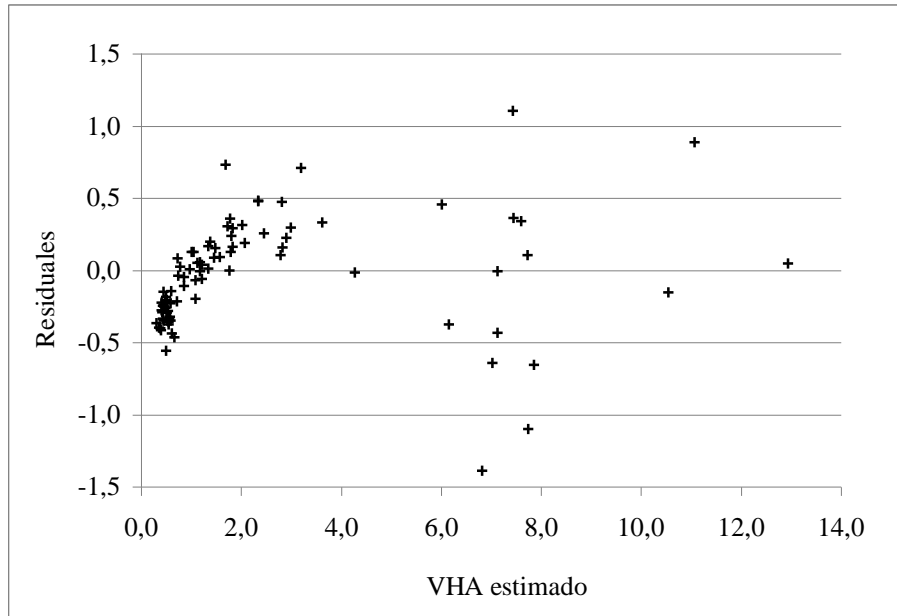


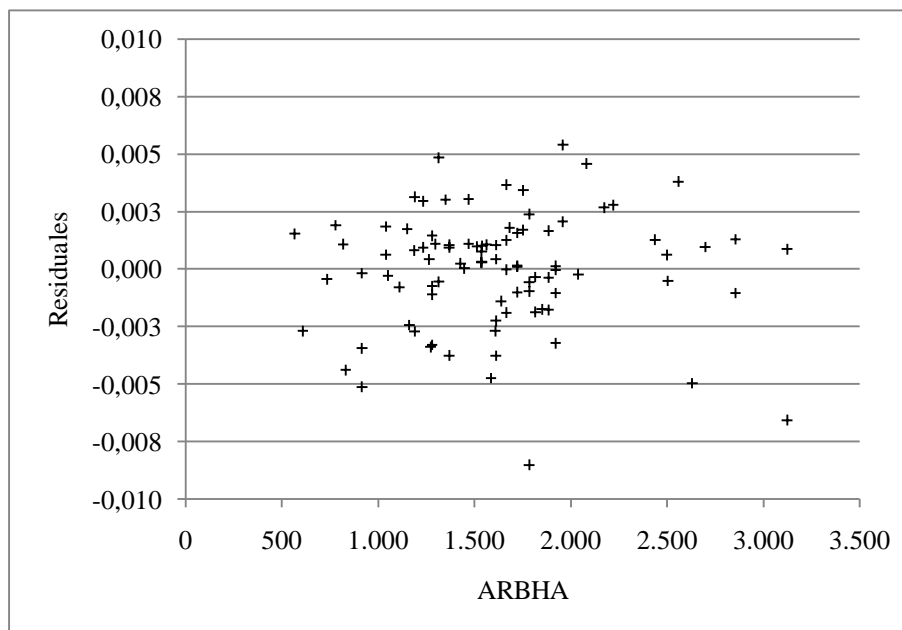
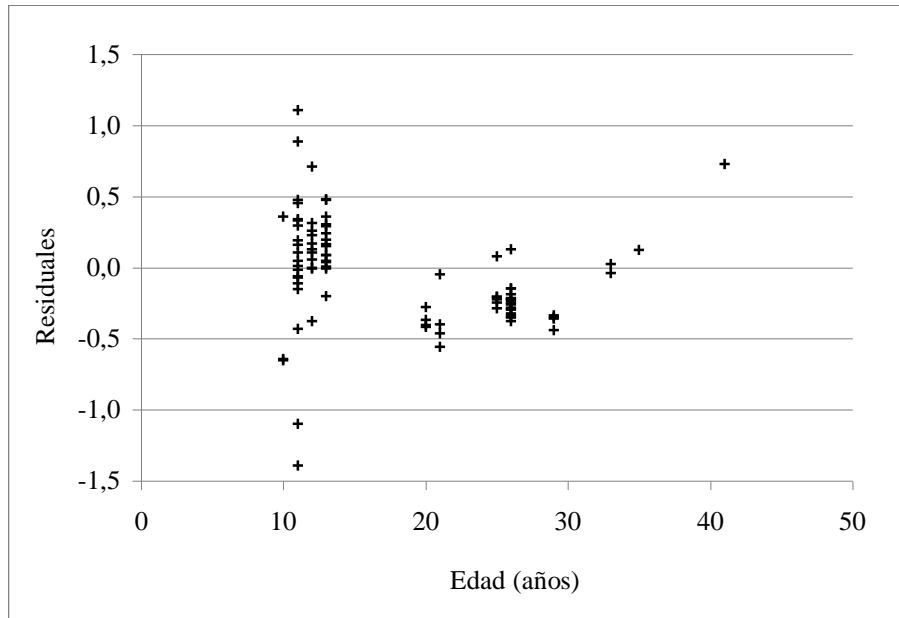




APÉNDICE 5

GRÁFICOS DE RESIDUALES VS VHA ESTIMADO, ENT100, EDAD Y ABHA DE LA EP1





APÉNDICE 6

GRÁFICOS DE RESIDUALES VS VHA ESTIMADO, ENT100, EDAD Y ARBHA PARA LA EP2

