



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Variación de la densidad básica de la madera y Módulo de Elasticidad en plantaciones jóvenes de *Nothofagus alpina*

Patrocinante: Dr. Fernando Droppelmann

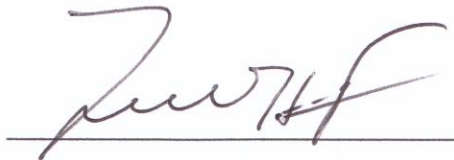
Trabajo de Titulación presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero Forestal

FELIPE ALEJANDRO GONZÁLEZ SANHUEZA
VALDIVIA
2018

Calificación del comité evaluador

	Nota
Patrocinante: Sr. Fernando Droppelmann F.	___ 6,6 ___
Informante: Sr. Aldo Rolleri	___ 6,4 ___
Informante: Sr. Felipe Leiva	___ 6,2 ___

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



Sr. Fernando Droppelmann F

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Profesor Fernando Droppelmann por su apoyo, gestiones y sugerencias que hicieron posible que este trabajo saliera adelante. También agradecer a los miembros de la comisión, los Señores Aldo Rolleri y Felipe Leiva quienes brindaron todo el apoyo, paciencia, tiempo y esfuerzo en las constantes correcciones del presente trabajo.

También agradezco particularmente al Señor Alejandro Martínez propietario del predio situado en Pelchuquín y al Señor Helmut Huber encargado del predio Catanli, que es propiedad de la empresa BOPAR S.A. por permitir la extracción de las muestras.

Agradezco a los Señores Julián Vásquez y Guido Catalán, por la extraordinaria paciencia, disposición y ayuda en la extracción de los discos que fueron utilizados para desarrollar el presente trabajo.

A los Señores Manuel Rocha y Francisco Burgos agradecer por enseñarme a utilizar el *software* R studio, que permitió realizar y entender el análisis estadístico del trabajo. También agradecer a mis compañeros y amigos que me apoyaron en la toma de datos.

DEDICATORIA

A mis padres Ana Del Carmen Sanhueza Burgos y

Pedro Alejandro González Hendriksen

A mi tía Juana Alicia Sanhueza Burgos y familia

Por su amor y constante apoyo

ÍNDICE DE MATERIAS

Página

	Calificación del comité de titulación	i
	Agradecimientos	ii
	Dedicatoria	iii
	Resumen	iv
2	INTRODUCCIÓN	2
3	ESTADO DEL ARTE	3
3.1	Distribución, crecimiento y uso	3
3.2	Definición de la Densidad básica de la madera	3
3.3	Módulo de Elasticidad (MOE)	4
3.4	Métodos no destructivos para el cálculo del MOE	5
3.5	Número de individuos por superficie y muestras por árbol	6
4	MÉTODOS	8
4.1	Área de estudio	8
4.1.1	Ubicación	8
4.1.2	Clima	9
4.1.3	Suelos	9
4.2	Muestreo en terreno	10
4.2.1	Diseño experimental	10
4.2.2	Medición y extracción de muestras	10
4.2.3	Medición del Tiempo de Vuelo (TdV y Velocidad (HM Director 200)	11
4.3	Trabajo de laboratorio	13
4.3.1	Procedimiento para la obtención de la densidad básica de la madera	13
4.3.2	Proceso para obtener las probetas que determinan el Módulo de Elasticidad	13
5	CÁLCULO DE VARIABLES Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	15
5.1	Cálculo de variables	15
5.2	Análisis Estadístico	16
6	RESULTADOS	17
6.1	Descripción de rodales muestreados	17
6.1.1	Variación de la Altura Total y Altura Comercial (árboles muestreados)	18
6.2	Densidad básica de la madera con discos (árbol completo)	18
6.2.1	Densidad Básica al DAP, determinada con Disco y Tarugo	20
6.3	Tiempo de Vuelo (TdV) y velocidad, determinado con Fakopp® y HM Director 200	21
6.4	Módulo de Elasticidad	22
7	DISCUSIÓN	25
7.1	Variación del DAP y Altura	25
7.2	Densidad básica de la madera con discos (árbol completo)	26
7.2.1	Variación de la Densidad básica al DAP determinada por discos y tarugos	27
7.3	Comparación de la Velocidad y Tiempo de Vuelo	27
7.4	Análisis comparativo del MOE entre instrumentos y sitios	28
7.5	Comparación entre norma internacional versus Plantación de <i>N. alpina</i>	29
8	CONCLUSIONES	30

ANEXOS	1	Extracción de discos determinado por otros autores.
	2	Valores de significancia de la densidad básica a distintas alturas entre sitios.
	3	Diferencias diamétricas en cada sector.
	4	Variación de la Altura total en cada sitio.
	5	Muestra la variación de la Altura comercial en cada sitio.
	6	Variación del Módulo de Elasticidad entre distintos métodos.

1. RESUMEN

Nothofagus alpina (Poepp et Endl) Oerst. se caracteriza por poseer un alto potencial productivo entre las especies nativas, razón por la cual ha concentrado investigaciones en torno a viverización, manejo de renovales, establecimiento y manejo de plantaciones con silvicultura intensiva, sin embargo los antecedentes sobre propiedades de la madera de la especie son limitados. El objetivo general de este estudio es analizar la variación de la densidad básica de la madera y el MOE en *N. alpina* en dos sitios diferentes. Los objetivos específicos son (i) evaluar la variación de la densidad básica dentro de los árboles, en sentido de la altura entre árboles y entre sitios, (ii) determinar y comparar la variación del MOE entre árboles, a través de métodos destructivos y no destructivos. El estudio se realizó en dos rodales, uno de 18 años en el sector de Pelchuquín, resultante del abandono de un vivero y por lo tanto la dinámica de crecimiento y estructura es similar a regeneración natural; el otro rodal en el predio Catanli corresponde a una plantación de 12 años, con silvicultura intensiva, ubicado cercano a la localidad de Panguipulli. El muestreo consideró la medición de 18 árboles por cada sitio, en varias secciones en el sentido de la altura de los árboles. El DAP fue mayor en Catanli con 18,6 cm ($P < 0,05$), pero la altura fue mayor en Pelchuquín con 16,5 m. La Densidad básica a nivel de rodal fue $405,8 \text{ kg m}^{-3}$ en Pelchuquín y $424,8 \text{ kg m}^{-3}$ en Catanli, mientras que la densidad básica al DAP fue de $434,6 \text{ kg m}^{-3}$ (Pelchuquín) y $438,2 \text{ kg m}^{-3}$ (Catanli) y ésta disminuyó a medida que la muestra aumenta en altura. La relación de la densidad al DAP entre disco y tarugo fue directa en cada rodal. El equipo HM Director 200 promedió valores cercanos al Ensayo de Flexión estático, en cambio el equipo Fakopp® obtuvo una diferencia en el MOE de 5,4 GPa (Pelchuquín) y 5,6 GPa (Catanli) respecto al Ensayo de Flexión estático, esta variación fue similar en ambos rodales, por lo que en mediciones futuras permitiría reducir los costos y tiempos de medición, sin embargo se recomienda realizar nuevos análisis para tener mayor exactitud en los valores estimados. El MOE obtenido a través del Ensayo de Flexión estático clasifica en la Norma de Nueva Zelanda en todas sus categorías, lo que expresa el alto potencial que presentan plantaciones jóvenes de *N. alpina*.

Palabras clave: Raulí, MOE, Fakopp®, HM Director 200, Ensayo de Flexión, propiedades de la madera.

2. INTRODUCCIÓN

Nothofagus alpina (Poepp et Endl) Oerst. se caracteriza por poseer un alto potencial productivo entre las especies nativas, razón por la cual ha concentrado investigaciones en torno a viverización, manejo de renovales, establecimiento y manejo de plantaciones con silvicultura intensiva.

El término “Silvicultura Intensiva” va dirigido a la aplicación de las distintas prácticas silvícolas (cortas intermedias, podas, raleos, fertilización, control de malezas, entre otras), cuyo principal objetivo es acortar la edad de rotación, mejorar su calidad e incrementar su valor comercial, sin embargo, es sabido que el uso de la Silvicultura Intensiva afecta las propiedades de la madera, ya sean físicas o mecánicas.

El presente estudio entrega la oportunidad de estudiar dos condiciones de crecimiento diferentes, una con silvicultura intensiva y otra que simula bastante bien lo que puede ser un bosque secundario (renoval), siendo entonces éste un aporte al conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de Raulí.

La Densidad básica es una propiedad fácil de medir y se relaciona con la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas de la madera, está varía entre árboles y dentro del árbol, ya sea en sentido del radio, como también en la altura.

Por otra parte, dentro de las propiedades mecánicas, el *stiffness* de la madera medido según el Módulo de Elasticidad (MOE) es un indicador que permite determinar la resistencia que posee el material, pudiendo clasificar la madera acorde a las normas vigentes para determinados usos.

El objetivo general del presente trabajo es analizar la variación de la Densidad Básica de la madera y el Módulo de Elasticidad en Raulí en dos sitios, los objetivos específicos son:

1. Evaluar la variación de la Densidad básica de la madera dentro de los árboles, en sentido de la altura y entre sitios.
2. Determinar y comparar la variación del Módulo de Elasticidad entre árboles y entre sitios, a través de métodos destructivos y no destructivos.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Distribución, crecimiento y uso

En Chile, *Nothofagus alpina* crece naturalmente desde el sur de la provincia de Curicó (río Teno, 35° S) hasta el sur de la provincia de Valdivia (40°30 S) por la Cordillera de Los Andes (Loewe *et al.* 1998), y en la Cordillera de la Costa desde Cauquenes (35°58' S) hasta el norte de la provincia de Llanquihue (41° S) (Sepúlveda y Stoll 2003). En la Cordillera de la Costa la distribución de *N. alpina* es fuertemente discontinua (Donoso 1978, Grosse y Quiroz 1999). Desde 1952, año en que se registra la primera plantación de *N. alpina* en Chile (fundo Quechumalal, Panguipulli), se han realizado varias experiencias de plantaciones con esta especie en distintas zonas y regiones del país (Espinosa *et al.* 1977, 1988, Vita 1977, Donoso *et al.* 1993a, 1999, Meneses *et al.* 1991, Hernández 1996, Gutiérrez 2004, Reyes *et al.* 2007). Las plantaciones de *N. alpina* durante los primeros cinco años alcanzan un crecimiento diametral anual promedio entre 1,5 a 2 cm (Donoso y Soto 2010); plantaciones de 15 años muestran incrementos diametrales anuales de 1 cm, un crecimiento volumétrico medio para estas plantaciones de 12 a 17 m³/ha/año (Contreras *et al.* 1994).

N. alpina es fuertemente dependiente de la calidad de sitio, muy sensible a condiciones locales de fertilidad de suelo, compactación, disponibilidad de agua, competencia con malezas, cabe destacar que es una especie capaz de regenerar en zonas de catástrofe, aunque la dureza del suelo es un factor primordial para el crecimiento de la especie (Soto 2013). En suelos fértiles *N. alpina* crece muy bien (Índice de sitio superior a 28), esto implica que la aplicación de silvicultura intensiva raulí favorece su crecimiento, aumentando la productividad (Ríos 2008). Generalmente la madera de *N. alpina* es utilizada para la fabricación de muebles (chapa fina), confección de viviendas, terminaciones, entre otras. *N. alpina* se caracteriza por tener un duramen de un color bastante homogéneo (café rosado pálido), respecto a la albura presenta un color rosado blanquizco (Díaz-Vaz, 1987).

3.2 Definición de la Densidad básica de la madera

Jerome Chave (2006) define la densidad básica como el cociente entre la masa del material seco, dividido su volumen verde (unidad de medida g cm⁻³ o kg m⁻³). La importancia de esta propiedad física es que está asociada con la mayoría de las características químicas y mecánicas de la madera (Coronel 1994). Es importante destacar que la densidad básica posee un patrón de variación con la edad y la altura, de tal manera que durante los primeros años el árbol produce madera juvenil de baja densidad, por otra parte a medida que la edad aumenta la densidad de la madera es mayor, además está varía con la altura,

pudiendo disminuir o aumentar dependiendo de la especie (Megraw 1985 y Downes *et al.* 1997), Zobel & Van Buijtenen (1989) demostraron que la densidad del leño de primavera de Pinos del Sur de Estados Unidos varía entre 0,30 a 0,46g/cm³, mientras que la densidad del leño de otoño varía entre 0,65 a 0,92g/cm³. El Cuadro 1 indica valores referenciales de Densidad básica obtenidos por diferentes autores en distintas especies, tanto coníferas como latifoliadas, estos serán comparados con los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Existen factores que inciden en la densidad de la madera, cómo la cantidad de madera temprana y tardía, tamaño de las fibras, espesor de pared celular, tipo y diámetro de células y contenido de extraíbles presentes en la madera (Megraw 1985). La presencia y cantidad relativa de estos últimos está a su vez influenciada por la edad de los árboles y su interacción con el medio ambiente (Prado y Barros, 1989). Además, la densidad básica es un excelente indicativo de las propiedades mecánicas en maderas de grano recto y libre de defectos, o sea sin influencia de otros factores que alteran negativamente tal relación (Kollmann y Côté 1968, Pereyra y Gelid 2002).

Cuadro 1. Media y Coeficiente de variación (CV) para la Densidad básica (kg m⁻³) de la madera, obtenidos por diferentes autores.

Autor	Edad	Especie	Media Densidad básica	CV %	Sección
Diaz-Vaz et al. (2009)	No informado	Raulí (Nothofagus alpina)	550	11,3	No informado
Droppelmann (2007)	19	Pino radiata (zona Constitución)	445	5,4	DAP
Droppelmann (2007)	19	Pino radiata (zona Valdivia)	383	6,2	DAP
Davel <i>et al.</i> (2005)	25	Pino oregon	381	10,5	No informado
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Tepa (Laureliopsis philipiana)	549	3,5	No informado
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Olivillo (Aextoxicon punctatum)	509	11,1	No informado
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Laurel (Laurelia sempervirens)	553	3,3	No informado
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Lenga (Nothofagus pumilio)	545	9,2	No informado
Diaz (2005)	Rodal adulto	Hualo (Nothofagus glauca)	596	3,3	No informado

3.3 Módulo de Elasticidad (MOE)

El Módulo de Elasticidad es la propiedad más importante para las maderas con fines estructurales (Timbersa 2006), se define como la capacidad que tiene un material para resistir la deformación al ser solicitado por fuerzas externas, donde MOE es la medida de rigidez de la madera (Corma, 2004). Este consta de tres comportamientos, elástico: cuando el esfuerzo deformativo no sobrepasa el límite elástico; plástico: cuando el esfuerzo deformativo sobrepasa el límite elástico pero el sólido no se rompe; ruptura: cuando el esfuerzo deformativo sobrepasa el límite de ruptura. Distintos estudios indican que bajos valores de módulo de elasticidad constituyen una importante limitación en la madera de construcción

como es el caso de Pino radiata, particularmente en rotaciones cortas, donde la proporción de madera juvenil es muy alta. El Módulo de Elasticidad estático mide la resistencia de la madera a la flexión bajo cargas, es utilizado como un criterio de calidad y clasificación para la madera estructural; es de suma importancia conocer esta variable ya que permite determinar el valor real del MOE (medida del *stiffness*); el Cuadro 2 expresa valores medios de MOE determinados por distintos instrumentos de ultrasonido en diferentes especies, el Cuadro 3 presenta valores promedios de MOE registrado a través del Ensayo de Flexión en diferentes especies latifoliadas. La flexión es entendida como la deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal (Navia 2006).

Cuadro 2. Determinación de la Media y Coeficiente de Variación (CV) para la Modulo de Elasticidad (GPa) de la madera mediante instrumentos de ultrasonido, obtenidos por diferentes autores.

Autor	Edad	Especie	Método de medición	Media MOE	CV %
Navia (2006)	8	Pino radiata	<i>Fakopp tree sonic</i>	7,2	14,2
Baltunis <i>et al.</i> (2007)	7	Pino radiata	SilviScan®	6,1	21,0
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Tepa (<i>Laureliopsis philipiana</i>)	Steinkamp BP5	11,7	10,4
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Olivillo (<i>Aextoxicon punctatum</i>)	Steinkamp BP5	11,0	17,4
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Laurel (<i>Laurelia sempervirens</i>)	Steinkamp BP5	12,9	5,5
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Lenga (<i>Nothofagus pumilio</i>)	Steinkamp BP5	10,8	8,4

Cuadro 3. Determinación de la Media y Coeficiente de Variación (CV) para la Modulo de Elasticidad (GPa) de la madera mediante Ensayo de Flexión, obtenido por Baradit *et al.* (2013).

Autor	Edad	Especie	Método de medición	Media MOE	CV %
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Tepa (<i>Laureliopsis philipiana</i>)	Ensayo de Flexión	7,9	14,3
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Olivillo (<i>Aextoxicon punctatum</i>)	Ensayo de Flexión	8,0	16,9
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Laurel (<i>Laurelia sempervirens</i>)	Ensayo de Flexión	9,9	6,1
Baradit <i>et al.</i> (2013)	No informado	Lenga (<i>Nothofagus pumilio</i>)	Ensayo de Flexión	8,1	9,8

3.4 Métodos no destructivos para el cálculo del MOE

Uno de los equipos que se ha usado para determinar el Módulo de Elasticidad es el *Fakopp Microsecond Timer tree sonic* (Fakopp®), el cual está diseñado para la evaluación de árboles en pie, tanto para el estudio de defectos y pudrición, así como para determinar la calidad interna de la madera. El instrumento Fakopp® mide el tiempo que tarda en viajar una onda de esfuerzo entre dos transductores (Anónimo 2006). La utilización de la herramienta Fakopp® considera la evaluación de la madera externa (dos a tres anillos exteriores) de los árboles que es la zona por donde transita la onda de esfuerzo. El fundamento del funcionamiento del equipo consiste básicamente en dos transductores que definen una

línea a través de un árbol, la onda de esfuerzo inducida por un golpe sobre uno de los sensores viaja en línea recta hacia el sensor opuesto (Rocha 2012).

Los principales factores que pueden incidir en la medición es la temperatura y el contenido de humedad de la madera, este último afecta la medición cuando está bajo el punto de saturación de fibras, no así sobre el punto de saturación de fibras donde la velocidad no cambia significativamente puesto que las fibras son responsables de la propagación de la onda. En el caso de los árboles vivos el contenido de humedad es siempre más alto que el punto de saturación de las fibras. La temperatura es otro parámetro que podría influenciar la medición de la velocidad, sin embargo, este efecto no es importante porque si la temperatura se incrementa en 1 °C la velocidad disminuye aproximadamente en 3 m s⁻¹ dentro del rango de temperatura entre 0-40 °C, por ejemplo, si en laboratorio existe una temperatura de 20 °C y aumenta en 3 °C la velocidad del instrumento disminuye en 9 m s⁻¹ (Anónimo 2006). En el sub punto 4.2.3 se describe el modo en que se utiliza el equipo.

Otro instrumento es el Director HIT MAN 200 (HM director 200), instrumento que permite determinar el Módulo de Elasticidad mediante la velocidad (km s⁻¹) tiempo que demora la onda en viajar de un extremo al otro, equipo que se caracteriza por trabajar con un largo mínimo de troza de 2,5 m y un máximo de 5,0 m. Cabe destacar que el valor entregado por el equipo corresponde al promedio de la velocidad de la onda, siendo que ésta se mueve tanto en el eje longitudinal como en el radial, lo que permite tener mayor precisión (Carter *et al.* 2015). Al igual que el equipo Fakopp® se ve afectado por la temperatura, el contenido de humedad, la nudosidad, presencia de resina, ángulo microfibrilar, entre otros. La habilidad de hacer una predicción correcta del módulo de elasticidad depende de la precisión con la que es medida la velocidad de onda (Hayes y Chen, 2003).

3.5 Número de individuos por superficie y muestras por árbol

En ocasiones en que no es posible o conveniente realizar un censo (analizar a todos los elementos de una población), se selecciona una muestra, entendiendo por tal una parte representativa de la población, el muestreo es por lo tanto una herramienta de investigación científica cuya función básica es determinar que parte de una población debe examinarse con la finalidad de hacer inferencias sobre esta (Anónimo 2009). La muestra debe lograr una representación adecuada de la población para reproducir de mejor manera los rasgos esenciales de dicha población que son relevantes para la investigación. Pereyra y Gelid (2002) y Doldán (et al 2010) usan 25 árboles cortando tres discos a alturas variables 25 %, 50 % y 75 % de la altura, cada disco con un espesor de 2,5 cm, en cambio Weber (2005) selecciona

6 árboles y la extracción de los discos a alturas fijas, el primer disco lo obtiene en la base y luego a alturas fijas de 1,5 m, también con un espesor de 2,5 cm de cada disco. Todos los estudios indican que es importante envolver cada disco en bolsa para evitar la pérdida de humedad, además las muestras obtenidas deben estar libres de defectos (nudos, ramillas, presencia de resina, entre otras).

4. MÉTODOS

4.1 Área de estudio

4.1.1 Ubicación

Este estudio se realizó obteniendo muestras en dos rodales, uno de 18 años situado en la localidad de Pelchuquín a 27 km en línea recta de la ciudad de Valdivia en dirección norte, $39^{\circ} 36' 34''$ Sur, $73^{\circ} 4' 25''$ Oeste (Figura 1) encontrándose a 25 m s.n.m. El rodal es el resultado de un ex vivero abandonado y por lo tanto su dinámica de crecimiento simula las condiciones de un renoval de *N. alpina*. El segundo rodal tiene 12 años ubicado en el predio Catanlí localizado a 14 kilómetros de la ciudad de Panguipulli y a una distancia en ruta desde Valdivia 90 km y en línea recta 76 km, $39^{\circ} 38'$ Sur y $72^{\circ} 21'$ Oeste (Figura 1) a 250 m s.n.m., la plantación es coetánea y consta de silvicultura intensiva (distanciamiento uniforme, control de malezas, fertilización, poda y raleo).

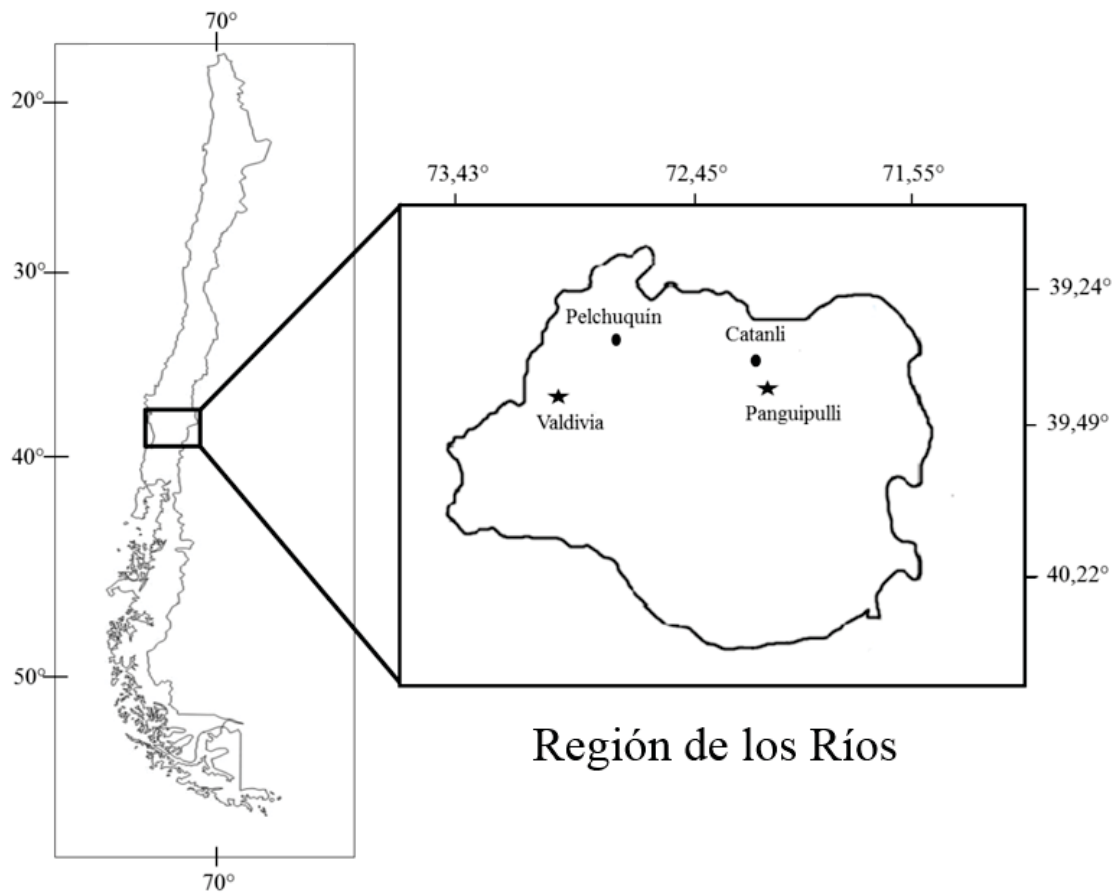


Figura 1. Mapa de localización de los predios muestreados (en punto de color negro).

4.1.2 Clima

Pelchuquín se caracteriza por presentar un clima templado lluvioso con influencia mediterránea, con una temperatura promedio de 10 °C, una precipitación media anual de 1600 mm. En enero presenta una máxima promedio de 17 °C, y el mes más frío es julio, con un promedio de 7,6 °C (Pladeco 2011-2014).

De acuerdo al Plan regulador de Panguipulli (2000), el clima presente en el predio Catanlí corresponde a Templado lluvioso con influencia mediterránea con una temperatura media anual de 10 °C, la máxima promedio se produce durante el mes de enero con 17 °C y una mínima promedio en el mes de julio de 7,7 °C. Las precipitaciones son de origen ciclónico o frontal con una media anual de 2.555 mm, sin estación seca.

4.1.3 Suelos

El rodal de Pelchuquín se ubica sobre la serie de suelos Pelchuquín situada en la Depresión de San José de la Mariquina a una altura promedio de 20 a 30 m s.n.m. y se presenta en forma de depósitos de cenizas volcánicas sobre canchagua; posee una topografía plana con pendientes de 1 a 3 % que es típica de la serie Pelchuquín. Son suelos profundos a moderadamente profundos con texturas medias a moderadamente finas hasta los 70 cm y finas en profundidad; bien estructurados, granular en superficie y masiva en profundidad, el arraigamiento es bueno hasta los 90 cm y en profundidad las raíces se hacen escasas. En cuanto a la densidad real y aparente, porosidad total y constantes hídricas, se desprende que este suelo presenta muy buenas propiedades físicas, donde existe un buen equilibrio en la distribución de los poros capilares y no capilares útiles, lo que le confiere al suelo una buena aireación y una alta capacidad de retención de agua, la que disminuye considerablemente bajo los 30 cm. Son suelos fuertemente ácidos en superficie y se van haciendo ligeramente ácidos en profundidad. El fósforo constituye el elemento más crítico, problema que se acentúa en los horizontes inferiores por los altos contenidos de aluminio y hierro extractables (INIA 1985).

El rodal de Catanlí posee suelos con textura franco limosa y estructura granular en el horizonte A y de bloques subpoliédrica débil a masiva en el resto del perfil. Es común encontrar gravas, guijarros y rocas en la superficie y en el perfil del suelo. Los valores de densidad aparente son de 0,8 gr/cm³ en el horizonte A y descienden a 0,6-0,7 g cm⁻³ a mayor profundidad, con una porosidad de 75 a 85% del volumen. Estas características permiten inferir que son suelos con alta capacidad de agua aprovechable (200-250 mm), buen drenaje y aireación, lo que asegura una fácil arraigabilidad (Ríos 2008).

4.2 Muestreo en terreno

4.2.1 Diseño experimental

Considerando las experiencias de otros estudios se determinó un tamaño muestral de 18 árboles por rodal. Para seleccionar este número de individuos, se realizó una parcela rectangular de 1000 m², donde:

- Se midió solo el DAP (diámetro a los 1,3 m de altura) de todos los árboles.
- Se seleccionaron los 400 árboles de mayor diámetro en cada rodal.
- Se calculó la media del DAP y desviación estándar para los árboles seleccionados.
- Al promedio del DAP se sumaron dos desviaciones estándar para así obtener los cinco árboles del promedio superior, luego se restaron al promedio dos desviaciones estándar obteniéndose los cinco árboles del promedio inferior, y los ocho árboles restantes corresponden a los más cercanos al promedio.
- Los árboles seleccionados debían estar libre de defectos como bifurcaciones, daños bióticos y abióticos.

4.2.2 Medición y extracción de muestras

Una vez que se realizó la selección de los 18 individuos se procedió a la toma de muestras, consistente a tarugos y discos que se obtuvieron mediante el siguiente procedimiento:

- Medición del DAP (cm).
- Medición del Tiempo de Vuelo (TdV) mediante el equipo Fakopp® (Figura 3), descrito en detalle en el subpunto 4.2.3.
- Extracción mediante un taladro de incremento un tarugo de 12 mm de diámetro, a la altura del DAP, el cual fue identificado y colocado en una caja para que no sufra daños. Al momento de extraer el tarugo, la persona se situó en el sentido de la cota y no a favor o en contra de la pendiente.
- Volteo del árbol y medición de la altura del individuo hasta un índice de utilización de 10 cm y su altura total (Figura 2).
- Marcación de donde se extraen las rodela cada un metro y al 1,3 m (Figura 2), para quien este a cargo de la extracción no tenga problemas en el corte de los discos, luego de lo indicado en el punto siguiente.

- El primer corte fue a los tres metros para dejar una troza en que se realizó la medición de velocidad (km s^{-1}) mediante el instrumento HM Director 200.
- Se seccionó el individuo como lo expresa la Figura 2.
- Se cortaron los discos desde el DAP hasta la altura de un índice de utilización de 10 cm (Figura 2).
- Se extrajo una sección de 50 cm de largo bajo el DAP para la posterior obtención de probetas que sirven para determinar el *stiffness* de la madera (MOE).
- Identificación y descortezado de cada disco.

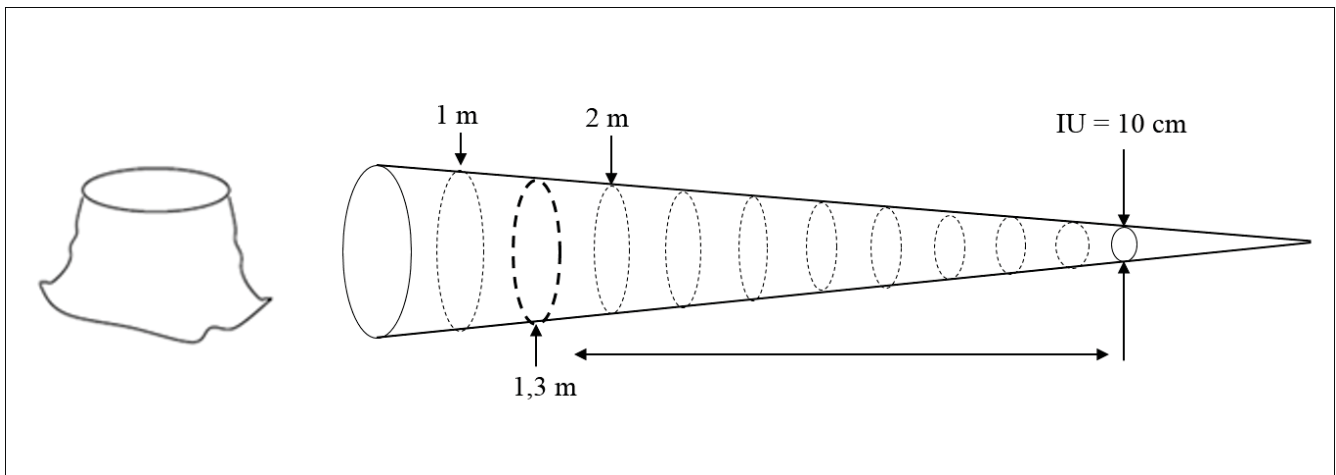


Figura 2. Posiciones de donde se extrajeron los discos, donde IU es Índice de Utilización.

4.2.3 Medición del Tiempo de Vuelo (TdV) y Velocidad (HM Director 200)

La determinación del Módulo de Elasticidad se realizó de manera indirecta midiendo el TdV con el equipo origen húngaro llamado *Fakopp microsecond tree sonic*, usando el siguiente procedimiento:

- El instrumento consta de dos cátodos, un acelerómetro receptor ubicado a 0,8 m sobre el suelo y un acelerómetro transmisor insertado en el tronco del árbol a 1,8 m sobre el suelo (50 cm por sobre el DAP y 50 cm por debajo del DAP) (Figura 3).
- Se realizó un pequeño golpe con un martillo en el acelerómetro transmisor.
- Registro del valor de la velocidad de la onda longitudinal.
- Se obtuvo cuatro mediciones de tiempo sónico (TdV) y luego se trabajó con el promedio de los cuatro valores.
- Una vez finalizada la medición sacar cada cátodo.

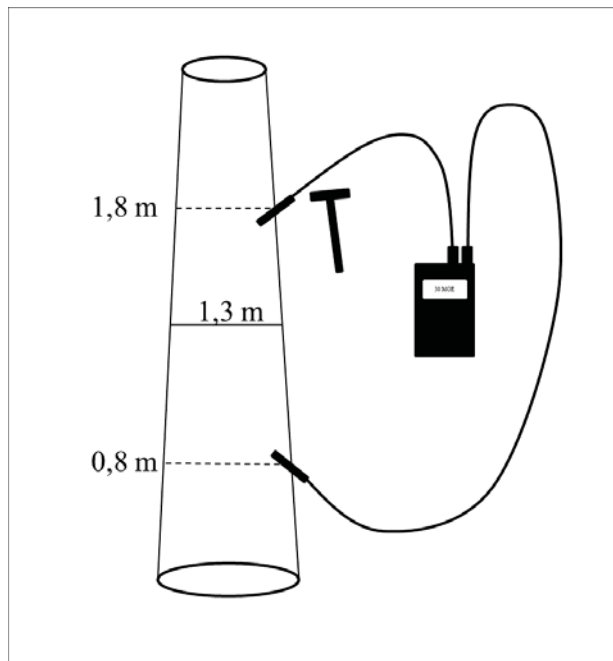


Figura 3. Medición del Tiempo de Vuelo a través del instrumento Fakopp®.

- El valor de la velocidad se obtuvo a través del instrumento HM Director 200, mediante el siguiente procedimiento:
 - Se inmovilizó la troza de tres metros (Figura 4).
 - Se colocó el equipo HM Director 200 en el diámetro superior de la troza (Figura 4).
 - Golpear con el martillo en uno de los extremos de la troza, donde el instrumento entrega un valor con un grado de significancia, para efectos del estudio este debe ser mayor a un 90% (ideal 99%).

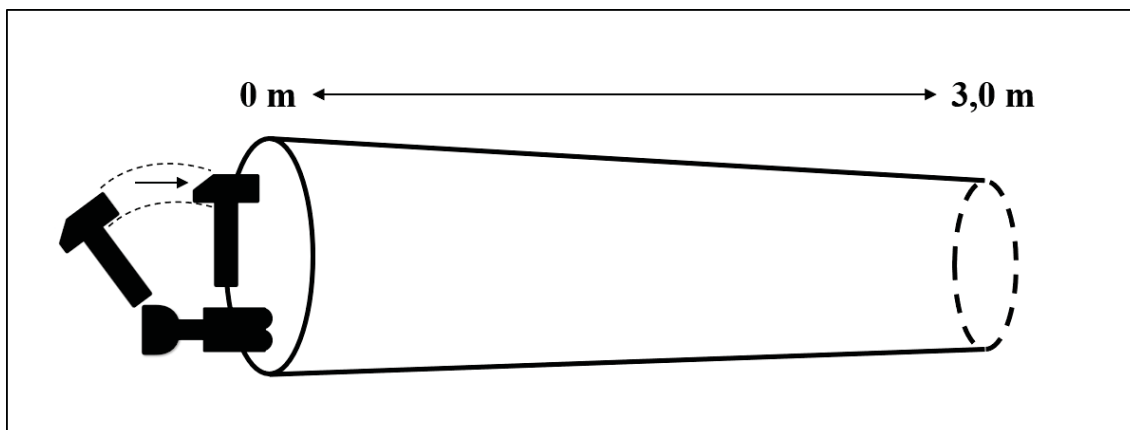


Figura 4. Muestra de largo de 3 m necesario para obtener la velocidad con el instrumento HM Director 200.

4.3 Trabajo de laboratorio

4.3.1 Procedimiento para la obtención de la Densidad básica de la madera

- Se saturaron de humedad todos los discos para luego determinar el volumen húmedo (método desplazamiento de agua). Quitar el exceso de agua superficial inmediatamente antes de hacer la determinación del volumen saturado.
- Se secó cada disco en estufa a 103 °C durante 24 horas o más hasta lograr peso constante, con esto se obtuvo el peso seco o peso anhidro.
- Al tarugo se le realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente.
- El cálculo de la densidad básica se detalla en el punto 5.1 formula número [1].

4.3.2 Proceso para obtener las probetas que determinan el Módulo de Elasticidad

- De la sección de 50 cm que se extrajo bajo el DAP, se procedió a la confección 4 probetas para cada árbol, luego se trabajó con el promedio de estas mismas.
- Cada probeta debe tener su eje longitudinal paralelo a la dirección de la fibra con dos de sus caras opuestas, paralelas a los anillos de crecimiento, a partir del sexto anillo (Figura 5).
- El estudio fue basado en la norma DIN 52 186, donde las dimensiones de las probetas son de 20 mm de ancho y alto, largo 440 mm (Figura 5).

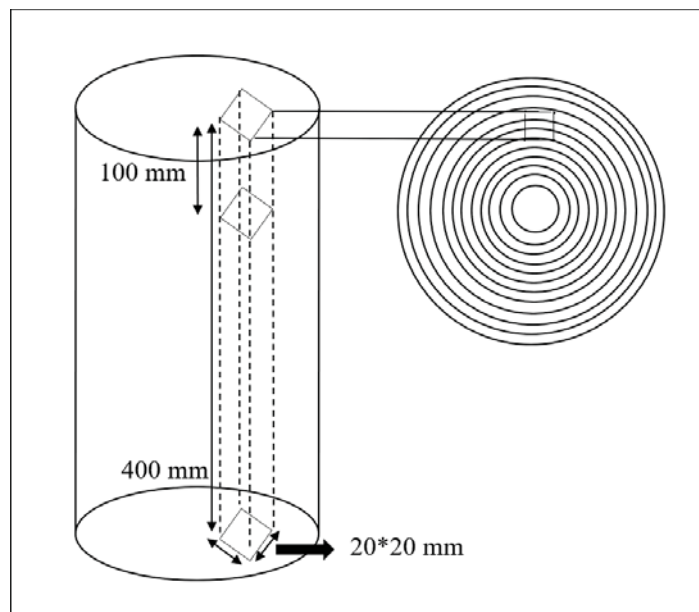


Figura 5. Muestra donde se extrajo la probeta y sus dimensiones.

- Ya obtenidas las probetas, estas fueron sometidas a una cámara de clima durante un periodo de 10 días, hasta tener una humedad constante de 10 a 12 % (medido con un Xilohigrómetro, antes de efectuar el Ensayo de Flexión estático).
- Una vez acondicionadas las probetas se procedió a realizar los ensayos de flexión estática. Las probetas deben utilizar una luz “L” de ensayo de 300 mm y aplicar la carga en el centro de la luz. Cabe destacar que la fibra de cada probeta debe situarse perpendicular a la carga (Figura 6).
- Posterior al Ensayo de Flexión estático se extrajo de la probeta una sección de 100 mm de largo y de 20 mm de ancho y alto, ello para determinar la densidad al 12% de humedad (Figura 5).

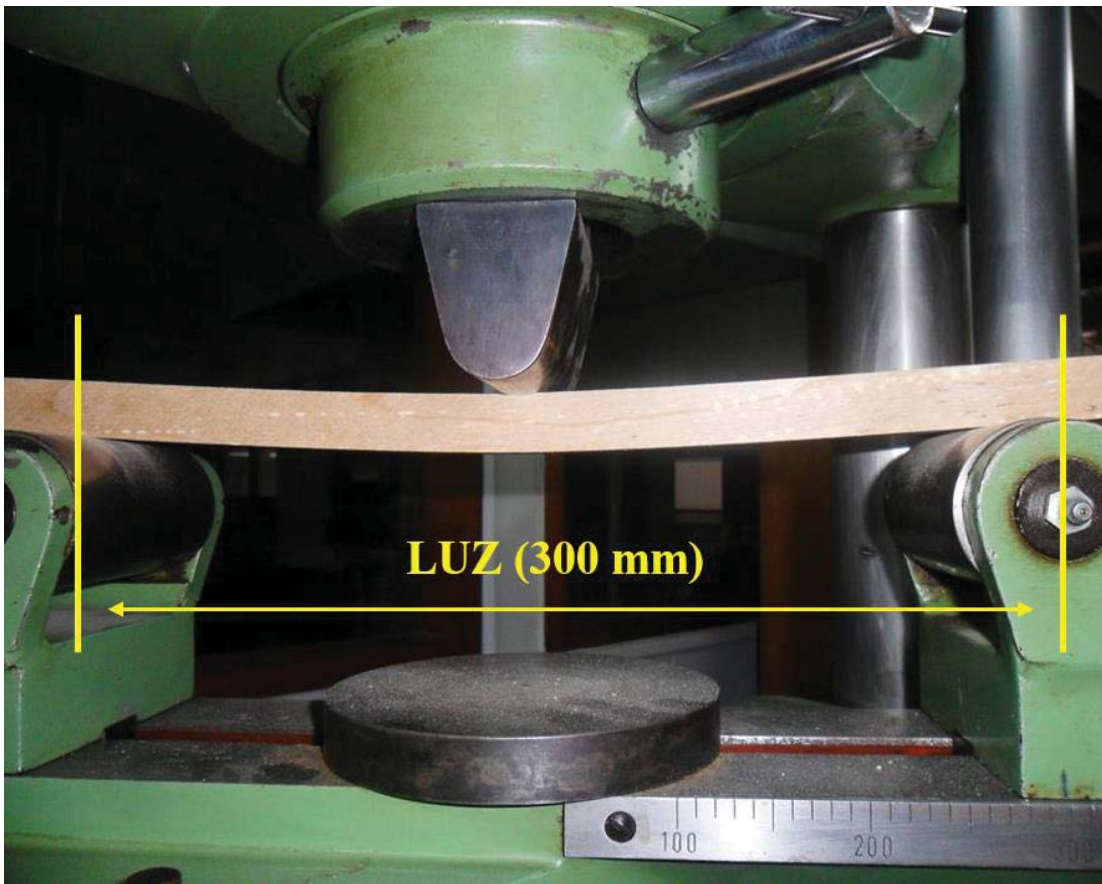


Figura 6. Máquina de Ensayo de Flexión estático, donde muestra cómo debe estar posicionada la probeta.

5. CÁLCULO DE VARIABLES Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

5.1 Cálculo de variables

El cálculo de variables como: densidad básica [1], densidad al 12% de Contenido de Humedad [2], velocidad en función del Tiempo de Vuelo [3] y el Módulo de Elasticidad en ambos instrumentos [4], permiten conocer el comportamiento en parte de las propiedades físico-mecánicas que posee *Nothofagus alpina*, posterior a ello se realizó el análisis estadístico correspondiente.

Calculo de la Densidad básica de la madera, donde:

DB: Densidad Básica (g cm^{-3})

PS: Peso Seco (g)

VSa: Volumen Saturado (cm^{-3})

$$DB = \left(\frac{PS}{VSa} \right) \quad [1]$$

Determinación de la densidad al 12% de Contenido de Humedad, donde:

ρa : Densidad al 12% de Contenido de Humedad (g cm^{-3}).

Masa: peso seco de la probeta (g).

A: ancho de la probeta (cm)

H: alto de la probeta (cm)

L: Largo de la probeta (cm)

$$\rho a = \frac{\text{masa}}{A \times H \times L} \quad [2]$$

Estimación de la velocidad a través del Tiempo de Vuelo mediante el equipo *Fakopp microsecond tree Sonic*, Dónde:

V: Velocidad (Km s^{-1})

TdV: Tiempo de Vuelo (μs)

$$V = \frac{1000}{TdV} \quad [3]$$

Calculo del Módulo de Elasticidad a través del instrumento *Fakopp microsecond tree Sonic* y HM Director 200, donde:

MOE: Módulo de Elasticidad (GPa)

V: Velocidad (km s⁻¹)

ρ : Densidad verde (Ton m⁻³)

$$MOE = V^2 \times \rho \quad [4]$$

5.2 Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó con el *software* R estudio versión 3.1.0, donde los datos se agruparon en dos grupos (correspondientes a cada sector) teniendo un “n” de 18 árboles por rodal. Se realizó la prueba de normalidad Shapiro–Wilk, que consiste en rechazar o aceptar la hipótesis nula, si el p-valor es menor a alfa (P< 0,05) indica que los datos no presentan una distribución normal, por el contrario, si este valor es superior a alfa (P> 0,05) pertenece a una distribución normal; a cada variable acorde a su tamaño muestral se le realizó esta prueba, como resultado mostró que todas presentan una distribución normal por lo que se utilizó estadística paramétrica.

H0 = $\mu_1 = \mu_2$ (la población presenta una distribución normal)

H1 = $\mu_1 \neq \mu_2$ (la población no presenta una distribución normal)

La estadística paramétrica se divide en variables cualitativas y cuantitativas, para efecto de este trabajo se utilizó como carácter cualitativo *Analysis of Variance* (ANOVA o ANDEVA) y como carácter cuantitativo el test de Duncan, con ello se determinó las diferencias significativas para un P< 0,01 y P< 0,05, y la variación que representa cada variable; estas fueron comparadas dentro del mismo sitio y entre sitios (análisis de densidad y Modulo de Elasticidad).

Posterior a ello se confeccionó una formula estimadora del Módulo de Elasticidad para cada rodal que está en función del Tiempo de Vuelo, este se realizó mediante un análisis de regresión con el *software* R estudio y *Microsoft Excel* 2010 obteniendo la variación entre el MOE del Ensayo de Flexión Estático (método directo) y el MOE registrado con el equipo *Fakopp microsecond tree Sonic* (método indirecto).

6. RESULTADOS

6.1 Descripción de rodales muestreados

El rodal de Pelchuquín corresponde a un vivero abandonado, presenta una distribución de tipo jota inversa (curva típica de renovales o bosques secundarios) (Figura 7), la densidad completa del rodal es de 2200 árboles por hectárea, y la densidad potencial (DAP > 10 cm) de árboles productivos es de 1110 árboles por hectárea con un diámetro promedio de 14,41 cm, el promedio de los 18 árboles muestreados fue de 15,76 cm (Cuadro 4). El rodal en Catanlí es una plantación que presenta silvicultura intensiva, donde la curva corresponde a una distribución normal (Campana de Gauss) típica de una plantación coetánea (Figura 7), donde la mayor concentración de individuos está entre los 14 a 18 cm, con una densidad de 1120 árboles por hectárea, con un diámetro promedio de 16,02 cm, el promedio de los 18 árboles muestreado es de 18,63 cm (Cuadro 4).

Cuadro 4. Variación del diámetro a nivel de rodal y para los 18 árboles muestreados, para un $P < 0.05^*$.

Variable/Sector	Pelchuquín	Catanlí
Promedio rodal	14,4	16,0
Promedio 18 árboles seleccionados	15,8	18,6*
Coefficiente de Variación	12,0	8,2
Min	13,1	16,3
Max	19,0	21,0
Número total de árboles (ha)	1110	1120

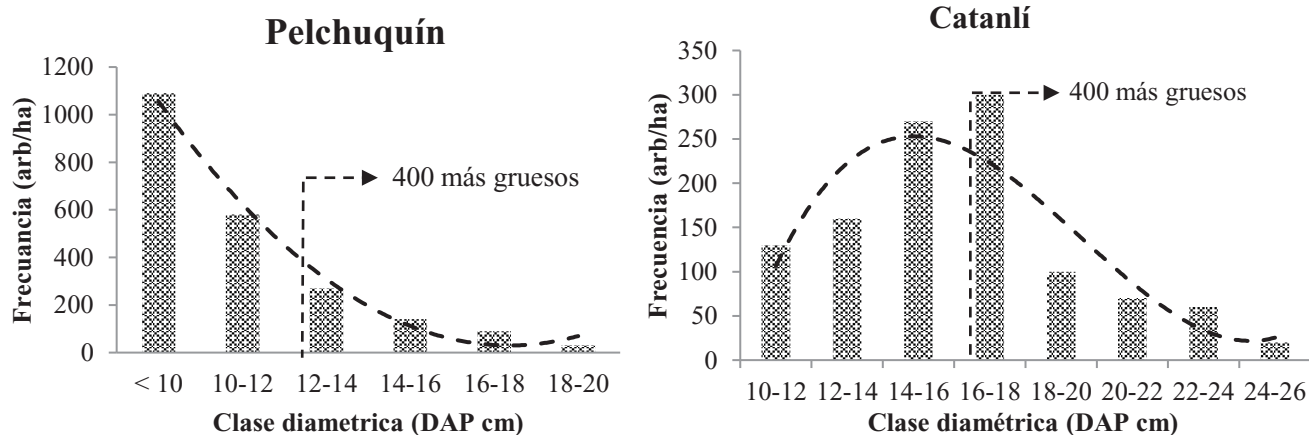


Figura 7. Distribución diamétrica presente en Pelchuquín y Catanlí.

6.1.1 Variación de la Altura Total y Altura Comercial (árboles muestreados)

La altura total fue un 13% mayor en el rodal de Pelchuquín, mientras que la altura comercial (correspondiente a un índice de utilización de 10 cm) fue un 28,2% mayor en Pelchuquín valor que expresa una diferencia de dos metros entre rodales (Cuadro 5), habiendo diferencias significativas ($P < 0,05$). Resultado esperado dado que el rodal muestreado en Pelchuquín es de mayor edad.

Cuadro 5. Variación de la Altura total y Comercial (Índice de utilización de 10 cm) en cada rodal, correspondiente a los 18 árboles seleccionados. $P < 0,05^*$.

Variable/indicador	Altura Total (HT m)		Altura Comercial (m) (IU 10 cm)	
	Pelchuquín	Catanlí	Pelchuquín	Catanlí
Promedio	16,5*	14,6	9,1*	7,1
CV (%)	5,1	10,1	20,2	14,4
Mediana	16,7	15,0	8,8	7,2
Mínimo	15,1	11,9	6,4	5,0
Máximo	18,2	17,0	13,1	8,6

6.2 Densidad básica de la madera con discos (árbol completo)

La densidad básica a nivel de rodal fue mayor en Catanlí, existiendo una diferencia de un 4,7% entre rodales (Cuadro 6), existiendo diferencias significativas ($P < 0,05$). En ambos rodales la densidad básica disminuyó a medida que la muestra sube en el sentido de la altura del árbol (Figura 8), ambos sitios presentan la misma tendencia negativa. El coeficiente de determinación en ambos sectores fue alto ($R^2 > 80\%$). El coeficiente de variación fue bastante similar entre ambos sitios, entre 2,4 y 3,1 %.

Cuadro 6. Variación de la Densidad Básica (kg m^{-3}) en cada rodal. Valor de significancia $P < 0,05$.

Variable/Sector	Pelchuquín	Catanlí
Promedio	405,8	424,8*
Mediana	402,8	424,1
CV (%)	3,1	2,4
Mínimo	392,5	402,8
Máximo	434,6	438,2

Si bien en todas las alturas del fuste la densidad básica en Catanlí fue mayor, las diferencias son estadísticamente significativas desde los 4 metros hasta los 8 metros (Figura 8).

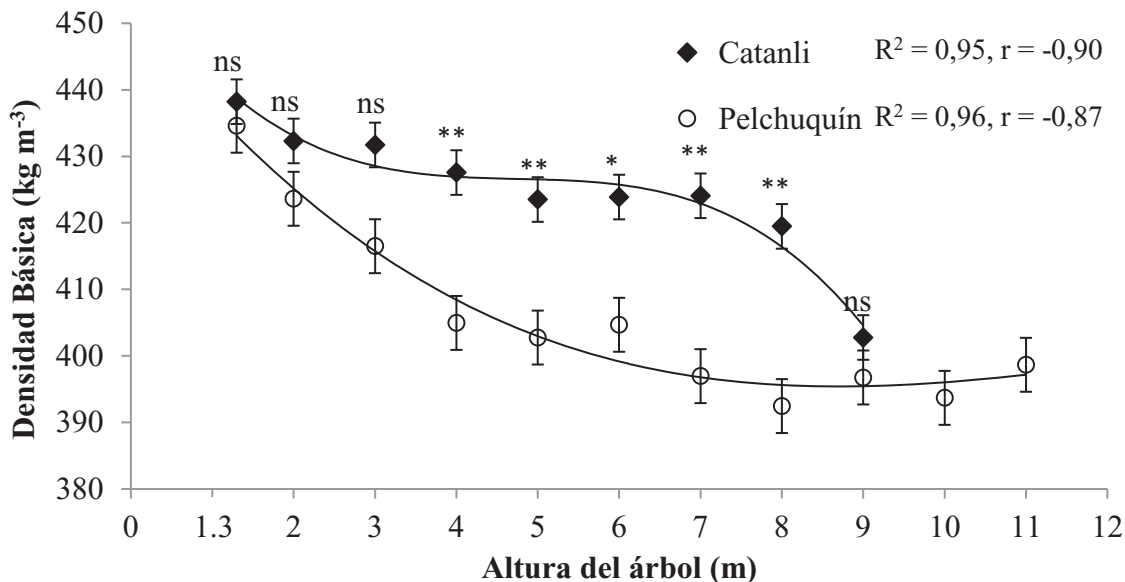


Figura 8. Variación de la Densidad Básica determinada con discos hasta la altura comercial (Índice de utilización de 10 cm) en cada rodal. P < 0,05*, P < 0,01** y ns: no significativo.

La relación entre la densidad básica promedio del árbol completo y el DAP fue inversa en el rodal de Pelchuquín (Figura 9), no significativo (P valor = 0,14), en cambio Catanlí la relación fue baja pero directa (Figura 9), sin presentar diferencias significativas (P valor = 0,36).

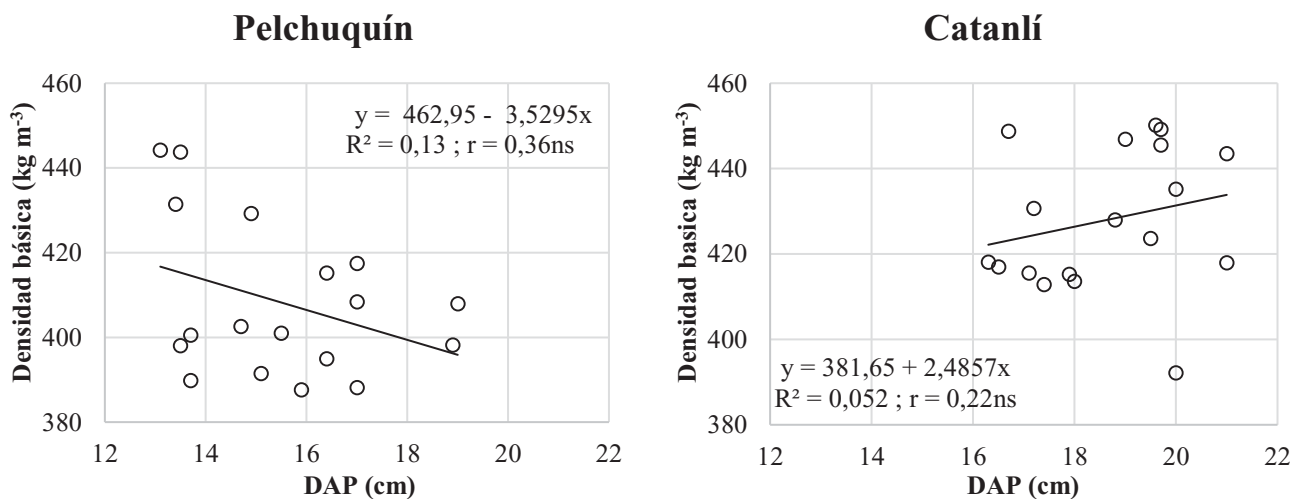


Figura 9. Relación entre densidad básica promedio del árbol completo versus DAP (cm), ns: no significativo.

6.2.1 Densidad Básica al DAP, determinada con Disco y Tarugo

En Pelchuquín la densidad básica del tarugo fue un 3,4% (14,7 kg m⁻³) menor que la del disco al DAP, mientras que en el rodal de Catanlí el tarugo fue solamente un 0,2% menos denso, no siendo una diferencia significativa. El coeficiente de variación para ambos sectores y métodos varió entre 3,8 y 5,2 % (Cuadro 7).

Cuadro 7. Variación de la densidad Básica del Disco y del Tarugo (kg m⁻³) a la altura del DAP en cada rodal, utilizando un valor de significancia de p< 0.05*, ns: no significativo (ANOVA).

Variable/Indicador	Pelchuquín		Catanlí	
	Disco	Tarugo	Disco	Tarugo
Promedio	434,6*	419,9	438,2ns	437,3
Mediana	434,4	417,4	441,5	431,8
CV (%)	5,1	4,7	3,8	5,2
Mínimo	401,8	383,4	409,9	405,0
Máximo	480,8	459,8	467,2	474,4

La correlación de la densidad básica entre el disco y tarugo (Figura 10), en ambos rodales fue directamente proporcional, no obstante en Pelchuquín la pendiente de la función fue mayor y también alcanza un coeficiente de determinación un poco más alto ($R^2 = 0,78$).

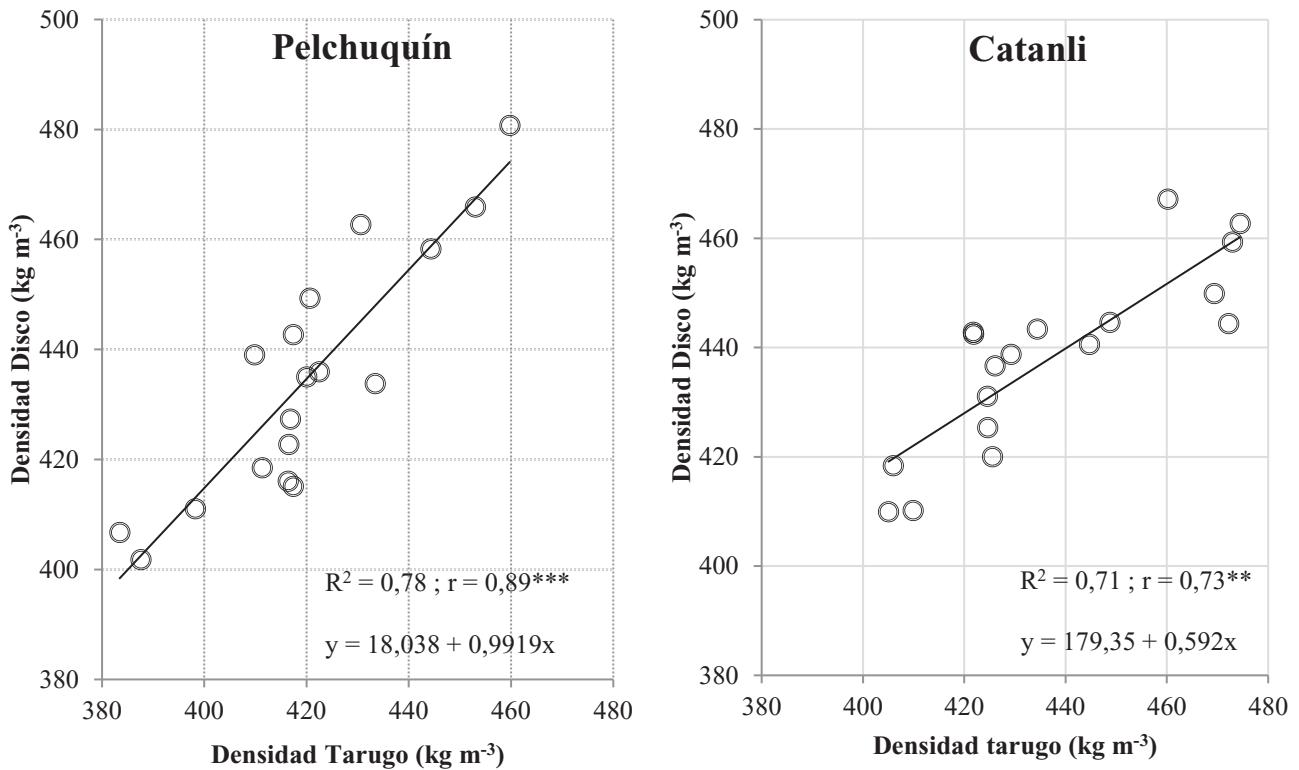


Figura 10. Variación de la Densidad básica del Disco y el Tarugo a la altura del DAP en cada sector. R^2 : Coeficiente de Determinación y r : Coeficiente de correlación de Pearson. Para un valor de significancia $P < 0,001^{**}$, $P < 0,0001^{***}$.

6.3 Tiempo de Vuelo (TdV) y velocidad, determinado con Fakopp® y HM Director 200

El TdV presentó diferencias entre los rodales, Catanlí fue un 9,2% mayor y también con un mayor nivel de variación (5,1%) (Cuadro 8). Producto de los resultados aquí obtenidos, en el disco ubicado al DAP se decidió determinar el número de anillos que logró la inserción de la aguja, en Pelchuquín fueron 9 anillos mientras que Catanlí solo fueron 5 anillos en promedio.

La velocidad medida a través del equipo HM Director 200 mostró una leve, Pelchuquín registró un 3,1% de mayor velocidad que Catanlí ($3,3 \text{ km s}^{-1}$ Pelchuquín y $3,2 \text{ km s}^{-1}$ Catanlí). El mayor coeficiente de variación también fue registrado en Pelchuquín con 3,4 % (Cuadro 8). Como era de esperar, la relación de valores entre ambos instrumentos es inversa (Figura 11), habiendo mayor diferencia entre equipos en el rodal de Pelchuquín.

Cuadro 8. Variación del Tiempo de Vuelo (μs) y Velocidad (km s^{-1}) para cada sector. Para un valor de significancia $P < 0,05^*$, $P < 0,001^{**}$.

	<i>Fakopp microsecond tree Sonic</i> (TdV)		HM Director 200	
	Pelchuquín**	Catanlí	Pelchuquín*	Catanlí
Promedio	247,9	270,7	3,3	3,2
Coeficiente de variación (CV %)	3,2	5,1	3,4	1,1
Mínimo	234,8	253,3	3,1	3,1
Máximo	262,3	309,8	3,5	3,3

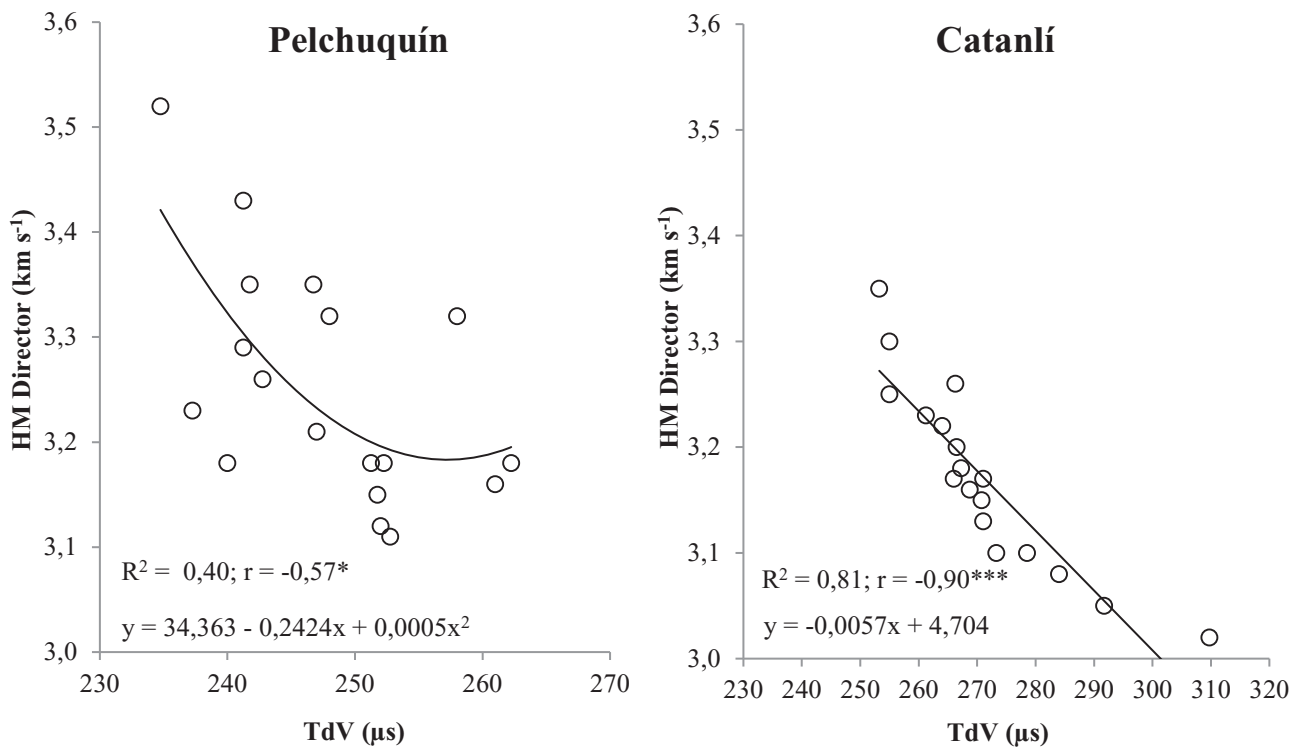


Figura 11. Relación del TdV y Velocidad en cada rodal muestreado. Donde, R^2 : Coeficiente de Determinación, r : Coeficiente de correlación de Pearson. $P < 0,05^*$, $P < 0,001^{**}$, $P < 0,0001^{***}$.

6.4 Módulo de Elasticidad

Se comparó el Módulo de Elasticidad bajo los tres métodos empleados en el estudio, donde los mayores valores medios corresponden al rodal de Pelchuquín con 16,3 GPa (Fakopp®), 10,6 GPa (HM Director 200) y 10,9 GPa (Ensayo de Flexión) (Figura 12) (Anexo 7), con un coeficiente de variación de 6,4 %, 7,0 % y 17,6 % respectivamente. Catanlí presentó los valores promedios de 13,7 GPa (Fakopp),

10,1 GPa (HM Director 200) y 8,1 GPa (Ensayo de Flexión) (Figura 12) (Anexo 7), con un coeficiente de variación de 9,4 %, 5,5 % y 12,9 % respectivamente. La variación del MOE sostuvo diferencias significativas en la aplicación entre las distintas metodologías de medición directa e indirectas, y entre sitios, es importante destacar que en cada sector los valores más altos de MOE fueron obtenidos a través del instrumento Fakopp® (método no destructivo), con una diferencia entre 5,4 y 5,6 GPa respecto al valor real de la muestra de laboratorio (Cuadro 9).

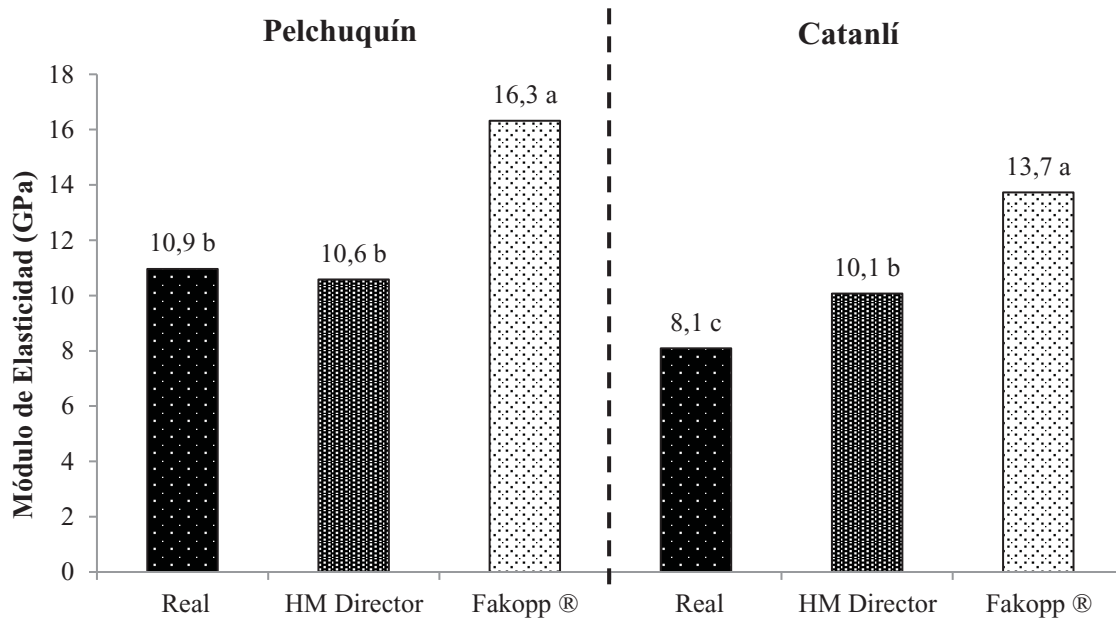


Figura 12. Variación del Módulo de Elasticidad al aplicar los tres métodos respecto a cada sitio, para un valor de significancia ANOVA $P < 0,001^{**}$.

Respecto a la interacción sitio-método (cuadro 10), entre el Ensayo de Flexión y los métodos indirectos HM Director 200 y Fakopp® para medir el MOE, se desprende que para el rodal de Pelchuquín el instrumento HM Director 200 disminuyó en 2,8 % (0,3 GPa) y el Fakopp aumentó un 49,5% (+5,4 GPa) (Cuadro 9), en Catanlí el HM Director aumentó en un 24,7% (2 GPa) y el Fakopp® en 69,1% (+5,6 GPa) (Cuadro 9).

Por otra parte, la aplicación del mismo método en condiciones de sitio diferentes, el Módulo de Elasticidad siempre fue inferior en el rodal de Catanlí respecto al rodal de Pelchuquín independiente del método empleado (Cuadro 9).

Cuadro 9. Variación del Módulo de Elasticidad entre sitios y metodologías, donde GPa: Giga Pascales.

Sitio/Método	Ensayo de Flexión	HM Director 200	Diferencia GPa – (%)	Fakopp®	Diferencia GPa – (%)
Pelchuquín	10,9	10,6	0,3 – (2,8)	16,3	5,4 – (49,5)
Catanlí	8,1	10,1	2 – (24,7)	13,7	5,6 – (69,1)
Diferencia GPa – (%)	2,8 – (34,6)	0,5 – (5)	---	2,6 – (19)	---

7. DISCUSIÓN

7.1 Variación del DAP y Altura

El rodal de Pelchuquín presentó una curva típica de Bosques secundarios, jota inversa (Renoval) (Figura 7), esto es el resultado de un ex vivero abandonado y por lo tanto su dinámica de crecimiento simula las condiciones de crecimiento similares a lo que es un renoval de *N. alpina*. El rodal muestreado en Catanli presenta una curva en forma de Campana de Gauss (Figura 7) la que muestra un comportamiento típico de una plantación coetánea. El promedio del DAP fue mayor en el predio de Catanli mostrando diferencias significativas respecto a Pelchuquín, ello se debe a la aplicación de silvicultura intensiva presente en el rodal de Catanli; en cuanto al coeficiente de variación fue mayor en el predio de Pelchuquín, esto puede ser explicado en parte por la competencia por recursos presentes en el rodal. Ríos 2008 expresa que el crecimiento de *N. alpina* se ve fuertemente favorecido al aplicar silvicultura intensiva, el rodal de Catanli se caracteriza por presentar tratamientos silvícolas como: raleo, poda, fertilización y control de malezas, favoreciendo distintos recursos como aire, agua, nutrición y luminosidad, como resultado se obtiene un incremento en el DAP a menor edad, en cambio el rodal de Pelchuquín que no presenta tratamiento silvícola obtuvo valores de DAP promedios inferiores. Reyes *et al.* (2007) registró un valor promedio del DAP en plantaciones de Raulí de 16,5 cm con un espaciamiento de 4 x 4 m a la edad de 20 años ubicado en predio Las palmas, y Donoso (1993) registró un valor promedio del DAP en renovals de *N. alpina* de 16,5 cm a la edad de 21 años, dichos valores comparados a los rodales muestreados, donde Pelchuquín a la edad de 18 años expresó una diferencia de dos centímetros menos, en cambio al rodal de Catanli presenta una diferencia de dos centímetros más (Cuadro 4) a la edad de 12 años respecto a los estudios mencionados, ello denota que el sitio y la silvicultura intensiva juegan un rol fundamental en el crecimiento de *N. alpina*. Respecto a la altura total, Catanli presentó un valor promedio de 14,6 m y el rodal de Pelchuquín 16,5 m (Cuadro 5), estos valores son cercanos a los determinados por Contreras *et al* (1996) en una plantación que posee una edad de 17 años situada en las cercanías de Panguipulli con una altura promedio de 15,3 m. Es importante destacar que existen dos metros de diferencias entre rodales, esta diferencia es explicada por que el rodal de Pelchuquín tiene seis años más que Catanli.

Para determinar el número de individuos a ser seleccionados en futuros estudios se determinó como variable de interés el MOE del Ensayo de Flexión estático debido a que presenta el mayor coeficiente de variación, teniendo como resultado un tamaño muestral de 30 árboles, para un error de 5%

$t = (n-1), (1-\alpha/2)$. Pereyra y Gelid (2002) y Doldán (*et al.* 2010) determinaron un número de 25 árboles, en cambio Weber (2005) seleccionó 6 árboles.

7.2 Densidad básica de la madera con discos (árbol completo)

La Densidad Básica disminuyó a medida que la muestra aumenta en altura, ambos rodales presentan la misma tendencia (Figura 8). Megraw (1985) y Downes *et al.* (1997) destacan que la densidad básica posee un patrón de variación con la edad y la altura, de tal manera que durante los primeros años el árbol produce madera juvenil de baja densidad, por otra parte a medida que la edad aumenta la densidad de la madera es mayor, en cuanto a la altura esta puede disminuir o aumentar dependiendo de la especie, un ejemplo de ello es Pino radiata que presenta un comportamiento similar al obtenido en este estudio, en cambio existen otros casos como el género Eucaliptus spp. donde su comportamiento es contrario donde la densidad aumenta a medida que aumenta la altura.

La densidad básica en el rodal de Catanlí promedió $424,8 \text{ kg m}^{-3}$, mientras que el rodal de Pelchuquín fue de $405,8 \text{ kg m}^{-3}$ (Cuadro 6), valores comparables a los obtenidos por otros autores, Baradit *et al.* (2013) registró valores de densidad básica entre los 509 a 553 kg m^{-3} en especies nativas a edades no informadas (Cuadro 1), Droppelmann (2007) y Diaz-Vaz (2009) registraron valores de 383 y 480 kg m^{-3} en plantaciones de Pino radiata (Cuadro 1). Al comparar la densidad básica entre sitios el resultado no fue el esperado dado que por tener mayor edad los árboles muestreados en el rodal de Pelchuquín deberían haber tenido mayor densidad básica y ello no ocurrió. Dadas estas condiciones dicha diferencia puede ser explicada por otros factores como: condiciones de sitio (clima, suelo y vegetación), prácticas silvícolas, madera de tracción Diaz-Vaz (2011). Se sugiere para otros estudios medir la densidad dentro de los anillos y otros aspectos anatómicos, dentro de estos últimos Zobel y Talbert (1984) mencionan la cantidad de vasos dentro de los anillos.

La densidad determinada al 12 % de contenido de humedad fue mayor en el rodal de Pelchuquín que en Catanlí, con 514,64 y $485,64 \text{ kg m}^{-3}$ respectivamente, esta diferencia está dada por la localización de la obtención de la probeta, en el caso de Pelchuquín la probeta contiene mayor edad y por lo tanto mayor proporción de madera tardía, Megraw (1985) denota que la cantidad de madera temprana y tardía, tamaño de las fibras, espesor de pared celular, edad, tipo y diámetro de células, son factores que influyen directamente en la densidad de la madera, Knigge & Schulz (1966) indican que el porcentaje de leño tardío influye de manera más directa en la densidad básica y consecuentemente en la resistencia. Diaz-Vaz (1987) obtuvo un valor promedio de densidad básica al 12% de 550 kg m^{-3} para *N. alpina* valor

superior al obtenido en el presente trabajo, sin embargo se desconoce información como la edad, sitio y condiciones de crecimiento, sección de donde fue extraída la muestra lo más probable es que dicha muestra proviene de un bosque nativo de mucho mayor edad.

7.2.1 Variación de la Densidad básica al DAP determinada por discos y tarugos

De acuerdo con los coeficientes de determinación obtenidos se determinó que la densidad registrada a través del tarugo es un buen indicador de la densidad completa del disco (Figura 10). En el caso del rodal de Catanlí el valor del tarugo es muy similar al de la rodela, eso sugiere una menor diferencia entre la zona central y la periferia, en cambio en Pelchuquín con mayor edad la diferencia es mayor entre la zona central y la periferia, todo esto ocurre porque en un tarugo existe una menor proporción de madera lateral. Por lo anterior es que en Pelchuquín el tarugo subestima la densidad, es decir, no contiene la proporcionalidad de los tipos de madera, representando menos madera de la zona perimetral del árbol.

El valor promedio de densidad básica registrado a través del tarugo fue de $437,3 \text{ kg m}^{-3}$ con un coeficiente de variación de 5,2 % en Catanlí (Cuadro 7). A modo de comparación, Droppelmann (2007) estudió un rodal de 19 años de *Pinus radiata* ubicado en la misma zona geográfica y sitio similares al presente estudio, obteniendo $368,8 \text{ kg m}^{-3}$ con un coeficiente de variación de 6,1 % para los primeros 12 años y 388 kg m^{-3} para el tarugo completo (19 años), como era esperar estas edades juveniles de Raulí presentan siempre densidades superiores a las de *Pinus radiata* para edades equivalentes.

7.3 Comparación de la Velocidad y Tiempo de Vuelo

Tal como era esperable la relación entre el Velocidad (HM Director 200) y Tiempo de Vuelo (Fakopp®) en ambos rodales es negativa con $R^2 = 0,40$, $r = -0,57$ (Pelchuquín); $R^2 = 0,81$, $r = -0,90$ (Catanli) (Figura 11) teniendo mejor grado de asociación en el sector de Catanli. Mora *et al* (2009) utilizando los mismos equipos también encontró un $R^2 = 0,81$, idéntico al valor determinado para Catanli.

El equipo Fakopp® registró los menores valores de TdV en Pelchuquín (Cuadro 8), esto podría explicarse porque la onda viaja en la sección lateral del árbol, zona que se caracteriza por estar libre de madera juvenil y su ángulo microfibrilar es mucho más recto, Anónimo (2006) denota la misma información explicada anteriormente. Valenzuela *et al* (2003) analizó el ángulo microfibrilar para Pino radiata y determinó que los mayores ángulos se registran en la cercanía a la médula y disminuyen gradualmente hacia el perímetro, el mayor descenso se genera entre los años 15 y 17 años, esto concuerda

con los resultados de otros autores (Phillips, 1941; Walker y Butterfield, 1995). Donaldson (1993) y Pedini (1992) determinaron que los ángulos microfibrilares mayores se encontraron dentro de los primeros cinco a diez anillos de crecimiento a partir de la médula. Según Lindström (1996) las intervenciones silviculturales son una fuente de variación significativa en el ángulo fibrilar, Donaldson (1993) en un estudio de variación de ángulo microfibrilar con respecto a la edad, para valores máximos de ángulo microfibrilar que se presentan a determinadas edades, no pudo asignarlos a intervenciones silvícolas, el autor lo atribuye a factores ambientales desconocidos u otros no considerados.

7.4 Análisis comparativo del MOE entre instrumentos y sitios

Baradit *et al.* (2013) determinó valores promedios de Módulo de Elasticidad usando el instrumento de ultrasonido Steinkamp BP5 en latifoliadas a edades no informadas (Cuadro 2) donde los valores fluctúan entre 10,8 y 12,9 GPa, Navia (2006) determinó un valor medio de 7,2 GPa a través del instrumento *Fakopp tree Sonic* en plantaciones de Pino radiata a la edad de 8 años, Baltunis *et al.* (2007) a través del equipo SilviScan® obtuvo un MOE promedio de 6,1 GPa también en plantaciones de Pino radiata a la edad de 7 años, respecto al presente estudio el MOE obtenido a través de los equipo de ultrasonido HM Director 200 fue de 10,6 GPa (Pelchuquín) y 10,08 GPa (Catanlí) (Figura 12) valores cercanos a los obtenidos por Baradit *et al.* (2013), mientras que el instrumento Fakopp® registró un MOE de 16,3 (Pelchuquín) y 13,7 (Catanlí) (Figura 12), promedios que están por encima de los estudios antes mencionados. Baradit *et al.* (2013) también calculó el MOE en latifoliadas a través del Ensayo de Flexión (Cuadro 3) obteniendo valores que van desde los 7,9 GPa hasta 9,9 GPa, en cuanto a los rodales muestreados promediaron 8,1 GPa en Catanlí y 10,6 GPa en Pelchuquín (Figura 12), donde el MOE obtenido por raulí en este estudio es superior a varias especies nativas de Chile.

El equipo Fakopp® registró los mayores valores promedio de MOE en ambos rodales (Cuadro 9), esta diferencia es explicada por la diferencia de edades entre rodales, el número de anillos y ángulo microfibrilar, este último es mucho menor en la sección lateral, Valenzuela *et al* (2003) denota que la zona lateral del árbol generalmente la madera presenta un menor ángulo microfibrilar a partir de los 15 años, razón por la que la velocidad es mayor radicando en mayores valores de MOE, a diferencia del instrumento HM Director 200 que registró valores de Módulo de Elasticidad inferiores respecto al equipo Fakopp®, sin embargo resultaron ser mucho más cercanos al valor obtenido a través del Ensayo de Flexión Estático, ello está dado porque la onda del equipo HM Director 200 viaja en sentido longitudinal y transversal pasando por nudos, cicatrices, ramillas, entre otras imperfecciones que tenga la troza (Carter *et al.* 2015), sin embargo es importante destacar que no mostró un patrón de diferencias entre sitios.

Se determinó que el equipo Fakopp® expresó un diferencial de 5,4 GPa (Pelchuquín) y 5,6 GPa (Catanli) respecto al Ensayo de Flexión Estático (Cuadro 9), dado que su variación es similar en cada rodal. Los diferenciales serán considerados como el factor de corrección para su respectivo rodal, se sugiere realizar nuevos estudios para que los valores estimativos sean más exactos. Se confeccionó funciones estimadoras de MOE a nivel de rodal para ambos sectores en estudio en función del TdV registrado a través del equipo Fakopp®, rodal Pelchuquín [5] ($R^2 = 0,99$) y Catanlí [6] ($R^2 = 0,98$).

$$\text{MOE Pelchuquín} = 48,689 - 0,1306 * \text{TdV} - \text{FC} \quad [5]$$

$$\text{MOE Catanlí} = 38,911 - 0,093 * \text{TdV} - \text{FC} \quad [6]$$

Dónde:

MOE: Modulo de Elasticidad (GPa)

TdV: Tiempo de Vuelo (μs)

FC: Factor de Corrección

7.5 Comparación entre norma internacional versus Plantación de *N. alpina*

Al comparar los valores de MOE representados por la norma internacional de Nueva Zelanda para Ensayo de Flexión estático (Cuadro 10), con el presente estudio se determinó que, el rodal Pelchuquín clasifica en Calidad alta, mientras que el rodal Catanlí clasifica como Calidad media, ello demuestra que la madera de raulí en plantaciones jóvenes ya puede utilizarse como madera con fines estructurales.

Cuadro 10. Clasificación de maderas con fines estructurales acorde a la norma de New Zelanda para Pino radiata. Cuadro modificado por Meneses 2012.

Norma	Calidad alta	Calidad media	Calidad baja
Nueva Zelanda	MOE = 10,5	MOE = 8,0	MOE = 6,9

8. CONCLUSIONES

La Silvicultura intensiva favorece el crecimiento diametral de árboles en Catanlí expresando los mayores valores de DAP. La altura total y comercial es mayor en el rodal de Pelchuquín, estaría asociada a la mayor edad del rodal y su dinámica de crecimiento.

La Densidad básica fue mayor en el rodal de Catanlí con una diferencia de un 4,7% más que en el rodal de Pelchuquín, dicha diferencia puede ser explicada por otros factores como: condiciones de sitio (clima, suelo y vegetación), fertilización, prácticas silvícolas, pendiente, madera de tracción. La densidad al 12% de contenido de humedad demostró ser mayor en Pelchuquín. Se sugiere para otros estudios medir la densidad dentro de los anillos y estructura anatómica. La densidad básica no mostro ninguna relación significativa con el DAP.

La relación entre densidad básica obtenida entre el disco y tarugo es positiva en ambos rodales, por lo que la densidad obtenida por el tarugo es un buen indicador para estimar la densidad del disco.

La densidad básica disminuye a medida que las muestras son extraídas a mayor altura en el fuste, ambos rodales muestran la misma tendencia, pero con diferencias en la función resultante.

El MOE es mayor en el rodal muestreado de Pelchuquín independiente del método empleado. El equipo HM Director 200 promedió valores cercanos al Ensayo de Flexión estático, sin embargo es muy variable entre rodales, en cambio el instrumento Fakopp® sobrestimó el MOE respecto al Ensayo de Flexión estático, siendo ésta variación similar en ambos rodales. Se recomienda en mediciones futuras la aplicación del instrumento Fakopp® por que permitiría reducir los costos y tiempos de medición, sin embargo, es importante realizar nuevas mediciones en otros rodales para tener mayor precisión en los valores estimativos de este instrumento.

Acorde a la norma de Nueva Zelanda para la clasificación de maderas con fines estructurales para Pino radiata, el MOE obtenido en el Ensayo de Flexión estático en el rodal de Pelchuquín clasifica en calidad alta, mientras que el rodal de Catanlí clasifica en calidad media.

Los resultados obtenidos determinaron que las plantaciones jóvenes de raulí tienen un alto potencial en la utilización de madera con fines estructurales, de ahí la importancia de realizar nuevos estudios que permitan modelar y valorizar este tipo de plantaciones a diversas edades y condiciones silvícolas.

9. REFERENCIAS

- Anónimo. 2006. Guía de usuario Fakopp Microsencod Timer. Fakopp Enterprise, Agfalva, Hungría. 8 p.
- Baltunis, B., Wu, H., Powell, M. 2007. Inheritance of density, microfibril angle, and modulus of elasticity in juvenile wood of *Pinus radiata* at two locations in Australia. Canadian Journal of Forest Research. 37(11): 2164-2174.
- Baradit E., P. Niemz, A. Fernandez. 2013. Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido. Maderas. Ciencia y tecnología 15(2): 235-244.
- Butterfield, B.; Walker, J. 1995. The importance of microfibril angle for the processing industries. New Zealand Forestry. 4(4):34-40.
- Carter, Peter & Briggs, David & Ross, Robert & Wang, Xiping. (2015). Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. Consultado el 12 de septiembre del 2017. Disponible en la página web: <http://www.fibre-gen.com>.
- Carter, P.; X. Wang, R. Ross, D. Briggs. 2005. NDE of logs and standing trees using new acoustic tools. Technical application and results. Washington Publications 1-11.
- Chave J. 2006. Medición de Densidad en árboles tropicales. Université Paul Sabatier, Toulouse, France. Pag. 2.
- Contreras A., L. Otero, L. Barrales, I. Ojeda. 1996. Estudio de una plantación de raulí ubicada en el sector de Panguipulli y expectativas de crecimiento. Bosque 17(1): 3-7.
- CORMA. 2005. La construcción de viviendas de Madera. Consultado el 28 de mayo del 2013. Disponible en la página web: <http://descom.jmc.utfsm.cl/PROI/materiales/maderas/maderasBASICO.pdf>
- Coronel, E. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. V 1. Santiago Del Estero – Argentina. ITM, Serie de publicaciones 9404. 187 p.
- Davel M., A. Jojovanovski, D. Mohr. 2005. Densidad básica de la madera de pino oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina. BOSQUE 26(3): 55-62.
- Diaz P. 2005. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera de *Nothofagus glauca* (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Tesis, Universidad de Talca. Talca, Chile. 21 p.

- Diaz-Vaz J. 1987. Anatomía de madera de *Nothofagus alpina* (O. et E.) OerstTedt. Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Bosque: 8(2): 143-145.
- Diaz-Vaz J., R. Ananías, S. Rodriguez, M. Torres, A. Fernandez, H. Poblete. 2009. COMPRESSION WOOD IN *Pinus radiata* II: DENSITY AND CHEMICAL COMPOSITION. Maderas. Ciencia y tecnología 11(2): 139-151.
- Doldán J., F. Tarigo, I. Fariña. 2010. Importancia del muestreo para la caracterización de la calidad de madera de *Eucalyptus spp* proveniente de plantaciones con destino pulpa de celulosa. Maderaexpo. Laboratorio Tecnológico de Uruguay, Uruguay.
- Donaldson, L. 1993. Variation in microfibril angle among three genetic groups of *Pinus radiata* trees. New Zealand Journal of Forestry Science. 23(1): 90-100.
- Donoso, P., C. Donoso, V. Sandoval. 1993. "Proposición de zonas de crecimiento de renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina*) en su rango de distribución". Bosque 14(2): 37-55.
- Donoso P, C Donoso, V. Sandoval. 1993a. Proposición de zonas de crecimiento para renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*Nothofagus alpina*) en su rango de distribución natural. Bosque 14(2): 37-55.
- Donoso C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. Santiago, Chile. CONAF, FAO, FO:DP/CHI/76/003. Documento de Trabajo N° 38. Corporación Nacional Forestal. 83 p.
- Downes G, I Hudson, C Reymond, G Dean, A Michell, L Schimleck, R Evans, A Muneri 1997. Sampling Plantation *Eucalyptus* for wood and fibre properties. National Library Asutralia. CSIRO Asutralia. 6 p.
- Droppelmann F. 2007. Variación genética de la madera de *Pinus radiata* D. Don. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. España. Pag: 27 – 35.
- Espinosa M, G. Rodríguez, G. Medina. 1977. Tres años de crecimiento de una plantación de raulí (*Nothofagus alpina*) de 25 años de edad. Concepción, Chile. Boletín de Investigación CCF 3, Universidad de Concepción. 19 p.

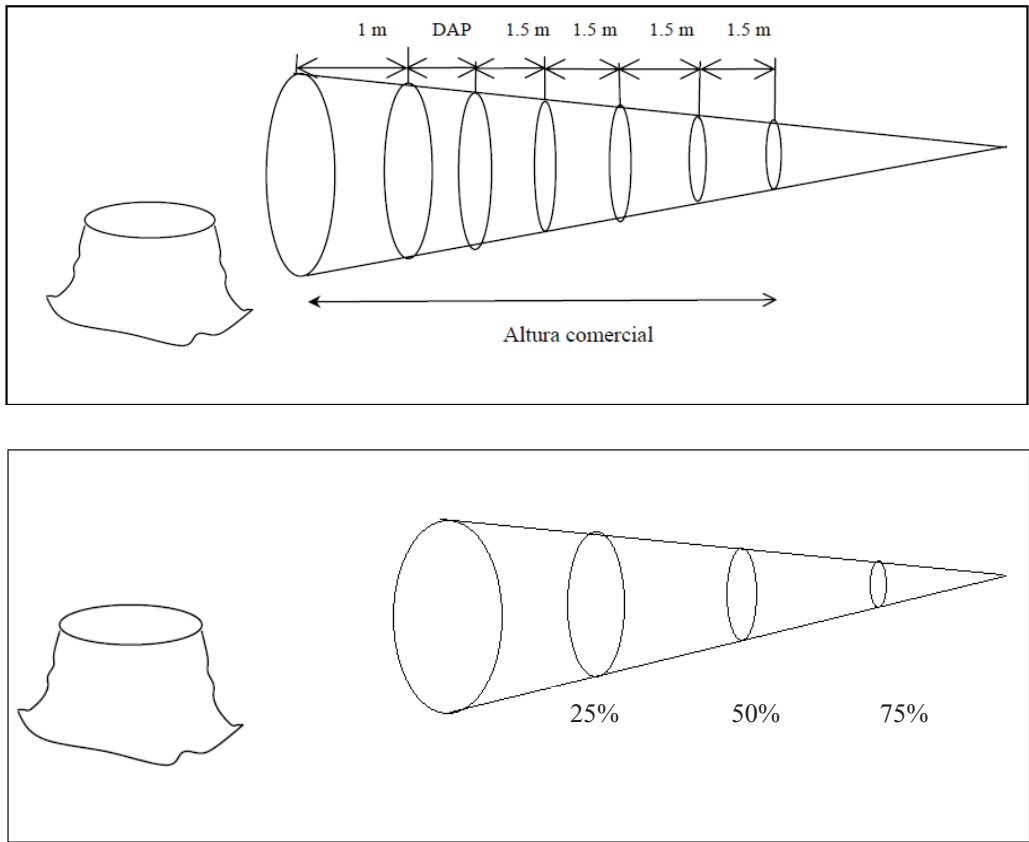
- Gutiérrez N. 2004. Evaluación del crecimiento y rendimiento volumétricos en ensayos de plantación de *Nothofagus obliqua* y *Nothofagus alpina* al aplicar intervenciones silvícolas. Tesis Ingeniero Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 49 p.
- Hayes, M.; J. Chen. 2003. A portable stress wave measurement system for timber inspection. Dept. of Electrical and Computer Engineering. University of Canterbury. 6 p.
- Hernández E. 1996. Análisis del crecimiento de una plantación de Raulí (*Nothofagus alpina* (Poepp. et Endl.) Oerst.) en la Precordillera andina de la provincia de Valdivia. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 74 p.
- Instituto de investigaciones Agropecuarias (INIA) 1985. Suelos Volcánicos de Chile. Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. 118 p.
- Kollmann, F. Cote Junior. 1968. Principles of wood science and technology. Berlín: Springer, 2 vol.
- Lindström, H. 1996. Basic density in norway spruce. Part III. Development from pith outwards. Wood and Fiber Science and Technology. 28(4):391-405.
- Loewe V., M. Toral, G. Freitte, M. Camelio, M. Mery, C. López, E. Urquieta. 1998. Monografía de Raulí: *Nothofagus alpina*. Santiago, Chile. CONAF/INFOR/FIA. 90 p.
- Megraw, R. 1985. Wood quality factors in Loblolly pine. Atlanta: TAPP PRESS. 88 p.
- Meneses M, G. Paredes, P. Núñez. 1991. Opciones silviculturales para el manejo y utilización del bosque Siempreverde, Décima Región desde Río Bueno al sur. Informe de Convenio N° 184. Informe Final. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 103 p.
- Mora C, R. Laurence, F. Schimleck, M. Jerry, C. Alexander, R. Daniels. 2009. Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees. Published by NRC Research Press. Can. J. For. Res. 39: 1421–1429.
- Navia F. 2006, Comportamiento del módulo de elasticidad en madera de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio. Tesis. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 27 p.
- PEDINI, M. 1992. The variation in the microfibrillar angle within the juvenile wood of Sitka spruce. IAWA Bulletin new series. 13(3): 261.

- Pereyra O., M. Gelid. 2002. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y norte de Corrientes. Puerto Esperanza, Misiones. Revista Floresta 33(1): 3-19.
- Phillips, E. 1941. The inclination of fibrils in the cell wall and its relation to the compression of timber. Empire Forestry Journal. 20:74-78.
- PLADECO. 2011. Plan de desarrollo comunal de San José de la Mariquina. Municipalidad de Mariquina, Región de Los Ríos, Chile. 6 p.
- Prado, J. S. Barros. 1989. Eucalyptus principios de silvicultura y manejo. INFOR/CORFO. Santiago, Chile. 199 p.
- Prodan M. 1997. Mensura forestal. Serie investigación y Educación en Desarrollo Sostenible Proyecto IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 561p.
- Reyes R., V. Gerging, C. Donoso. 2007. Crecimiento de una plantación de *Nothofagus nervosa* durante 20 años en Valdivia. Universidad Austral de Chile, casilla 567. Valdivia, Chile. Bosque 28(2): 129-138.
- Ríos A. 2008. Desarrollo inicial de plantaciones de Raulí y Raulí-Roble de cinco años bajo un régimen de establecimiento intensivo en la Depresión Intermedia de la Región de los Ríos, Chile. Tesis Ing. For., Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 22p.
- Rocha M. 2012. Variabilidad del módulo de elasticidad de la madera de Pino radiata determinado acústicamente y su relación con características de crecimiento y forma. Tesis. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 16 p.
- Sepúlveda CA, A. Stoll. 2003. Presencia de *Nothofagus alpina* (Poepp. et Endl.) Oerst. (Fagaceae) en el borde costero de la Región del Maule, Chile Central. Gayana Bot. 60(2): 132-133.
- Soto D. 2013. Crecimiento y mortalidad de plantaciones de *Nothofagus dombeyi* y *N. alpina* bajo cobertura en función de la disponibilidad lumínica y el disturbio del suelo. Tesis magister. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 112 p.
- Timbersa. 2005. International Grading Comparison. INTERNET: <http://www.timbersa.co.za/ICD/GradingComparison/gradingcomparison.asp#1-1> (abril 23, 2014).

- Valenzuela J., I Ulloa, M Rallo. 2003. Estudio del angulo fibrilar y su relacion con la edad cambial en *Pinus radiata* D.don, proveniente de la séptima región, chile. Scielo 5(2): 117 – 124.
- Weber E. 2005. Densidad básica de madera de *Pinus taeda* L. Marion de diferentes edades, misiones, argentina. Facultad de Ciencias Forestales, UnaM. Argentina. 489 p.
- Zobel, B.J.; J. Talbert. 1984. Applied tree improvement. Wiley & Sons, Inc.505 p.
- Zobel, B.J.; J.P. Van Buijtenen. 1989. Wood variation: Its causes and control. Springer-Verlag, Berlín. Germany. 363 p.

ANEXOS

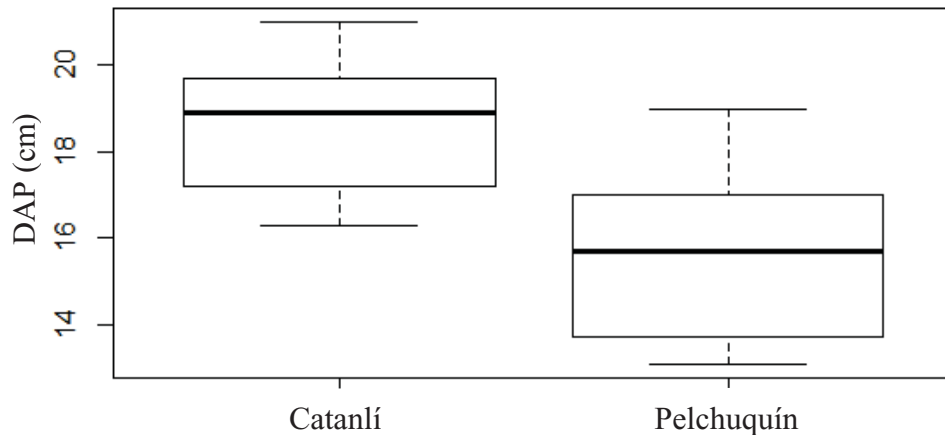
Anexo 1. Extracción de discos determinado por otros autores.



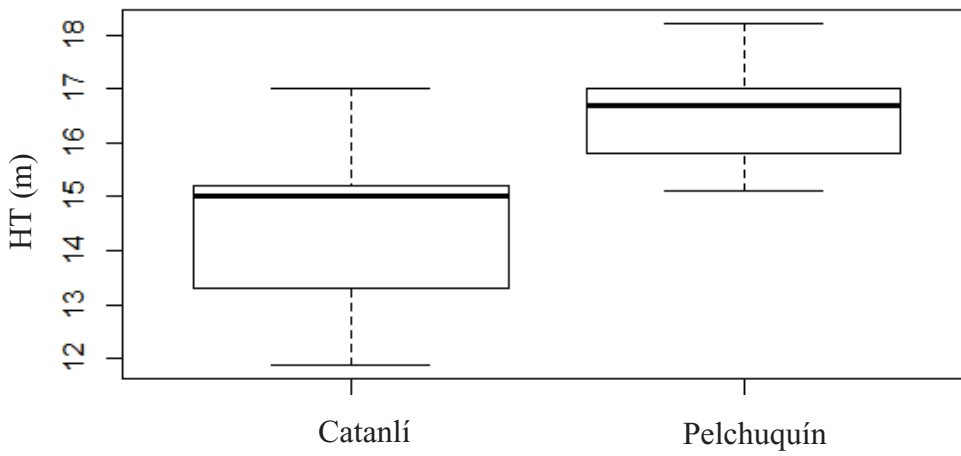
Anexo 2. Valores de significancia de la densidad básica a distintas alturas entre sitios.

Altura Disco (m)	Pelchuquín	Catanlí	Significancia
DAP (1.3 m)	434.595	438.215	ns
1	423.62	432.31	ns
2	416.49	431.71	ns
3	404.96	427.56	**
5	402.76	423.51	**
6	404.68	423.88	*
7	396.96	424.07	**
8	392.46	419.47	**
9	396.76	402.77	ns
10	393.69	---	---
11	398.67	---	---

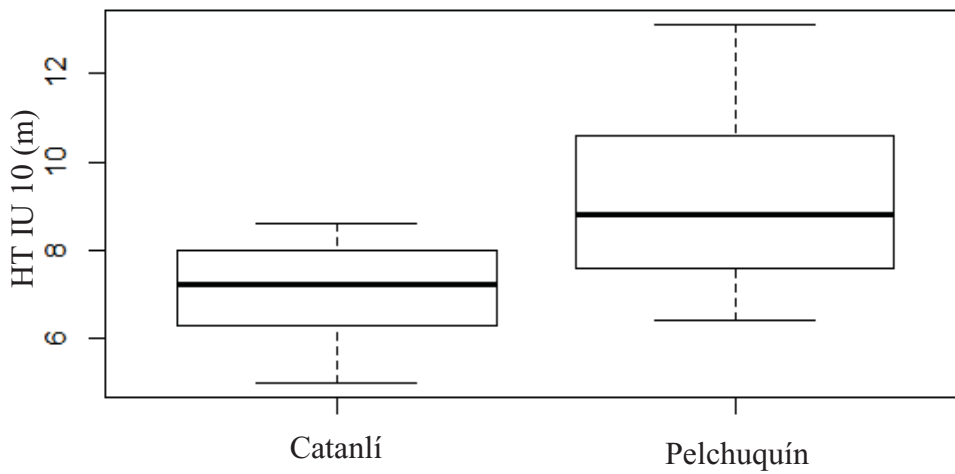
Anexo 3. Diferencias diamétricas en cada sector.



Anexo 4. Variación de la Altura total en cada sitio.



Anexo 5. Muestra la variación de la Altura comercial en cada sitio.



Anexo 6. Variación del Módulo de Elasticidad entre distintos métodos.

	Pelchuquín			Catanlí		
	Ensayo de flexión	HM Director 200	Fakopp®	Ensayo de flexión	HM Director 200	Fakopp®
Promedio	10,9	10,6	16,3	8,1	10,1	13,7
CV %	17,6	7,0	6,4	12,9	5,5	9,4
Máximo	15,3	12,4	18,2	10,6	11,2	15,6
Mínimo	8,2	9,7	14,5	6,9	9,1	10,4