



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

Comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio.

Patrocinante: Sr. Mario Meneses V.

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

FERNANDO JAVIER NAVIA SANTANA

VALDIVIA

2006

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Mario Meneses Villanueva	_6,2_
Informante:	Sra. Rosa Alzamora Mallea	_6,3_
Informante:	Sr. Luis Inzunza Diez	_6,4_

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. Mario Meneses V.

En las siguientes palabras quiero agradecer a todas las personas que fueron importantes en este proceso.

Quiero partir agradeciendo a las personas más importantes en mi vida, mis padres, Marcelo e Iris, y mis abuelos, mami Nina y papi Germán, sin el apoyo y amor que me entregan cada día, nada sería posible. Los amo mucho.

También quiero dar las gracias a mis tíos, Mario y Norma, por su constante preocupación, a mi hermano Ignacio y a mis primos, Felipe y Sebastián, los quiero mucho.

También a las personas con las que viví acá en Valdivia, mis primos, Tania, Pauli y Juanito, por hacerme sentir como en casa, muchas gracias.

Quiero agradecer a mis amigos de Osorno. A pesar de todos estos años, la amistad sigue en pie. Gracias por eso, los quiero mucho cabros...A mi compadre, Pancho Hofmann, a José Mutizabal, a Jhony Amaza y a Nicolás Díaz.

A mis amigos de la etapa universitaria...como olvidar todos estos años junto a ellos.....Felipón, Rodrigo, Tommy, Eve, Toño, Vitoco, Marisol, Milene, Silvio, Felipe, Caro y Yoe... gracias por todo y un abrazo grande. Sorry si se me olvidó alguno.

A mis padres y Abuelos

INDICE DE MATERIAS

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL	3
2.1 Madera juvenil	3
2.2 Generalidades del módulo de elasticidad	4
2.2.1 Módulo de elasticidad estático y dinámico	4
2.2.2 Técnicas de evaluación no destructiva	5
2.2.3 Relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico	6
2.3 Variables que influyen en el módulo de elasticidad	7
2.4 Clasificación estructural internacional	10
2.4.1 Australia	10
2.4.2 Nueva Zelanda	11
2.4.3 International Standard Organization (ISO)	12
3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	14
3.1 Material	14
3.1.1 Ubicación del área de estudio	14
3.1.2 Climas	15
3.1.3 Suelos	15
3.1.4 Manejo de las plantaciones	16
3.2 Metodología	16
3.2.1 Obtención de datos	16
3.2.2 Análisis estadístico	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1 Caracterización general de los rodales	18
4.2 Comportamiento del módulo de elasticidad	20
4.3 Inferencia estadística	24
4.4 Potencialidad de los sitios para producir madera estructural	25

5.	CONCLUSIONES	28
6.	BIBLIOGRAFÍA	30

ANEXOS

1	Abstract and key words
2	Metodología de muestreo
3	Análisis inferencial
4	Clasificación estructural australiana y neozelandesa

INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Requisitos mínimos de fuerza para grados australianos	11
Cuadro 2. Requisitos mínimos de fuerza para grados neozelandeses	12
Cuadro 3. Requisitos mínimos de fuerza para grados ISO	12
Cuadro 4. Análisis físico de suelos	15
Cuadro 5. Análisis químico de suelos	16
Cuadro 6. Manejo de plantaciones	16
Cuadro 7. Estadísticos descriptivos de los rodales	19

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Ubicación de los sitios	14
Figura 2	Medición del módulo de elasticidad en árboles en pie	17
Figura 3	Frecuencia de árboles por clases de módulo de elasticidad (Gpa) a nivel de sitio	20
Figura 4	Módulo de elasticidad para árboles en las tres condiciones de sitio	20
Figura 5	Relación entre el módulo de elasticidad y el diámetro para IS 26,8, 28,8 y 30,6	22
Figura 6	Relación entre el módulo de elasticidad y la altura para IS 26,8, 28,8 y 30,6	23
Figura 7	Relación entre el módulo de elasticidad y la relación altura/dap para IS 26,8, 28,8 y 30,6	23
Figura 8	Comportamiento del sitio 1 en relación a grados estructurales ISO	25
Figura 9	Comportamiento del sitio 2 en relación a grados estructurales ISO	25
Figura 10	Comportamiento del sitio 3 en relación a grados estructurales ISO	26

RESUMEN EJECUTIVO Y PALABRAS CLAVES

Se estudió el comportamiento del módulo de elasticidad dinámico en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio (un rodal por sitio), los cuales estaban ubicados en el Predio “Ranchillo” (Lat. 36°04` - Long. 71°27`) a 478 ms.n.m, Predio “Los Mellicos” (Lat. 37°41` - Long. 72°43`) a 415 ms.n.m y Predio “P-20 Col Lautaro” (Lat. 38°34` - Long. 72°40`) a 230 ms.n.m. Se determinó el módulo de elasticidad dinámico en árboles en pie usando el método de velocidad de ondas sónicas sobre el fuste de árboles (0,5 m sobre el suelo hasta los 1,5 m) dentro de parcelas de 400 m². Los rodales tenían condiciones similares de edad y manejo, esto con el fin de dejar constante estas variables.

Bajo este contexto, el objetivo general de este estudio fue evaluar mediante un método no destructivo sobre árboles en pie el comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de pino radiata en tres condiciones de sitio. Mientras que los objetivos específicos fueron los siguientes: a) analizar relaciones entre el módulo de elasticidad con distintas variables del árbol para cada sitio, b) determinar la variabilidad del módulo de elasticidad entre y dentro de los sitios y c) analizar el potencial de los sitios para producir madera de calidad en relación a clasificación de grados estructurales internacionales.

Se correlacionó el módulo de elasticidad con distintas características de los árboles, como el dap, la altura y la relación altura/dap, siendo la relación altura/dap con la que mejor se asoció, presentando valores de 0,26, 0,52, y 0,61 para los tres sitios respectivamente. Con el dap, los coeficientes de correlación fueron de -0,19, -0,39 y -0,47, mientras que con la altura, se observó la menor asociación, donde solamente se alcanzaron valores de -0,07, -0,11 y -0,04.

El sitio 3, que tenía el mayor IS (30,6) y mostraba las mayores tasas de crecimiento en diámetro resultó con los valores más bajos de módulo de elasticidad, con valores que iban desde los 4,1 a los 7,8 Gpa y con una media de 5,9 Gpa. A su vez el sitio 2, que tenía menor IS (26,8), mostró valores desde los 4,5 a los 12,6 Gpa y con una media de 12,4 Gpa. Los análisis de varianza mostraron una diferencia significativa para el módulo de elasticidad entre los tres sitios en estudio, con un nivel de confianza del 95%. Por otro lado, dentro del rodal, no se observaron diferencias significativas para el módulo de elasticidad, utilizando como factor el dap, la altura y la relación altura/dap (para un nivel de confianza del 95%).

Se observó además que el comportamiento del módulo de elasticidad dentro del rodal es muy variable. Un sitio mostró una pequeña tendencia hacia una distribución normal de los valores, el otro sitio, mostró la mayoría de sus valores concentrados en los rangos inferiores de elasticidades, mientras que el último sitio, presentó valores en todo el rango de módulo de elasticidad. En general, esta variación se debe principalmente a las características propias de la especie y de la madera juvenil.

Con respecto a la potencialidad de los rodales para producir madera de cierta calidad estructural, se observó que el sitio 2 (IS 26,8), presentó una mayor cantidad de grados estructurales ISO, y que además fue el único rodal que alcanzó grados S22, S24 y S27, que son de calidad intermedia. Mientras que en los otros rodales un 24% y un 66% de los individuos no alcanzaron a clasificar dentro del grado estructural mínimo. Cabe mencionar que estos resultados están condicionados por la validez del instrumento fakopp tree sonic.

Finalmente, esta variación de la elasticidad entre los rodales y entre los árboles dentro de los rodales, indica la importancia de la evaluación temprana a través de esta técnica no destructiva sobre árboles en pie, que sirve como herramienta para la toma de decisiones tanto para la planificación de la cosecha, como del raleo, donde el objetivo de la planificación tendría que apuntar a conocer la calidad del recurso para así destinarlo a los mercados adecuados.

Palabras claves: *Pinus radiata*, módulo de elasticidad dinámico, evaluación no destructiva, métodos de ondas de estrés.

1. INTRODUCCIÓN

Gran parte de la oferta de madera, proviene de plantaciones de especies de rápido crecimiento manejadas en rotaciones cortas. Esto ha dado lugar a un aumento en la proporción de madera juvenil en las cosechas, donde las características de este tipo de maderas como la baja densidad, traqueidas cortas con lúmenes grandes, alto ángulo del grano, y alto ángulo microfibrilar, tiene como consecuencia una baja resistencia y módulo de elasticidad, además de pobre estabilidad dimensional comparada con la madera madura (Lasserre *et al.*, 2004). Los productos estructurales que contienen una alta proporción de madera juvenil son más frágiles y tienen mayor probabilidad a combarse, lo que es un problema para los fabricantes y consumidores finales. En tal sentido, existe un aumento en la necesidad de investigar y evaluar las características físicas y mecánicas de la madera para fines estructurales y su comportamiento en diferentes condiciones de sitio y manejo.

Dentro de las propiedades mecánicas de la madera destaca la rigidez, que se mide en términos del denominado módulo de elasticidad, y que corresponde al esfuerzo por unidad de superficie en relación a la deformación por unidad de longitud.

Muchos estudios dan cuenta de este valor en ensayos de laboratorio, no obstante muy pocas veces se ha medido a través de métodos no destructivos en árboles en pie. La validez de este método se ha probado ya en varias publicaciones, principalmente en el extranjero, donde se observa la existencia de una correlación significativa entre el módulo de elasticidad medido en árboles en pie, en tablas y en pequeñas piezas de madera libre de nudos obtenidas de los mismos árboles.

Esta técnica no destructiva puede usarse para detectar los cambios de propiedad de los árboles y como varían éstas en los diferentes sitios. Además, ayuda a determinar la forma en que los bosques podrían ser manejados y proporciona herramientas para una mejor planificación y toma de decisiones en el momento del raleo y de la cosecha, decisiones que dependerán del objetivo de la plantación. Así como también constituye una herramienta importante para evaluar el patrimonio de las empresas y poder destinar la madera hacia los mercados adecuados, segregando rodales, árboles o trozas con las características finales deseadas.

En la actualidad no existen investigaciones que relacionen la influencia del sitio sobre el comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil, por tal razón el propósito de este estudio es analizar el comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de *Pinus radiata* D. Don en tres condiciones de sitio.

De esta forma, el presente trabajo pretende contribuir a los conocimientos ya existentes en Chile sobre las propiedades mecánicas de pino radiata, sobre la base de metodologías y herramientas modernas para la estimación de la calidad del bosque en pie y por sobre todo, para evaluar si la influencia del sitio es importante sobre el comportamiento del módulo de elasticidad.

De este modo el objetivo general del presente estudio es evaluar mediante un método no destructivo sobre árboles en pie el comportamiento del módulo de elasticidad en madera juvenil de pino radiata en tres condiciones de sitio. Para ello, se desarrollarán los siguientes objetivos específicos.

- Analizar relaciones entre el módulo de elasticidad con distintas variables del árbol para cada sitio.
- Determinar la variabilidad del módulo de elasticidad entre y dentro de los sitios.
- Analizar el potencial de los sitios para producir madera de calidad en relación a clasificación de grados estructurales internacionales.

Cabe mencionar que la limitante más importante de este estudio fue la variable genética, que no pudo ser considerada debido a la escasa información existente y el poco conocimiento que se tenía con respecto al instrumento utilizado (Fakopp tree sonic), que todavía tiene que ser validado.

2. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL

2.1 Madera juvenil

Normalmente se define como la madera que se encuentra al exterior de la médula donde sus características sufren un rápido y progresivo cambio a través de los años. La madera más vieja que se produce con posterioridad a la madera juvenil es llamada madera madura, madera adulta o madera exterior. La madera juvenil se diferencia de la madera madura en que ésta tiene un bajo porcentaje de madera de verano, menor densidad, traqueidas más cortas, menores resistencias mecánicas, mayor ángulo de fibras y ocasionalmente cantidades desproporcionadas de madera de compresión (Larson *et al.*, 2001).

La madera formada en los primeros años de actividad del meristema lateral, el cambium vascular de cada altura incremental, constituyen la zona denominada madera juvenil. Las características y propiedades de esta madera son distintas a las de la madera madura. Esta última, corresponde a la madera formada por las zonas del cambium maduro con cierta edad y que por lo tanto han dejado de formar madera juvenil (Díaz-Vaz, 2003).

En las partes bajas de los fustes de árboles adultos, la madera juvenil corresponde al cilindro central. En estos mismos árboles, a medida que se consideran zonas más altas del tronco, la proporción de madera juvenil aumenta hasta que llega a constituir el 100%. El mismo efecto indicado anteriormente, se presenta con la edad de los árboles. Mientras más jóvenes son los árboles, mayor es la proporción de madera juvenil, esto es, la formada por cambium joven (Díaz-Vaz, 2003).

La madera juvenil se caracteriza por su baja densidad, paredes celulares delgadas, traqueidas cortas con lúmenes grandes, alto ángulo del grano, y alto ángulo microfibrilar, esto tiene como consecuencia baja rigidez y módulo de elasticidad y pobre estabilidad dimensional comparada con la madera madura (Lasserre *et al.*, 2004).

El módulo de elasticidad, el módulo de rotura y las fibras de la madera juvenil son ampliamente inferiores comparadas con la madera madura. Por ejemplo, los productos de madera sólida producidas de plantaciones altamente productivas son de menor calidad, esta baja calidad está relacionada al aumento de la deformación y bajo módulo de elasticidad. Por consiguiente, un desafío importante para la Industria forestal es aumentar la resistencia, el módulo de elasticidad y la fibra de la madera juvenil. La manera más directa de aumentar simultáneamente la tasa de crecimiento y el módulo de elasticidad de madera juvenil es identificar prácticas silviculturales que impacten positivamente ambas propiedades en los diferentes genotipos (Peter, 2000).

2.2 Generalidades del módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es la propiedad más importante para las maderas con fines estructurales. Bajos valores de módulo de elasticidad constituyen una importante limitación en la madera de construcción de pino radiata, particularmente en rotaciones cortas, donde la proporción de madera juvenil es muy alta y esto se asocia a una reducción de la calidad. El módulo de elasticidad de una sección de madera es una medida de su resistencia a un cambio de forma o de tamaño bajo la acción de varias fuerzas en esta sección. En otras palabras es una medida del stiffness (Timbersa, 2006).

La rigidez de un cuerpo se define como la propiedad que tiene éste para resistir la deformación al ser solicitado por fuerzas externas. La medida de rigidez de la madera se conoce como módulo de elasticidad (Corma, 2004).

2.2.1 Módulo de elasticidad estático y dinámico

El módulo de elasticidad estático, que mide la resistencia de la madera a la flexión bajo cargas, es utilizado como un criterio en la máquina de grados de tensión de madera estructural y también se requiere para determinar la calidad de la madera de construcción laminada. El módulo de elasticidad se considera a menudo más importante que el módulo de rotura para predecir la calidad de la madera, esto es porque los tableros de pino radiata raramente se quiebran en usos normales. Una carga frecuentemente mayor resulta en una excesiva deflexión.

El módulo de elasticidad de una pieza de madera o de una troza, puede medirse en un aparato que evalúe la flexión estática, registrando la deflexión cuando la carga es aplicada, y calculando el módulo de elasticidad (MoE), que es una medida del stiffness. Esta técnica es lenta e involucra equipos caros y que no son portátiles. Consecuentemente investigadores han estado explorando el uso del módulo de elasticidad dinámico, que tiene buena correlación con el módulo de elasticidad estático. El módulo de elasticidad dinámico se obtiene midiendo la velocidad de una onda acústica a través del material (Carter *et al.*, 2005).

De tal forma que el módulo de elasticidad dinámico queda expresado de la siguiente manera:

$$\text{MoE}_d = \rho v^2,$$

Donde ρ es la densidad de la madera verde y v es la velocidad de la onda de tensión. En la práctica la densidad de la madera verde varía sólo ligeramente a través de los sitios. Por ejemplo, en pino radiata la densidad verde está tan dominada por el agua, eso sin tomar en cuenta la densidad básica, que la densidad húmeda esta muy cercana a los 1000 kg/m^3 . Sin embargo, la diversidad del módulo de elasticidad dentro de un bosque es notable. El resultado de esto es que la velocidad de onda es el factor fundamental cuando se evalúa la madera con técnicas basadas en ondas de tensión. 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).

2.2.2 Técnicas de evaluación no destructivas

La inspección visual es la técnica más simple y más usada de evaluación no destructiva de la madera. Este método entrega solamente resultados cualitativos de calidad, detectando por ejemplo la presencia de nudos, bolsillos de resina, grietas y pudriciones del fuste.

Es cuestionable si los métodos actualmente usados de clasificación visual son adecuados para evaluar la calidad potencial de los productos estructurales que serán fabricados de los árboles, sobre todo aquellos donde el módulo de elasticidad es de primera preocupación. Se espera que con el método no destructivo de árboles en pie se pueda realizar una buena selección de árboles que tengan un potencial superior para la producción de productos estructurales (Wang *et al.*, 2000).

Los industriales argumentan que la madera es un material muy difícil de procesar de forma consistente debido a la amplia gama de propiedades que existen en el material no elaborado. Por otro lado, los usuarios de los productos elaborados pueden no estar conformes con las distintas performance de los productos finales.

La tecnología de la evaluación no destructiva ha contribuido significativamente hacia la eliminación de las causas de estas frustraciones. Por definición, la tecnología de evaluación no destructiva es la ciencia de identificación de las propiedades físicas y mecánicas de un material sin alterar sus capacidades de uso final y de esta manera usar esta información para tomar decisiones con respecto a las peticiones apropiadas (Ross, 1999).

Varias tecnologías, incluyendo aquellas que utilizan rayos x, análisis químicos, propiedades vibratorias y transmisión de ondas sónicas, son usadas para evaluar de una forma no destructiva los distintos productos provenientes de la madera. Dos propiedades fundamentales de los materiales son medidas comúnmente cuando se usa la tecnología de ondas sónicas. La transmisión de la velocidad del sonido es un parámetro que tiene buena correlación con varias propiedades de la madera. Se ha demostrado, por ejemplo, que la velocidad a que una onda viaja en la madera depende del ángulo de la fibra y es influenciado significativamente por la presencia de ciertos tipos de pudrición o deterioro. La atenuación (o la proporción a la que una onda pierde la energía de viaje a través de la madera) de la onda sónica es otro parámetro que se correlaciona con las propiedades de la madera. Estos dos parámetros se pueden obtener a través del uso de una variedad de técnicas y equipos disponibles en el mercado (Ross, 1999).

Evaluaciones con herramientas acústicas basadas en el tiempo de vuelo realizadas con Fakopp 2D ofrece una técnica no destructiva para evaluar el módulo de elasticidad de los árboles usando la ecuación fundamental $E=p*v^2$, donde E es el módulo de elasticidad, p es la densidad verde y v es la velocidad acústica medida por el instrumento antes mencionado. Las herramientas acústicas proporcionan métodos

no destructivos para evaluar las propiedades mecánicas de la madera. Los métodos más comunes son el de resonancia que se usa en trozas, y el método de tiempo de vuelo que es usado sobre árboles en pie (Grabianowski *et al.*, 2004).

Si la clasificación acústica de los árboles en pie para requerimientos específicos en productos finales fueran más ampliamente aplicados, los ahorros en materiales y en costos de elaboración podrían conducir a ventajas financieras considerables para la industria (Grabianowski *et al.*, 2004).

Estas tendencias han renovado el interés de los aserraderos en los métodos no destructivos. Estos buscan obtener un retorno en el precio, con la evaluación no destructiva, ya que es muy caro procesar trozas o comprar madera de rodales que tienen un rendimiento de productos con bajos niveles de módulo de elasticidad. Consecuentemente, investigadores han desarrollado la tecnología no destructiva para medir el módulo de elasticidad y obtener valores deseados de esta propiedad (Carter *et al.*, 2005).

Un estudio mostró que al evaluar trozas en verano, la temperatura media de la madera es más alta que en invierno, y el contenido de humedad medio probablemente será un poco más bajo. Como un bajo contenido de humedad resulta en altas velocidades, estos factores tienden a compensar la velocidad acústica y ésta será distinta en una misma troza evaluada en invierno o en verano. En este caso para la evaluación sobre árboles en pie, se ha vuelto importante considerar el impacto de cambios en la temperatura sobre la velocidad acústica. Por lo tanto, para la comparación de las velocidades acústicas en diferentes estaciones, se sugiere una compensación del orden de 20 m/seg por °C. Para la aplicación práctica, y porque la magnitud de cambio en la velocidad es relativamente pequeña, será necesario considerar la temperatura media sólo a comienzos o a fines de verano y en la estación de invierno. El efecto de la temperatura sobre la velocidad acústica es relativamente pequeña sobre una base diaria o semanal, pero debe considerarse mediciones sobre árboles en pie en las diferentes estaciones (Carter *et al.*, 2005).

2.2.3 Relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico

Para que la medición del módulo de elasticidad sobre árboles en pie tenga validez, tiene que existir una correlación significativa entre este método y la medición en trozas cortadas de estos mismos árboles o sobre pequeñas tablas libres de nudos. Varios estudios en el extranjero dan validez a este método, donde se ha probado en distintas especies de interés forestal.

La correlación entre la velocidad de onda en árboles en pie y en trozas de *Pinus taeda* fue de 0.63, $P < 0.01$, si bien el valor es significativo, podría haber existido una mayor correlación. La velocidad de la onda de esfuerzo en árboles en pie fue un poco menor que para las trozas. Esto se debe a que la velocidad de la onda se ve afectada por la masa del árbol cuando está en pie y también por los nudos. Esta es una variable que hay que considerar al momento de segregar las trozas (Matheson *et*

al., 2002). Otro estudio encontró un r de 0,83 con un nivel de significación de 0,01 para la relación entre el módulo de elasticidad de árboles en pie y el de muestras pequeñas libres de nudos (Wang *et al.*, 2000).

Mientras que estudios realizados en Uruguay en *Eucalyptus grandis*, muestran una alta correlación ($r = 0,855$) entre el módulo de elasticidad tomado a través de Fakopp y el método de ensayo de flexión estática tradicional.

Una investigación reciente usando clones de pino radiata muestran una fuerte correlación ($r = 0.96$) entre el módulo de elasticidad dinámica usando Fakopp y el módulo de elasticidad estático determinado desde flexión estática tradicional para la misma especie en individuos de 11 años (Lasserre *et al.*, 2004).

2.3 Variables que influyen en el módulo de elasticidad

Densidad de plantación, genotipo y su influencia en el módulo de elasticidad

La densidad de la plantación es una de las causas que explican la variación del módulo de elasticidad entre rodales. Sin embargo, esto sólo es válido para plantaciones jóvenes (madera juvenil), ya que en plantaciones adultas (madera madura) esto no ocurre. Es por eso, la importancia de la distinción entre madera juvenil y madera madura para estudiar el módulo de elasticidad de árboles en pie.

Se ha encontrado que en plantaciones adultas de pino radiata no existen diferencias significativas en el módulo de elasticidad dinámico para madera madura en un rango de densidad de 100 a 625 N°/ha. Dado que las características de la madera se estabilizan en la madera madura, esta carece a una respuesta a la densidad del rodal, esto se puede deber a la edad de los árboles muestreados (Lasserre *et al.*, 2004).

Una investigación en N. Zelanda para árboles en pie de 11 años muestra que el módulo de elasticidad fue influenciado significativamente por la densidad y el genotipo. Se encontraron diferencias de 1,8 Gpa entre las parcelas con menor y mayor densidad (833 y 2500 N°/ha) lo que equivale a un 42%. La variación del módulo de elasticidad con respecto al genotipo, fue menor que la influencia de la densidad. Para este caso se encontraron diferencias de 1,1 Gpa en la densidad más baja y de 1,5 Gpa en las densidades más altas para dos genotipos distintos (Lasserre *et al.*, 2004).

Para el caso de plantaciones adultas de pino radiata, se realizó un estudio en una plantación de 27 años donde no se encontraron diferencias significativas entre la velocidad acústica (módulo de elasticidad) de la madera madura para dos densidades de plantación (100 y 625 N°/ha) (Grabianowski *et al.*, 2004).

Este estudio mostró que para dos densidades había una amplia distribución de velocidades acústicas para árboles individuales, en las parcelas de 100 N°/ha se

encontraron valores entre 2.52 Km./s hasta 3.75 Km./s (una media de 3.11 Km./s) y en la parcela de 625 N^o/ha se encontraron valores entre 2.6 Km./s hasta 3.62 Km./s (una media de 3,16 Km./s). Un análisis de varianza mostró la relación entre la velocidad acústica con la densidad y no se aprecian diferencias significativas en velocidad entre las dos densidades ($p=0.33$) (Grabianowski *et al.*, 2004).

En una investigación realizada con clones de *P. radiata* de tres años se encontró una alta heredabilidad del 82% para la velocidad del sonido usando una herramienta acústica de Fakopp. Mientras que para el módulo de elasticidad estático se encontró una heredabilidad del 87% (Lindström *et al.*, 2004).

Ángulo microfibrilar y su influencia en el módulo de elasticidad.

El ángulo microfibrilar es utilizado en la madera como indicador del módulo de elasticidad, contracción y ciertas características en papel. Se ha demostrado que el módulo de elasticidad de la madera está determinado por la cantidad y distribución de la celulosa dentro de la pared celular. De esta forma, para estudiar el ángulo microfibrilar la madera debe ser observada a nivel celular. Una célula de una planta juvenil formará una pared fina y flexible llamada pared primaria. Al exterior de la pared primaria está la laminilla media que une a las células con las otras células alrededor de ella. Al interior de la pared primaria se encuentra la pared secundaria. La pared secundaria consta de 3 capas, la S_1 , S_2 y S_3 . La celulosa está envuelta en la pared celular para formar las microfibrillas que proveen el soporte y estructuran la pared celular. Las microfibrillas se alinean de cierta manera y el ángulo que la microfibrilla hace con el eje de la pared celular es el llamado ángulo microfibrilar (Traacey *et al.*, 2000).

Se reconoce que el ángulo de la microfibrilla de la capa S_2 es una de las principales variables que determinan las características mecánicas de la madera. A medida que el ángulo microfibrilar aumenta, el módulo de elasticidad disminuye. Por ejemplo: una disminución de 40° a 10° en el ángulo microfibrilar produce un aumento aproximado de cinco veces en el valor del módulo de elasticidad; El ángulo microfibrilar se relaciona con la longitud de traqueidas, donde traqueidas más largas tienen menores ángulos de microfibrilla. El ángulo microfibrilar varía de un árbol a otro, de médula a corteza y con la altura del fuste. También varía con la velocidad de crecimiento del árbol (Traacey *et al.*, 2000).

La única característica física conocida de la madera capaz de efectuar grandes cambios en el módulo de elasticidad de la madera es el ángulo microfibrilar en la capa S_2 de la pared celular (Traacey *et al.*, 2000). La variación del stiffness de la madera es reflejada e interpretada largamente en términos de la variación del ángulo microfibrilar (Burdon *et al.*, 2004).

La tasa de crecimiento influye en el ángulo microfibrilar de dos maneras. Primeramente, los árboles de crecimiento rápido tienen mayor ángulo microfibrilar en madera juvenil y madera madura, y segundo, los anillos de crecimiento más

angostos se forman en algunos árboles que son suprimidos y estos tienden a tener mayores ángulos microfibrilares (Pedini, 1992).

El impacto del ángulo microfibrilar en el módulo de elasticidad está tornándose cada vez más importante, debido al énfasis, a lo largo del mundo, sobre las plantaciones forestales de rápido crecimiento y rotaciones cortas. La cantidad de madera juvenil que se cosecha está aumentando y es en esta madera, donde el ángulo microfibrilar es mayor y por consiguiente es menor el módulo de elasticidad. El ángulo microfibrilar juega un papel importante en la determinación del módulo de elasticidad de madera juvenil en las plantaciones de pinos de rápido crecimiento. (Cave y Walker, 1994).

La variación en el ángulo microfibrilar entre los árboles sugiere que existe un potencial para la selección de árboles con bajo ángulo microfibrilar y poder mejorar la calidad de la madera. La variación en el ángulo microfibrilar entre los árboles sugiere que existe un potencial para la selección de árboles con bajo ángulo microfibrilar y poder mejorar la calidad de la madera (Walker y Butterfield, 1996).

El ángulo microfibrilar es afectado también por el envejecimiento fisiológico (cada año de envejecimiento disminuye en 1° el ángulo microfibrilar), así este problema puede ser atenuado en algún grado usando cuttings de mayor edad (Maclaren, 2002).

Se encontró que el ángulo microfibrilar está fuertemente correlacionado (-0,78) con el módulo de elasticidad dinámico, indicando que las herramientas acústicas portátiles pueden ser usadas para la producción de árboles con bajo ángulo microfibrilar y asociarlo con la propensión a la deformación de la madera juvenil (Lindström *et al.*, 2004).

Madera de compresión y su influencia en el módulo de elasticidad

Una de las mayores causas de la inestabilidad y de la deformación es la madera de compresión. La madera de compresión es una reacción de los árboles al estrés para compensar el desnivel de las cargas de peso en el tronco o en la copa. Pino radiata es una especie de gran ramificación, factor que puede producir extraordinarios niveles de madera de compresión. La madera de compresión tiende a disminuir con el aumento en altura del árbol, indicando que el problema es relevante a la troza más importante (Maclaren, 2002).

La madera de reacción se forma en fustes que reaccionan a tensiones o estímulos externos, por ejemplo, el lado de un árbol que crece a favor de una pendiente y que intenta corregir una inclinación, o reorientación de su posición para lograr acceso a más luz. La madera conocida como "madera de compresión" produce en las coníferas características diferentes a la de madera normal. Generalmente la formación de madera de compresión puede considerarse como un mecanismo para corregir la inclinación del fuste en respuesta al estímulo gravitacional. Comparado con la madera normal, la madera de compresión tiene; fibras más cortas, mayor densidad, maderas de colores más oscuros con tintes pardos a rojizo castaño,

excentricidad de la médula, traquidas sin la capa S₃, altos contenidos de lignina, mayores ángulos microfibrilares, menores contracciones transversales y mayores contracciones longitudinales y diferente relación entre el ángulo microfibrilar y la contracción. Cuando se observa un gran ángulo microfibrilar en el anillo de crecimiento con madera de compresión y de la madera en la situación opuesta (madera en el otro lado del árbol de la zona de madera de compresión), la contracción longitudinal es mayor en la madera de compresión. Sin embargo, cuando el ángulo microfibrilar es pequeño en la madera externa, la madera de compresión sólo mostrará una contracción longitudinal grande cuando el ángulo microfibrilar medio es mayor de 30° (Llic *et al.*, 2003).

La madera de compresión podría ser detectada por herramientas acústicas, porque los altos promedios de ángulo microfibrilar encontrados en madera de compresión producen bajo módulo de elasticidad dinámico (Lindström *et al.*, 2004).

2.4 Clasificación estructural internacional

Las propiedades mecánicas son generalmente las características más importantes de los productos de la madera cuando se utilizan para fines estructurales. El uso estructural se puede definir como cualquier uso donde las propiedades mecánicas son el criterio primario para la selección del material, por ejemplo, en armazones de techos donde la madera es seleccionada por su resistencia y no por su apariencia (Timbersa, 2006).

El término fuerza se utiliza a menudo en un sentido general para referirse a todas las propiedades mecánicas. Esto puede conducir a confusión, puesto que hay diversos tipos de fuerzas. Es por esta razón que serán descritos los distintos valores mecánicos de fuerzas de la ISO y de países como Australia y Nueva Zelanda, líderes mundiales en el ámbito forestal (Timbersa, 2006).

2.4.1 Australia

Detalles de los valores mecánicos de fuerza

Los grados australianos de tensión se basan en grupos de fuerza y proveen el estrés básico para los propósitos de diseño. Estos se califican visual o mecánicamente y ambos métodos pueden ser utilizados en pruebas de calidad.

La calificación visual se realiza usando indicadores visuales de fuerza. Los australianos tienen varias descripciones de grados que limitan todos los defectos o imperfecciones comunes, los que afectan la fuerza y describen la madera en el límite más bajo para cada grado.

La máquina de grados de tensión confía en la relación entre la rigidez y la resistencia de la madera. Generalmente a mayor rigidez, mayor es la resistencia, pero esta relación difiere entre especies.

El proceso de grados australianos tiene tres pasos:

1. La especie de madera que es graduada se clasifica en un grupo de fuerza (con el fin de esta comparación, el grupo SD6 se utilizará para pino radiata seco).
2. La madera entonces se clasifica en cinco grados estructurales (Grado estructural número 1 hasta el 5).
3. Estos grados estructurales se basan en grupos de fuerza y prevén estrés básico en flexión para propósitos de diseño. Estos grados de tensión se identifican como grados "F". Los grados "F" se ajustan a los cinco grados estructurales basándose en los resultados de las pruebas de grados.

Los requisitos mínimos de fuerza para las diversas propiedades mecánicas se muestran en el cuadro 1 para cada grado australiano de tensión (grados "F").

Cuadro 1. Requisitos mínimos de fuerza para grados australianos

Propiedades mecánicas (Mpa)	Grados de tensión (Grados "F")					
	F4	F5	F7	F8	F11	F14
Tensión estática (Fb)	13	16	20	25	35	40
Tensión paralela al grano (Ft)	6,5	8,2	10	13	17	21
Compresión paralela al grano (Fc)	9,7	12	15	20	25	30
Módulo de elasticidad (E)	6,100	6,900	7,900	9,100	10,500	12,500

Especies utilizadas

Según lo mencionado anteriormente la relación entre la rigidez y la fuerza es diferente entre las especies. Por esta razón los valores usados para la comparación australiana se basan en pino oregón y pino radiata. El pino oregón es una especie que crece en Norteamérica, que es importada hacia Australia, mientras que el pino radiata es una especie que crece en Australia pero que además es importada desde Nueva Zelanda (Timbersa, 2006).

2.4.2 Nueva Zelanda

Detalles de los valores mecánicos de fuerza

Los grados estructurales neozelandeses se basan en grupos de fuerza y prevén el estrés básico para los propósitos de diseño. Una pieza de madera es considerada en un grado particular de tensión basándose en métodos de evaluación visual, y de máquina de grados de tensión.

La calificación visual se realiza usando indicadores visuales de fuerza, de este modo los neozelandeses tienen varias descripciones de grados que limitan todos los defectos o imperfecciones comunes, los que afectan la fuerza y describen la madera en el límite más bajo para cada grado.

A diferencia del sistema de clasificación estructural australiano el sistema neozelandés utiliza tres diversos grados estructurales (No.2 Framing, No.1 Framing and Engineering).

Los requisitos mínimos de resistencia para las diversas características mecánicas se muestran en el cuadro 2 para cada grado estructural de Nueva Zelanda.

Cuadro 2. Requisitos mínimos de fuerza para grados neozelandeses

Propiedades mecánicas (Mpa)	Grados estructurales neozelandeses		
	Nº 2 Framing	Nº1 Framing	Engineering
Tensión estática (Fb)	16	17,7	27,7
Tensión paralela al grano (Ft)	8,2	10,6	16,5
Compresión paralela al grano (Fc)	12	20,7	25,9
Módulo de elasticidad (E)	6900	8000	10500

Especies utilizadas

Los productos de maderas aserradas en Nueva Zelanda son categorizados por las normas de clasificación - estándar neozelandés NZS3631:1988; Normas de clasificación de madera neozelandesa. El estándar separa a todas las especie en tres grupos: maderas blandas nativas, maderas duras y blandas exóticas (importadas y las que se producen en Nueva Zelanda). Para propósito de esta comparación se utiliza el tercer grupo pues es el grupo más común usado para producir madera estructural en Nueva Zelanda usando pino radiata (Timbersa, 2006).

2.4.3 International standard organization (ISO)

Detalles de los valores mecánicos de fuerza

Los grados de resistencia ISO están basados en grupos de resistencia y proporcionan el estrés básico de la madera para propósitos de diseño. Estos sistemas de clases de resistencia tampoco son específicos acerca de que si se refieren a una clasificación de la madera visual o de máquina. Las resistencias mínimas requeridas por el sistema de la ISO se pueden apreciar en el cuadro 3.

Cuadro 3. Requisitos mínimos de fuerza para grados ISO

Propiedades mecánicas	Grados de fuerza						
	ISO						
Mpa	S10	S12	S14	S16	S18	S20	S22
Tensión estática	10	12	14	16	18	20	22
Tensión paralela al grano	6	7	8	10	11	12	13
Compresión paralela al grano	18	19	20	20	21	22	23
Módulo de elasticidad	6,200	7,000	7,800	8,600	9,300	10,000	10,700

Propiedades mecánicas	Grados de fuerza						
Mpa	ISO						
	S24	S27	S30	S35	S40	S45	S50
Tensión estática	24	27	30	35	40	45	50
Tensión paralela al grano	14	16	18	21	24	27	3
Compresión paralela al grano	24	26	27	30	32	34	37
Módulo de elasticidad	11,400	12,400	13,300	14,900	16,300	17,700	19,100

Especies utilizadas

Esta norma ISO fue ideada para maderas blandas sobre una base internacional. Esto significa que la norma debe cubrir todas las especies de madera blanda usadas para construcción o propósitos estructurales. Como por ejemplo abetos, cedros y la mayoría de los pinos (Timbera, 2006).

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Material

3.1.1 Ubicación del área de estudio

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto FONDEF D031-1128 “Calidad de rollizos”, que se realiza bajo el apoyo de la Universidad Austral de Chile y las empresas forestales Forestal Minínco, Forestal Bío-Bío y Forestal Masisa.

Los rodales disponibles para este estudio (un rodal por sitio) están ubicados en el Fundo Ranchillo (Lat. 36°04' - Long. 71°27') a 478 ms.n.m, Fundo Los Mellicos (Lat. 37°41' - Long. 72°43') a 415 ms.n.m y Fundo P-20 Col Lautaro (Lat. 38°34' - Long. 72°40') a 230 ms.n.m.

Los sitios estudiados son descritos de acuerdo al sistema de ordenamiento de la tierra propuesto por Schlatter *et al.* (1994), donde se contempla una descripción de zonas y distritos y en base al análisis físico y químico de suelos realizado en el laboratorio de suelos de la Universidad Austral de Chile.

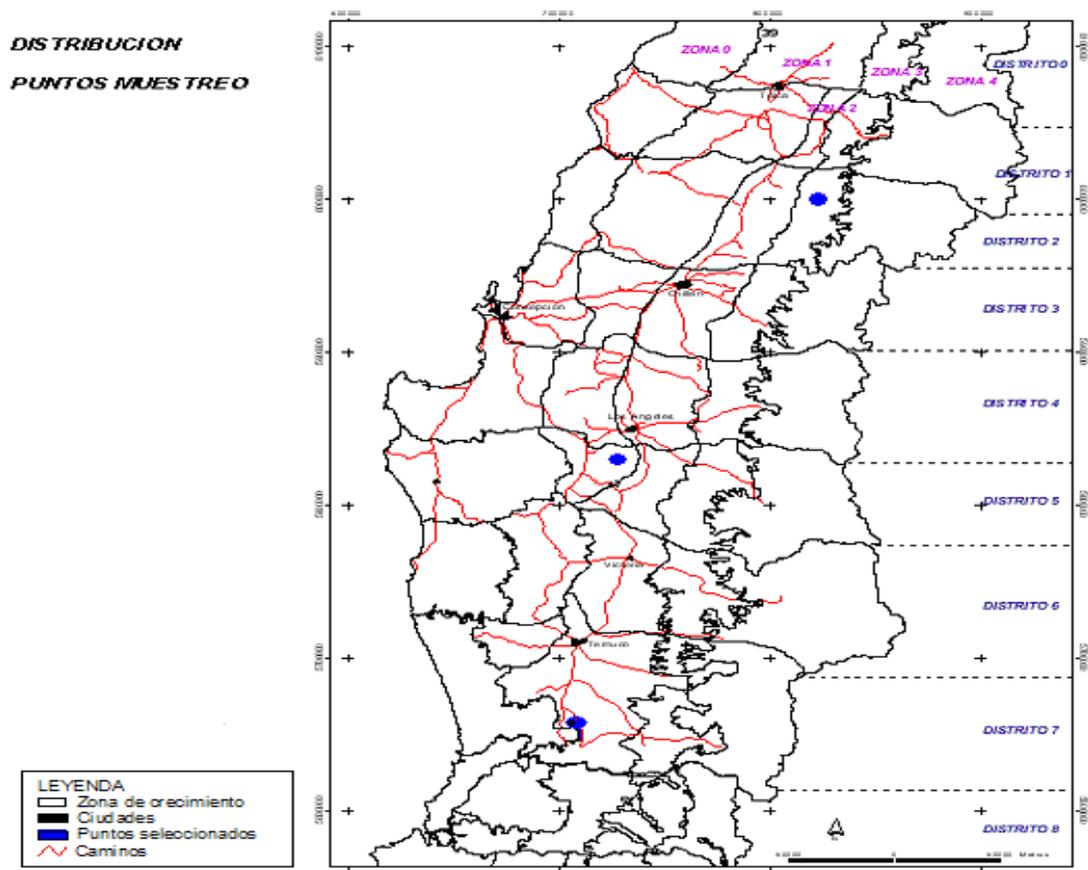


Figura 1. Ubicación de los sitio

3.1.2 Climas

El Predio Ranchillo se ubica en la precordillera en la zona 3, distrito 2, presenta suelos rojos arcillosos, tiene un clima del tipo templado mesotermal inferior estenotérmico mediterráneo sub-húmedo, donde la precipitación total anual varía entre 1.100 y 2.200 mm. El régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían, en promedio, entre una máxima de Enero de 29.3° C y una mínima de Julio de 3.3° C. Las temperaturas invernales son bajas, con alta incidencia de heladas que varían entre 135 y 215 días/año y veranos calurosos.

El Predio Los Mellicos se ubica en el valle central en la zona 1, distrito 5, presenta suelos graníticos, tiene un clima del tipo templado mesotermal inferior estenotérmico mediterráneo sub-húmedo, donde la precipitación total anual varía entre 950 y 1.200 mm. El régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían, en promedio, entre una máxima de Enero de 27.1° C y una mínima de Julio de 4.1° C. Las heladas varían entre 95 y 145 días/año.

El Predio P-20 Lautaro se ubica en la costa en la zona 2, distrito 7, presenta suelos rojos arcillosos, tiene un clima del tipo templado mesotermal inferior estenotérmico mediterráneo sub-húmedo, donde la precipitación total anual varía entre 1.200 y 2.300 mm. El régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían, en promedio, entre una máxima de Enero de 29.3° C y una mínima de Julio de 3.3° C. Las heladas varían entre 165 y 215 días/año.

3.1.3 Suelos

En los siguientes cuadros se muestran las principales características físicas y químicas de los suelos

Análisis físico

Cuadro 4. Análisis físico de suelos

Predio	Prof. Arraig	Mat. Form	Dren. Ext	Dren. Int	Alt. Hz A	Alt. Hz B
Ranchillo	150+	Metamórficos	Rápido	Lento	11	66
Los mellicos	135+	Graníticos	Rápido	Rápido	23	56
P-20Col Lautaro	150+	Metamórficos	Moderado	Lento	8	142
Predio	Text. A	Estruc. HzA	% Esq. HzA	Text. B	Estruc. HzB	% Esq. Hz-B
Ranchillo	Arcilla arenosa	Poliédrica	Moderado (10-25%)	Franco arenoso	Poliédrica	Alto (25-50%)
Los mellicos	Arcilla limosa arcilla franca	Poliédrica	Bajo (1-10%)	Franco limoso	Subpoliédrica	Bajo (1-10%)
P-20Col Lautaro	Franco arcilloso	Subpoliédrica	Bajo (1-10%)	Arcilla	Poliédrica	Bajo (10%)

Análisis químico

Cuadro 5. Análisis químico de suelos

Predio	P. seco Hz. A	P. seco Hz. B	D.A Hz.A	D.A Hz. B	pH. H ₂ O Mz	pH. H ₂ O Hz. A	pH. H ₂ O Hz. B	pH. KCl Mz	pH. KCl Hz. A
Ranchillo	315,7	380,0	1,05	1,27	5,8	5,8	5,9	4,5	4,4
Los mellicos	301,8	397,0	1,01	1,32	5,6	5,6	5,3	4,9	4,8
P-20Col Lautaro	306,6	357,3	1,02	1,19	5,8	5,4	6,1	4,9	4,5
Predio	pH. KCl Hz. B	C Mz	C Hz. A	Nt Mz	Nt Hz. A	B Mz	B Hz. A	B Hz. B	
Ranchillo	4,3	3,4	5,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	
Los mellicos	4,3	5,0	4,0	0,3	0,2	0,5	0,4	0,3	
P-20Col Lautaro	5,0	4,5	6,5	0,3	0,3	0,5	0,7	0,3	

Los suelos en general son de densidad aparente media, fuertemente ácidos a moderadamente ácidos y presentan un contenido de C medio a alto. Las principales diferencias son con respecto al elemento boro, donde el sitio con IS 28,8 presenta niveles muy bajos de este elemento, mientras que los otros sitios presentan niveles bajos a medios.

3.1.4 Manejo de las plantaciones

El tipo de manejo y el índice de sitio son descritos en el cuadro 6.

Cuadro 6. Manejo de las plantaciones

Predio	Índice de sitio	Año plantación	Densidad inicial (ind/há)	Densidad actual (ind/há)	Año poda	Año raleo
Ranchillo	28,8	1996	1100	775	2004	2002
Los Mellicos	26,8	1996	904	825	2003	2003
P-20Col Lautaro	30,6	1997	1100	800	2003	2003

3.2 Metodología

3.2.1 Obtención de datos

La obtención de datos se realizó en rodales manejados de acuerdo al “manual de procedimientos de inventario forestal de plantaciones de pino radiata, muestreo extensivo”. Luego para la depuración de datos, se considerarán los individuos rectos, que no presenten curvaturas severas y no posean daños evidentes, además se excluirán de la muestra aquellos individuos no podados (Anexo 1).

Variables medidas sobre los árboles en pie

- Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Se midió con huincha diamétrica a 1,3 m sobre el suelo y se cuantifico en mm.

- Altura total y altura de poda

Ambas alturas se registraron con hipsómetro Vertex y se cuantificó en cm.

- Rectitud e inclinación

Se realizó de acuerdo a la metodología descrita en el Anexo 1.

- Tiempo sónico y módulo de elasticidad

La medición del módulo de elasticidad se realizó de manera indirecta usando un aparato de origen húngaro llamado *Fakopp tree sonic*, que fue diseñado especialmente para la medición sobre árboles en pie y que registra el tiempo sónico de una onda de tensión. Este instrumento consta de dos cátodos, un acelerómetro receptor ubicado a 0,5 m sobre la tierra y un acelerómetro transmisor insertado en el tronco del árbol a 1,5 m sobre la tierra donde se mide la velocidad de onda longitudinal, propagada por un pequeño golpe proporcionado por un martillo, luego el tiempo de transmisión queda registrada en un osciloscopio. A cada individuo se le realizarán tres mediciones de tiempo sónico y luego se trabajará con la mediana de los tres datos. Para calcular el módulo de elasticidad dinámico verde se usará la siguiente fórmula:



Figura 2. Medición del módulo de elasticidad en árboles en pie.

Módulo de elasticidad = $V^2 * D$; donde V corresponde a la velocidad sónica de la onda de esfuerzo que se mide en m/seg y D que corresponde a la densidad verde de la madera que se asume constante en 1.000 kg/m^3 . Además los datos fueron corregidos de acuerdo a especificaciones de Fakopp en +4 m/s. Una de las limitantes

de este método es que sólo mide el módulo de elasticidad dentro de unos pocos anillos de crecimiento.

3.2.2 *Análisis estadístico*

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizó el paquete estadístico Systat 11.

Estadística descriptiva

El cálculo de estadísticos descriptivos consideró:

- Media
- Mínimo
- Máximo
- Coeficiente de variación

Todos estos cálculos de estadística descriptiva se realizaron sobre el módulo de elasticidad de los tres sitios para así observar su comportamiento.

Estadística de inferencia

Se estudió la diferencia de medias del módulo de elasticidad entre los sitios y dentro de los sitios a través de análisis de varianzas de un factor, con un 95% de confianza. Para el análisis entre los sitios el factor utilizado fue el índice de sitio, mientras que para el análisis dentro de los sitios se realizó una agrupación en cuartiles utilizando como factor el dap, la altura y la relación altura/dap, cada uno de manera independiente.

Las diferencias significativas que arrojaron los análisis de varianzas, condujo a la realización de pruebas de comparaciones múltiples, para observar que grupos eran distintos unos de otros, para este caso se utilizó el test de Tukey con un 95% de confianza.

El modelo de ANDEVA entre y dentro de los sitios es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \xi_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Módulo de elasticidad

μ = Media del módulo de elasticidad

τ_i = Efecto del sitio; cuartiles (dap, altura y altura/dap)

ξ_{ij} = Error experimental

Análisis de correlación

Para observar cuantitativamente hasta que grado está relacionado el módulo de elasticidad con las distintas variables del árbol, se obtuvo el coeficiente de correlación simple, que determinó la dependencia existente entre las variables

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización general de los rodales

Descripción de los sitios

En el cuadro 7 se describen los estadísticos descriptivos para las variables diámetro a altura del pecho, altura total y módulo de elasticidad para los 3 sitios en estudio, que corresponden a S1 (Ranchillo), S2 (Los Mellicos) y S3 (P-20 Col Lautaro).

Cuadro 7. Estadísticos descriptivos de los rodales

	Media			Mínimo			Máximo			CV %		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Dap (cm)	15,7	16,7	18,2	11,0	10,1	12,4	21,7	22,0	22,5	16,1	17,9	14,7
Altura (m)	11,7	12,4	11,9	4,7	9,7	8,9	13,6	14,2	13,6	14,7	9,5	8,5
E (Gpa)	7,2	8,1	5,9	5,6	4,5	4,1	9,5	12,6	7,8	14,2	25,4	13,4

Los resultados muestran que el sitio 3 posee una mayor media, un mayor mínimo y máximo de dap y los valores más bajos de módulo de elasticidad, lo que podría indicar que en sitios de la misma edad y de igual manejo, pero con mayores tasas de crecimiento en diámetro es esperable encontrar valores más bajos de stiffness que en sitios con menores tasas de crecimiento. Estos resultados son similares a los encontrados por Lindström *et al.* (2002), que señala para un grupo de clones de pino radiata de cuatro años y que presentan diámetros medios de 120 mm y 135 mm, clases de stiffness altas y bajas respectivamente.

En general, estos bajos valores pueden ser explicados entre otras cosas por la baja densidad a la que están creciendo los árboles, ya que como señala Lasserre *et al.* (2004), existen diferencias de hasta 1,8 Gpa en las medias del módulo de elasticidad en rodales cuya densidad inicial eran de 833 y 2500 ind/ha, donde los mejores valores corresponden al rodal con mayor densidad inicial. Otro aspecto que puede influir en los moderados módulos de elasticidad encontrados en los tres sitios, tienen relación con la altura del árbol a la que fue medida el tiempo de vuelo del sonido. Con respecto a esto Burdon *et al.* (2005) señala que la madera de pino radiata de la primera troza muestra características anómalas de alto ángulo microfibrilar, lo que trae como consecuencia bajos valores de módulo de elasticidad.

Finalmente el coeficiente de variación muestra un 14,2%, 25,4% y un 13,4% para el módulo de elasticidad de los tres sitios y que además el sitio con mejores valores de stiffness es el que presenta mayor coeficiente de variación, lo que estaría indicando que dentro de un mismo sitio se podrían encontrar individuos con valores muy diversos de módulo de elasticidad lo que complicaría una segregación de madera de mejor calidad estructural por sitio. De ser así, la atención tendría que enfocarse en los individuos con más altas elasticidades dentro de cada sitio para realizar una selección estructural adecuada. Esta gran variación en las elasticidades fue

encontrada también por Grabianowsky *et al.* (2004) pero en un rodal adulto de pino radiata (27 años), donde encontró variaciones en el módulo de elasticidad de madera madura que van desde los 7 Gpa a 13,5 Gpa.

La Figura 3 presentada a continuación, muestra la frecuencia (%) de árboles por clases de módulo de elasticidad para los tres sitios en estudio. Los valores fueron agrupados en 9 clases, donde las primeras son las clases más bajas. Mientras que la Figura 4 exhibe el módulo de elasticidad para todos los árboles muestreados en tres condiciones de sitio.

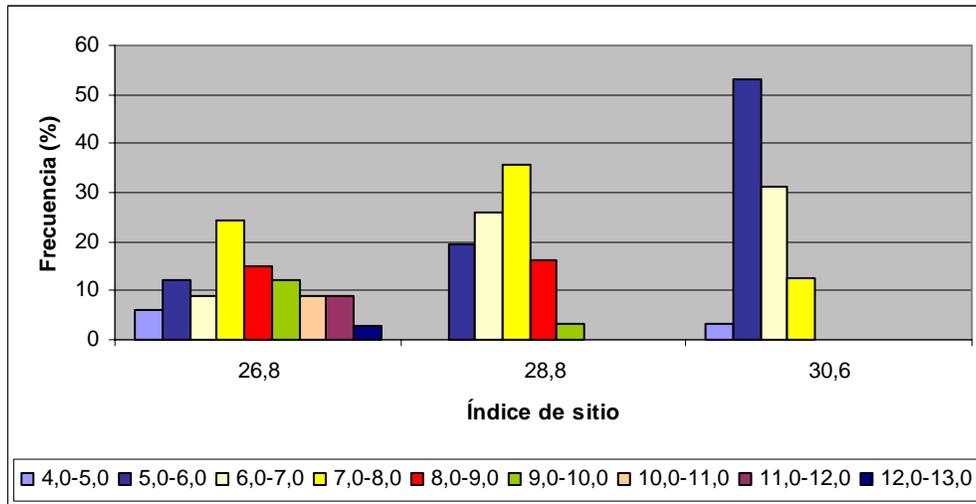


Figura 3. Frecuencia de árboles por clases de módulo de elasticidad (Gpa) a nivel de sitio

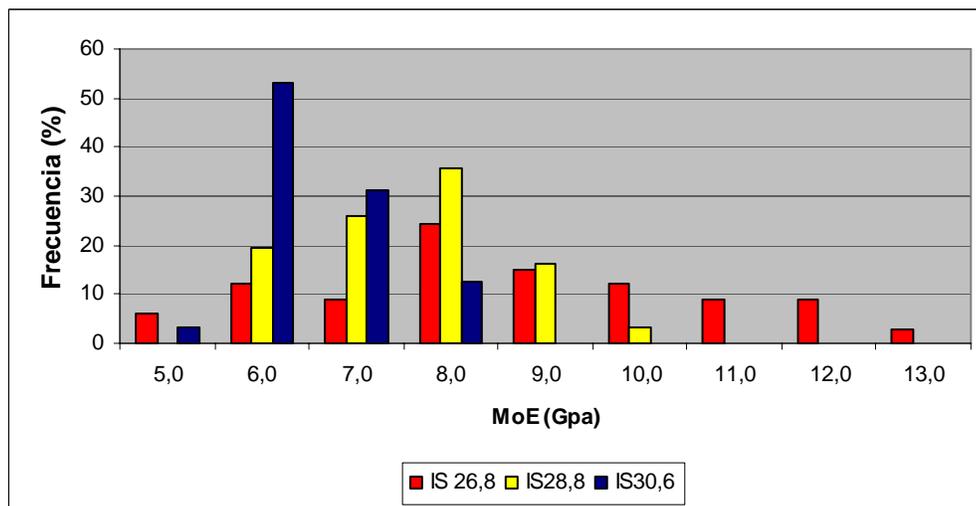


Figura 4. Módulo de elasticidad para árboles en las tres condiciones de sitio

Se puede observar en las Figuras 3 y 4, que existe una gran variabilidad de clases para los tres sitios y que es propia de la madera juvenil, donde además se ve claramente como el sitio con menor IS es el que presenta el rango más amplio de elasticidades, pero además es el único que alcanza valores por sobre los 10 Gpa. El

sitio con mejor IS presenta la mayor frecuencia de sus individuos en las clases inferiores de módulo de elasticidad, mientras que IS 28,8 presenta valores intermedios. También se aprecia que a medida que aumenta el índice de sitio disminuye un poco la variabilidad dentro del sitio, pero además aumenta la frecuencia de las clases menores y las clases superiores tienden a desaparecer.

La Figura 4 muestra que el módulo de elasticidad se comporta de manera diferente entre los sitios y que en general los valores son bastante bajos, a excepción de algunos individuos en el sitio que tiene menores crecimientos. En general, esta tendencia que presentan los sitios con menores tasas de crecimiento a tener mejores elasticidades, se debe, principalmente, a la menor cantidad de madera temprana que generan en el árbol, con respecto a los que tienen tasas más rápidas de crecimiento. Con respecto a esto, Cramer *et al.* (2005) encontró en una investigación sobre la especie Loblolly pine promedios de elasticidades de 4,34 Gpa en madera temprana, mientras que en madera tardía el promedio fue de 9,88 Gpa.

Esto demuestra lo difícil que sería clasificar un sitio dentro de cierta calidad para producir madera estructural, pero centra la atención en una segregación de árboles en pie con mayores índices de calidad, y como señala Lindström *et al.* (2004), una evaluación temprana podría utilizarse como una herramienta de selección genética en la producción de árboles con una mejor performance de la madera juvenil de pino radiata.

De acuerdo al análisis químico de suelos (ver cuadro 5), se encontró una leve diferencia entre los rodales con IS 26,8 y 28,8 que presentan cantidades bajas a muy bajas del elemento boro, a diferencia del rodal con IS 30,3 que presenta valores medios a bajos de este elemento, lo que podría estar sugiriendo que suelos con mayores cantidades de boro producirían individuos con menores elasticidades, esto tendría que ser investigado en sitios con diferencias mas amplias de este elemento para de así confirmar esta hipótesis. En relación a esto, un estudio en Australia realizado por Maclaren (2004), señala que una fertilización general provoca un aumento del ángulo microfibrilar y como consecuencia una disminución del módulo de elasticidad.

Estos resultados en conjunto señalan que en sitios con mayores tasas de crecimiento, donde se tendría que realizar un manejo destinado a producir madera de alta calidad clear, no se debe esperar una buena calidad estructural, al contrario, lo que se observa es que en rodales con menores índices de sitio se encuentran los pocos individuos con mejores elasticidades. Entonces el manejo para producir madera clear, como es el caso de los rodales estudiados, no va de la mano con una mejor calidad estructural. También es importante destacar la importancia del sitio y del manejo para un objetivo de producción específico, donde para el caso estructural se sugiere una mayor densidad inicial y sitios con menores tasas de crecimiento.

4.2 Comportamiento del módulo de elasticidad

En este capítulo se observa el comportamiento del módulo de elasticidad en relación con características individuales del árbol, como el diámetro, la altura y la relación altura/dap.

Comportamiento del módulo de elasticidad en relación con el diámetro

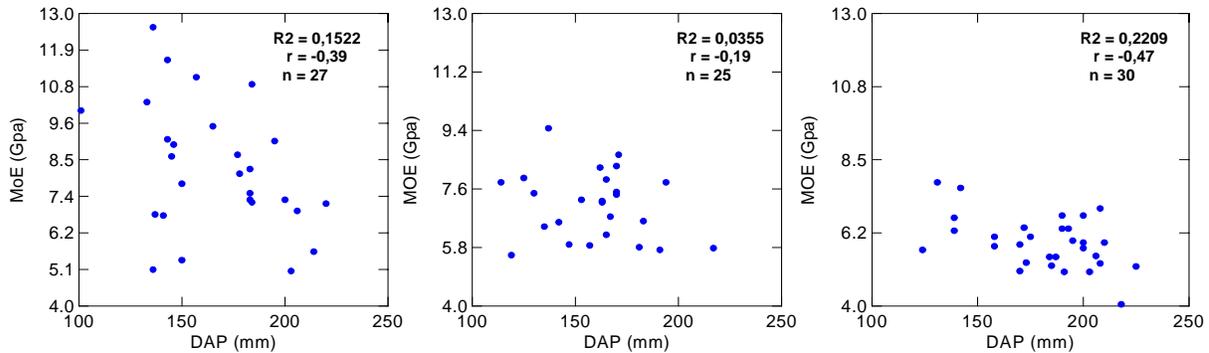


Figura 5. Relación entre el módulo de elasticidad y el diámetro para IS 26,8, 28,8 y 30,6.

Se puede observar en la Figura 5 una relación lineal negativa para los distintos sitios, donde el diámetro explica el 15 y 22% de la variación del módulo de elasticidad para los índices de sitio 26,8 y 30,6, mientras que para el sitio con IS 30,6 esta relación es menos clara, sólo se explica el 3,5% de la variación. Estos resultados son un poco más bajos a los encontrados por Lasserre *et al.* (2004) que encontró en clones de pino radiata de 11 una significación negativa ($p < 0.001$) entre la relación del DAP y el módulo de elasticidad, que explicó el 57%, 56% y el 14% de la variación para los clones. Carter *et al.* (2005) también señala una relación moderada entre el diámetro y el stiffness para la especie pino oregón donde el diámetro sólo explicaba el 25% y el 0,9% para distintos rodales. Los coeficientes de correlación observados indican que existe una asociación lineal moderada de un -0,39, -0,19 y -0,47 para los tres índices de sitio.

Lasserre *et al.* (2004) señala también que una posible explicación para esta relación puede ser la variación en el porcentaje de madera tardía entre árboles de mayores y menores diámetros, ya que los árboles de grandes diámetros tienen un menor porcentaje de madera tardía y menor densidad, que los árboles con diámetros pequeños. Dado que las fibras de la madera tardía muestran una mayor elasticidad que la madera temprana, el menor porcentaje de madera tardía en árboles mayores podría ser la razón de la baja elasticidad en esos árboles.

Comportamiento del módulo de elasticidad en relación con la altura del árbol

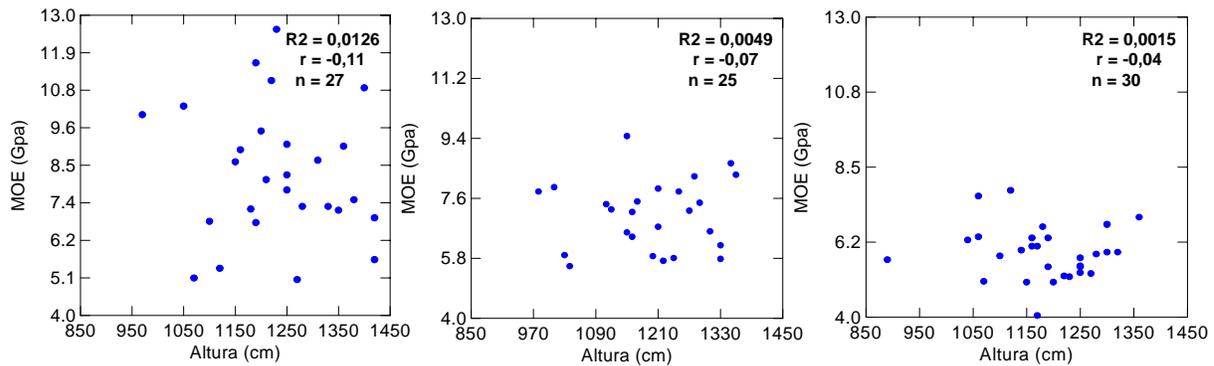


Figura 6. Relación entre el módulo de elasticidad y la altura para IS 26,8, 28,8 y 30,6.

Los resultados observados en la Figura 6 muestran la casi nula relación que existe entre el módulo de elasticidad y la altura del árbol: sólo se explica el 1%, 0,4% y el 0,1% de la variación. Una explicación puede ser la poca variación en alturas que presentan los sitios, lo que no permitió que se encontrara alguna relación importante, o simplemente que la altura del árbol no explica la variación del módulo de elasticidad. Estas relaciones son inferiores a los encontrados por Grabianowski *et al.* (2004), que señala un R^2 de 0,236 para la velocidad del sonido y la altura del árbol. Los coeficientes de correlación, por otro lado, indican la poca asociación lineal que existe entre el módulo de elasticidad y la altura del árbol.

Más que la altura del árbol en si, es importante la altura a la que es muestreado el árbol, tal como señala Burdon *et al.* (2004) que encontró en *Pinus taeda* un alto ángulo microfibrilar y un bajo módulo de elasticidad a nivel del suelo (primera troza).

Comportamiento del módulo de elasticidad en relación con altura/dap

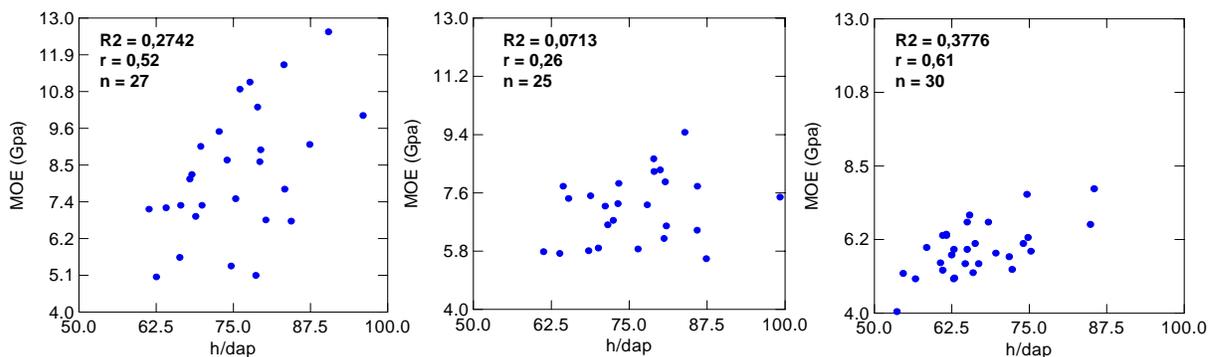


Figura 7. Relación entre el módulo de elasticidad y la relación altura/dap para IS 26,8, 28,8 y 30,6.

Los resultados observados en la Figura 7 muestran una mayor relación entre el módulo de elasticidad y altura/dap, explicando el 7%, 27% y el 37% de la variación para los distintos sitios. Siendo esta variable (altura/dap), la que mejor explica la

variación del módulo de elasticidad de las tres que se estudiaron. Cuando la relación altura/dap es mayor se obtienen mayores elasticidades. De cierto modo, esto quiere decir que árboles altos y con diámetros pequeños, presentan mayor módulo de elasticidad que árboles más bajos con diámetros mayores, donde la relación altura/dap presenta un valor menor. Estos resultados coinciden a los encontrados por Grabianowski *et al.* (2004), que señala para la relación velocidad acústica y altura/dap un R^2 de 0,236, y que fue la característica del árbol que mejor explicaba la variación de la velocidad del sonido.

Estas bajas relaciones encontradas entre el módulo de elasticidad dinámico con la altura del árbol, el diámetro y la relación altura/dap indican que existen otras características que explican de mejor manera la variación del stiffness dentro del árbol.

Distintas investigaciones señalan que la variable que mejor explica la variación del módulo de elasticidad en madera juvenil a nivel de árbol es el ángulo microfibrilar de la capa S_2 de la pared celular. Maclaren (2002) señala que el módulo de elasticidad de la madera aumenta 5 veces cuando el ángulo microfibrilar disminuye de 40° a 10° . El mismo autor señala que el ángulo microfibrilar es afectado por el envejecimiento fisiológico (cada año de envejecimiento disminuye en 1° el ángulo microfibrilar). De esta manera una posible solución al problema puede ser el uso de cuttings de mayor edad, para producir madera con mejor calidad estructural. Lindström *et al.* (2002) encontró diferencias de 2,29 Gpa para clones de pino radiata que tenían una diferencia en ángulo microfibrilar de $7,1^\circ$. En otro estudio Lindström *et al.* (2004) encontró un coeficiente de correlación entre el módulo de elasticidad y el ángulo microfibrilar de -0,75, esto indica que a medida que el ángulo de la microfibrilla disminuye la elasticidad aumenta.

4.3 Inferencia estadística

Análisis entre los sitios

Los resultados del análisis de varianza mostraron que existen diferencias significativas del módulo de elasticidad con respecto a la variable “índice de sitio”, lo que comprueba la importancia que tiene el sitio sobre esta propiedad de la madera. La prueba de comparaciones múltiples (Test de Tukey) arrojó diferencias entre los tres sitios, pero la mayor diferencia se observó entre los IS 26,8 y 30,6 (ver Anexo 2).

La causa más probable de esta variación son las menores tasas de crecimiento de los sitios con mayores valores de elasticidades. Otra de las posibles causas podría ser la influencia del viento, variable que no pudo ser medida en esta investigación, ya que tal como señala Grabianowski *et al.* (2004) una combinación del viento y del desecamiento (vientos con muy baja humedad) pueden influenciar sobre algunas propiedades de la madera. También se observó que el sitio que presenta suelos arcillosos y mayores cantidades de boro (IS 30,6), es el que muestra las peores elasticidades con respecto al sitio (IS 26,8) que tiene suelos graníticos y posee

menores cantidades de boro. Estas hipótesis abren futuras ventanas de investigación.

Análisis dentro de los sitios

Los análisis de varianza para cada factor independiente (dap, altura y altura/dap), no mostraron diferencias significativas en el módulo de elasticidad para un 95% de confianza dentro de cada sitio (ver Anexo 2). Esto indica que dentro del rodal la variación del módulo de elasticidad dinámico no es significativa en relación a las características del árbol que fueron analizadas. Lo más probable es que la variación del módulo de elasticidad para los individuos dentro de un mismo rodal, esté relacionado con propiedades internas de la madera, siendo el ángulo microfibrilar, la densidad de la madera o el grano espiralado las probables explicaciones de la variación de la elasticidad entre árboles.

4.4 Potencialidad de los sitios para producir madera estructural

A modo de ejercicio, se muestra en este capítulo la potencialidad de los rodales jóvenes para producir madera de alta calidad estructural dentro de cada sitio. Cabe señalar que el instrumento utilizado para obtener el módulo de elasticidad del árbol en pie, sólo entrega valores de unos pocos anillos de crecimiento, y para que los resultados mostrados a continuación fueran altamente confiables, tendrían que correlacionarse con valores de elasticidades de trozas obtenidas de los mismos árboles y medidas con otro instrumento.

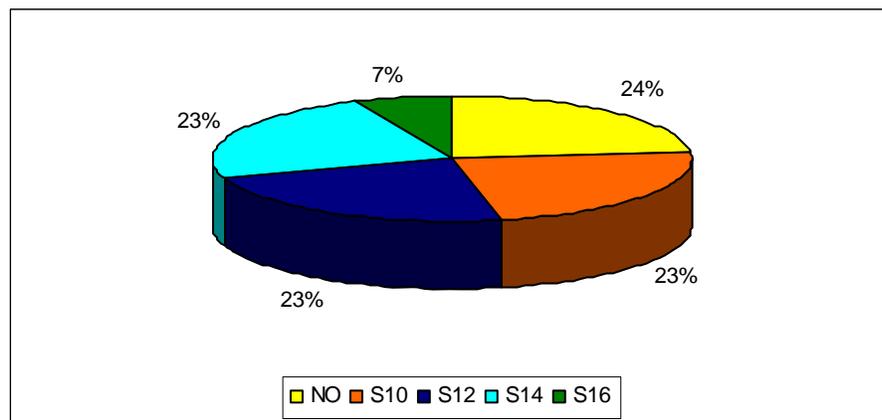


Figura 8. Comportamiento del sitio 1 en relación a grados estructurales ISO

En La Figura 8 se puede apreciar que el 24% de los individuos del rodal no alcanza a clasificar para el grado estructural mínimo de la clasificación ISO, mientras que el 76% restante clasifica solo dentro de los grados menores (S10 al S16). Considerando que el mayor grado es el S50, cuyo valor mínimo aceptable es de 19,200 mega pascales, los individuos de este sitio no serían interesantes para fines de madera estructural.

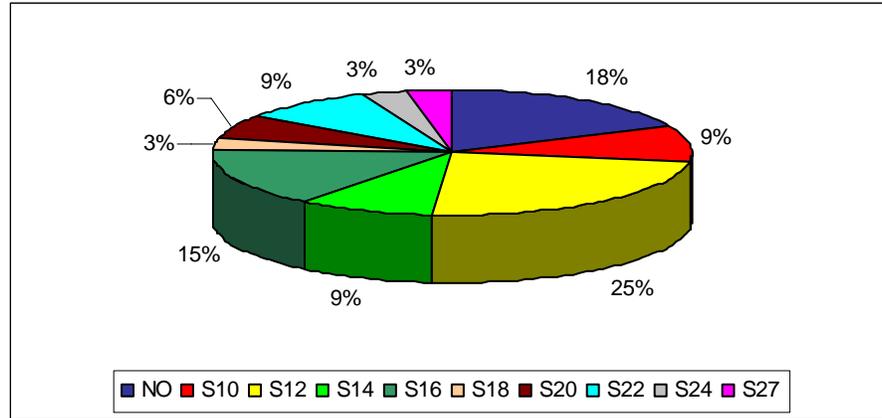


Figura 9. Comportamiento del sitio 2 en relación a grados estructurales ISO.

En la Figura 9 se puede observar que existe una mayor variabilidad de grados estructurales comparados con el sitio 1, y que sigue existiendo un porcentaje importante (18%) de los individuos que no alcanzan a calificar para el grado estructural mínimo, mientras que el 61% califica dentro de rangos inferiores (del grado S10 al S18) y un 15% lo hace en grados intermedios (S20 y S22). Pero a diferencia del sitio 1 existe un 6% de los individuos que clasifican dentro de grados estructurales relativamente mejores (S24 y S27), donde la exigencia mínima es de 11,400 y 12,400 mega pascales respectivamente.

Ahora, si se analizan estos valores con respecto a la clasificación neozelandesa y australiana, se puede ver que el 15% de los individuos clasifica en el grado “engineering”, que es el más alto para los neozelandeses y que el 3% clasifica para el grado F14 que es el más alto para los australianos. Estos valores se pueden apreciar con mayor detalle en el Anexo 3.

Si bien este sitio posee una alta variabilidad de grados, existe un 16% de los individuos que entran en los rangos más altos de clasificación para madera estructural, tanto para Australia, Nueva Zelanda e ISO, lo que indicaría que es un mejor sitio para producir madera de mejor calidad o que existen individuos dentro del rodal con un mayor potencial para este tipo de productos. Esto pone de manifiesto la importancia que tiene la segregación de madera dentro de los sitios, ya que como señala Carter *et al.* (2005), se mejora la planificación de la cosecha y comercialización de la madera basada en el rendimiento potencial de los productos que pueden obtenerse de los árboles dentro de un rodal.

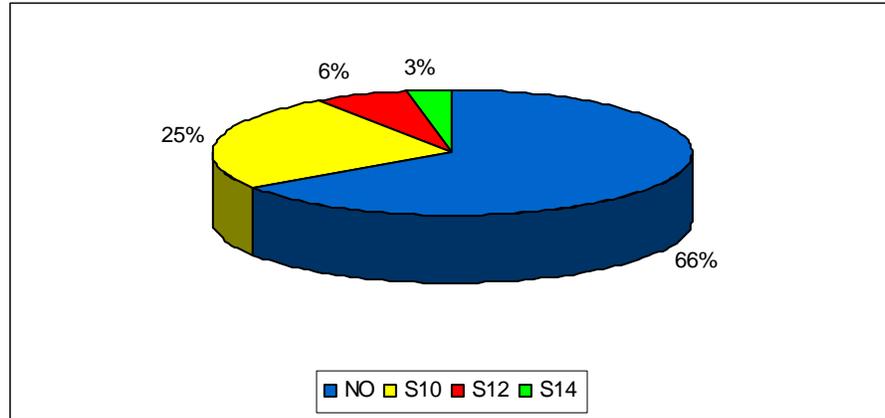


Figura 10. Comportamiento del sitio 3 para grados estructurales ISO

Claramente, se observa en la Figura 10 que este sitio no presenta potencialidad para producir madera estructural, ya que el 66% de los individuos no alcanza a clasificar en el grado mínimo, y el 34% restante solo lo hace en grados inferiores.

Para el caso de la clasificación australiana y neozelandesa ocurre algo similar, el 59% y el 87% de los individuos no alcanza a cumplir con el mínimo de los requisitos exigidos por estas normas, para más detalle ver Anexo 3.

En general, los bajos valores de stiffness que presentan los sitios son propios de la especie pino radiata y de la madera juvenil, tal como indica Lasserre *et al.* (2004) que señala con respecto a la madera juvenil de pino radiata que esta posee una baja calidad y un bajo módulo de elasticidad.

5. CONCLUSIONES

Con respecto a las correlaciones entre las distintas características del árbol y el módulo de elasticidad, se puede concluir que la variable que mejor se asocia con esta última es la relación altura/dap, donde los coeficientes de correlación fueron de 0,52, 0,26 y 0,61 para los tres sitios. La siguiente variable fue el diámetro a la altura del pecho, donde los coeficientes de correlación fueron de -0,39, -0,19 y -0,47, y por último la variable que menos se asocia con el módulo de elasticidad fue la altura del árbol, donde las correlaciones solo alcanzaron valores de -0,11, -0,07 y -0,04. La relación altura/dap, que fue la que mejor asociación tuvo con el módulo de elasticidad, quiere decir de cierto modo, que árboles altos con diámetros pequeños tienen mayor elasticidad que árboles más bajos o de tamaño similar pero con diámetros mayores. La relación negativa entre el dap y el módulo de elasticidad, indica algo similar, donde árboles con mayores diámetros presentan menor elasticidad que árboles con diámetros menores.

Los coeficientes de variación para el módulo de elasticidad dentro de los rodales fueron de 14,2%, 25,4% y 13,4% para los sitios 1, 2 y 3 respectivamente. En general los valores de elasticidades son bastante bajos, siendo el sitio 2, que posee el menor índice de sitio (26,8), el que presenta un mayor CV y los valores más altos de módulo de elasticidad. Mientras que el sitio 3 (IS 30,6), que posee las mayores tasas de crecimiento en diámetro, es el que tiene los valores más bajos stiffness. Esto se explica debido a la mayor cantidad de madera temprana que poseen los árboles con mayores crecimientos, lo que conduce a un mayor ángulo microfibrilar y menor módulo de elasticidad. Todo lo contrario ocurre con los árboles con menores crecimientos, donde los árboles presentan mayor cantidad de madera tardía, que a su vez se caracteriza por tener paredes celulares con menores ángulos microfibrilares, y como consecuencia, mayor stiffness.

El análisis de varianza muestran diferencias significativas entre los tres sitios para la variable módulo de elasticidad, donde posteriormente, la prueba de comparación múltiple arrojó que la mayor diferencia ocurre entre los sitios con IS 26,8 (suelos graníticos) e IS 30,6 (suelos rojos arcillosos), pero estos no presentan alguna diferencia importante de acuerdo a lo arrojado por el análisis químico de suelos. Sin embargo, los resultados avalan la importancia que el sitio tiene sobre la característica de la madera estudiada.

Los análisis de varianza dentro de los sitios, para un nivel de confianza del 95% y que estudia la variación del módulo de elasticidad con respecto a características de los árboles, tales como el diámetro, la altura y la relación altura/dap, no arrojaron diferencias significativas en ninguno de los casos.

El potencial de estos rodales jóvenes para producir madera de cierta calidad estructural, indica que el sitio con IS 26,8 es el que presenta la mejor calidad estructural de acuerdo a la clasificación de grados estructurales ISO, donde algunos individuos (6%) dentro del rodal alcanzan grados estructurales S24 y S27, que son grados relativamente buenos. Sin embargo, este mismo sitio posee una alta

variabilidad de calidad estructural, donde por ejemplo, el 18% de los individuos no clasifican en el grado estructural mínimo. Por otro lado, el sitio con IS 30,6 es el que presenta la peor calidad estructural, donde el 66% de los árboles no entra en el grado mínimo y donde solo el 34% clasifica en los grados estructurales menores. Esta posible clasificación señala la importancia que tiene la segregación de árboles o trozas dentro del rodal. Cabe mencionar que estos resultados están condicionados por la validez del instrumento fakopp tree sonic.

Finalmente, esta variación de la elasticidad entre los rodales y entre los árboles dentro de los rodales, indica la importancia de la evaluación temprana a través de esta técnica no destructiva sobre árboles en pie, que sirve como herramienta para la toma de decisiones tanto para la planificación de la cosecha, como del raleo, donde el objetivo de la planificación tendría que apuntar a conocer la calidad del recurso para así destinarlo a los mercados adecuados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Burdon, R.; R. Kibblewhite.; J. Walker.; R. Megraw.; R. Evans.; J. Cown. 2004. Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. Forest Science 50(40): 399-413
- 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.
- Carter, P.; X. Wang.; R. Ross.; D. Briggs. 2005. Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. Washington Publications 1-25.
- Cave, I.; J. Walker. 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. Forest Products Journal 44(5):43-48.
- Corma. 2005. La construcción de viviendas de Madera. INTERNET: <http://descom.jmc.utfsm.cl/PROI/materiales/maderas/maderasBASICO.pdf> (Agosto 13, 2005)
- Cramer, S.; D. Kretschmann; R. Lakes; T. Schmidt. 2005. Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine. Holzforschung 59: 531-538
- Delmastro, R.; J. Díaz-vaz.; J. Schlatter. 1980. Variabilidad de las características hereditarias del *Pinus radiata* (D. Don). Revisión bibliográfica. Chile, 157p.
- Díaz-Vaz, J. 2003. Anatomía de maderas. Primera edición. Chile, Marisa Cuneo ediciones. 151p.
- Grabianowski, M.; B. Manley.; J. Walker. 2004. Impact of stocking and exposure on outerwood acoustic properties of *Pinus radiata* in Eyrewell Forest. New Zealand Journal of Forestry 13-17
- Hansen, L.; R. Knowles.; G. Walford. 2004. Residual Within-Tree Variation in Stiffness of Small Clear Specimens from *Pinus radiata* and *Pseudotsuga menziesii*. New Zealand Journal of Forestry Science 34(2): 206-214
- Hayes, M.; J. Chen. 2003. A portable stress wave measurement system for timber inspection. Dept. of Electrical and Computer Engineering. University of Canterbury. 6p.
- Knowles, R.; L. Hansen. 2004. Evaluation of Nondestructive Methods for Assessing Stiffness of Douglas Fir Tress. New Zealand Forest Research Institute 34(1): 87-101

- Larson, P.; D. Kretschmann.; A. Clark III.; J. Isebrands. 2001. Formation and Properties of Juvenil Wood in Southern Pines. USDA, Forest Products Laboratory Report 129: 1-42
- Lasserre, J.; E. Mason.; M. Watt. 2004. The influence of initial stocking on corewood stiffness in a clonal experiment of 11-year-old *Pinus radiata* D. Don. New Zealand Forest Research Institute 18-23
- Lindström, H.; P. Harris.; R. Nakada. 2002. Methods for measuring stiffness of young trees. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 165-174
- Lindström, H.; P. Harris.; C. Sorensson.; R. Evans. 2004. Stiffness and wood variation of 3 year old *Pinus radiata* clones. *Wood Science and Technology* 38: 579-597
- Llic, J.; R. Northway.; S. Pongracic. 2003. Juvenile Wood Characteristics, Effects and Identification. Forest and Wood Products Research and Development Corporation 1-23.
- Maclaren, P. 2002. Internal wood quality of radiata pine on farm sites – a review of the issues. *New Zealand Journal of Forestry* 24-28
- Matheson, A.; R. Dickson.; D. Spencer.; B. Joe.; J. Ilic. 2002. Acoustic Segregation of *Pinus radiata* Logs According to Stiffness. *Ann. For. Sci* 59: 471-477
- Pedini, M. 1992. The variation in the microfibrillar angle within the juvenile wood of Sitka spruce. *IUFRO*. Vol. 13(3).
- Peter, G. 2000. Environmental influences and genetic regulation of microfibril angle in southern pine. The Timber Company
- Ross, R. 1999. Using sound to evaluate standing timber. *Forest Service Forest Product Laboratory* 1(1): 43-44
- Schlatter, J.; V. Gerding; J. Adiazola. 1994. Sistema de ordenamiento de la tierra. Herramienta para la planificación forestal. Chile, 79p.
- Timbersa. 2005. International Grading Comparison. INTERNET: <http://www.timbersa.co.za/ICD/GradingComparison/gradingcomparison.asp#1-1> (Febrero 23, 2006)
- Traecey, M.; J. Evertsen; Áine Ní Dhubháin. 2000. A comparison of mechanical and physical wood properties. National council for forest research and development. 35p.
- Walker, J.; B. Butterfield. 1996. The importance of the microfibril angle for the processing industries. *New Zealand Forestry* 34-40.

Wang, X.; R. Ross.; M. McClellan.; R. Barbour.; J. Erickson.; J. Forsman.; G. McGinnis. 2000. Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique. USDA, Forest Products Laboratory Report 585: 1-9

ANEXOS

Anexo 1. Abstract and key words

Abstract

The behavior of the dynamic modulus of elasticity in juvenile wood of *Pinus radiata* D. Don was studied in three conditions of site (one stand for place), which were located at "Ranchillo" Estate (Lat. 36° 04' - Long. 71° 27') at 478 ma.s.l, "Mellicos" Estate (Lat. 37° 41' - Long. 72° 43') at 415 ma.s.l, and "P-20 Col Lautaro" Estate (Lat. 38° 34' - Long. 72° 40') at 230 ma.s.l. The dynamic modulus of elasticity at standing trees was determined by using the method of velocity of sonic waves on the shaft of trees (0.5 m on the ground to the 1.5 m) within plots of land of 400 m². The stands had similar age and manage conditions, this with the aim of leaving these variables constantly.

Under this context, the general objective of this study was to evaluate through a nondestructive method on standing trees, the behavior of the modulus of elasticity in juvenile wood of *Pinus radiata* in three conditions of site. While specific objectives were the following: a) examining relations among the modulus of elasticity with distinct variables of the tree for each site, b) determining the variability of the modulus of elasticity between and within sites, and c) analyzing the potential of the sites to produce wood of quality in relation to classification of structural international grades.

The modulus of elasticity was correlated with distinct characteristics of trees, like the dbh, the height and the relation height/dbh, being the relation height/dbh that better he associated with, presenting values of 0.26, 0.52, and 0.61 for the three sites respectively. With the dbh, the correlation coefficients were from - 0.19, - 0.39 and 0.47, while than with the height, the younger association was observed, where only they attained values of -0,07, -0.11 and -0,04.

The site 3, wich had the bigger SI (30,6) and showed the bigger growth rates in diameter resulted most lower values of the modulus of elasticity, with values that went from the 4,1 to the 7,8 Gpa, and with a mean of 5,9 Gpa. To his time the site 2, that had younger SI (26,8), showed values from 4.5 to 12.6 Gpa and with a mean of 12.4 Gpa. The analysis of variance showed a significant difference for the modulus of elasticity among the three sites on study, with the 95 % confidence level. In addition, within the stand, they didn't observe significant differences for the modulus of elasticity, utilizing like factor the dhb, the height and the relation height/dhb (for the 95 % confidence level).

It was noticed that the behavior of the modulus of elasticity within the stand is very variable. One site showed a little tendency to a normal values distribution, the other site, showed his values concentrated in inferior ranges of elasticities, while the latter site, presented values in all the range of modulus of elasticity. In general, this variation should principally to own characteristics of the specie and of juvenile wood.

Regarding the potentiality of the stands to produce certain structural quality's wood, it was observed that the site 2 (SI 26.8), presented a bigger quantity of ISO structural grades, and besides it was the only stand that attained the grades S22, S24 and S27, which are intermediate quality. Meanwhile in the other stands a 24 % and a 66 % of the individuals did not get to classify within structural minimal grade. It fits to mention that these results are conditioned by the fakopp's tree sonic validity.

Finally, this variation of elasticity among stands and among trees within stands, shows the importance of the premature evaluation through this nondestructive technique on standing trees, that is useful as a tool on the overtaking of decisions, so much for the planning of the harvest, as for the thinning, where the objective of planning, would have to point to know the quality of the resource, for destining it to adequate markets.

Key words: *Pinus radiata*, dynamic modulus of elasticity, nondestructive evaluation, waves stress methods.

Anexo 2. Metodología de muestreo

1. Instalación y medición de parcelas

Se requiere del siguiente procedimiento para la instalación y medición de las parcelas delimitada temporalmente.

- Seleccionar un área de árboles que se considerará típica de la plantación en términos de densidad y forma de los árboles. Evita áreas en las cuáles los árboles tengan malformaciones significativas.
- Marcar el centro de la parcela.
- Hacer una parcela circular de 0,04 ha con un radio de 11,3 m. La parcela tendrá un esquema definido como lo muestra la siguiente figura; (aproximadamente 30 árboles).

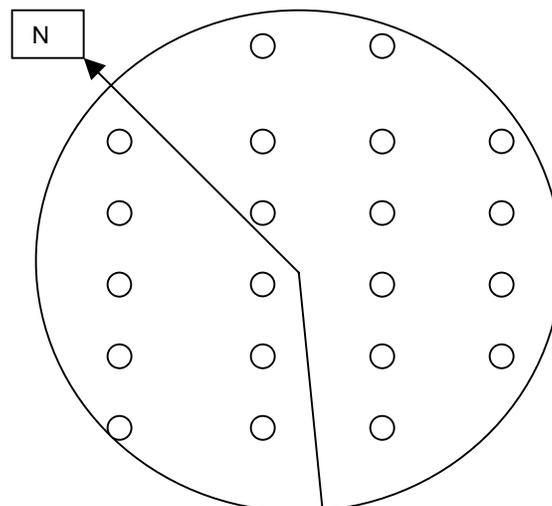


Figura 1. Forma y tamaño de parcela y ubicación de los árboles dentro de la parcela a replantar.

- **Número del árbol**, enumerar los árboles por cuadrante de izquierda a derecha, el árbol 1 será el mas cercano al centro de la parcela escribiendo sólo una vez el número con pintura naranja en dirección al centro y sobre el DAP.
- **DAP** (mm) se mide a una altura de 1,4 m. sobre el suelo
- **Vigor**, es la capacidad del árbol de crecer en tamaño. A una edad dada, los árboles con gran vigor serán los mas grandes en altura y en diámetro.

Cuadro 1. Descripción del vigor

Código	Descripción del vigor
1	Vigoroso, son los individuos de mayor tamaño tanto en diámetro como en altura
2	Regularmente vigoroso, son los individuos de tamaño medio
3	Poco vigoroso, son los individuos de menor tamaño tanto en diámetro como en altura
4	Enfermo o muerto

- **Rectitud e inclinación**, una curvatura gradual de la troza (sep o crook)

Cuadro 2. Descripción de forma

Código	Descripción de forma
1	Recto y no inclinado
2	Medianamente curvo e inclinado
3	Curvo e inclinado
4	Curvas e inclinaciones muy fuertes

Para la estandarizar en la aceptabilidad y magnitud de los defectos por rectitud e inclinación se traza una línea imaginaria sobre los fustes, así se tienen las desviaciones mas comunes;

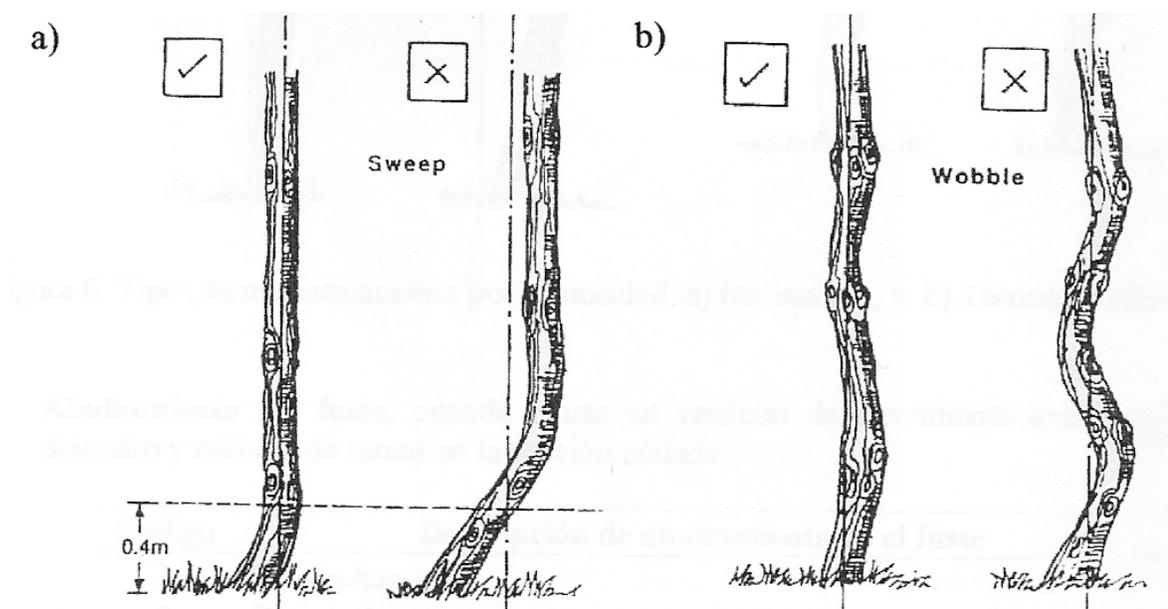


Figura 2. Tipos de malformaciones por rectitud a) una curvatura y b) varias curvaturas

Tipos de malformaciones por rectitud:

- A una curvatura gradual del fuste desde la base se le llama el sep o crook, ver figura anterior a), para aceptar o rechazar el individuo se traza una línea imaginaria horizontalmente a los 40 cm de altura desde el suelo y se traza otra línea perpendicular a esta, es aceptable cuando la línea no sale de la curvatura del fuste. Como se observa en la figura a) el primer individuo es aceptable y el segundo rechazado.
- Varias curvaturas en que afectan a secciones cortas del fuste llamadas wobble, como se observa en la figura 2 b), para aceptar o rechazar el individuo al trazar línea imaginaria sobre el fuste este debe caer al menos la mitad del diámetro, sino se rechaza.

Tipos de malformación por inclinación:

- a) A una inclinación menor a 10 cm (5°) del fuste con respecto a la línea vertical imaginaria a la altura del dap es aceptado, si es mayor es rechazado, ver figura 6 a).
- b) Una torcedura acompañada de una inclinación es aceptable hasta que la línea vertical imaginaria pasa tocando el fuste en los opuestos cambios de ángulos, y si se aleja del fuste el individuo es rechazado (kink) ver figura 3 b).

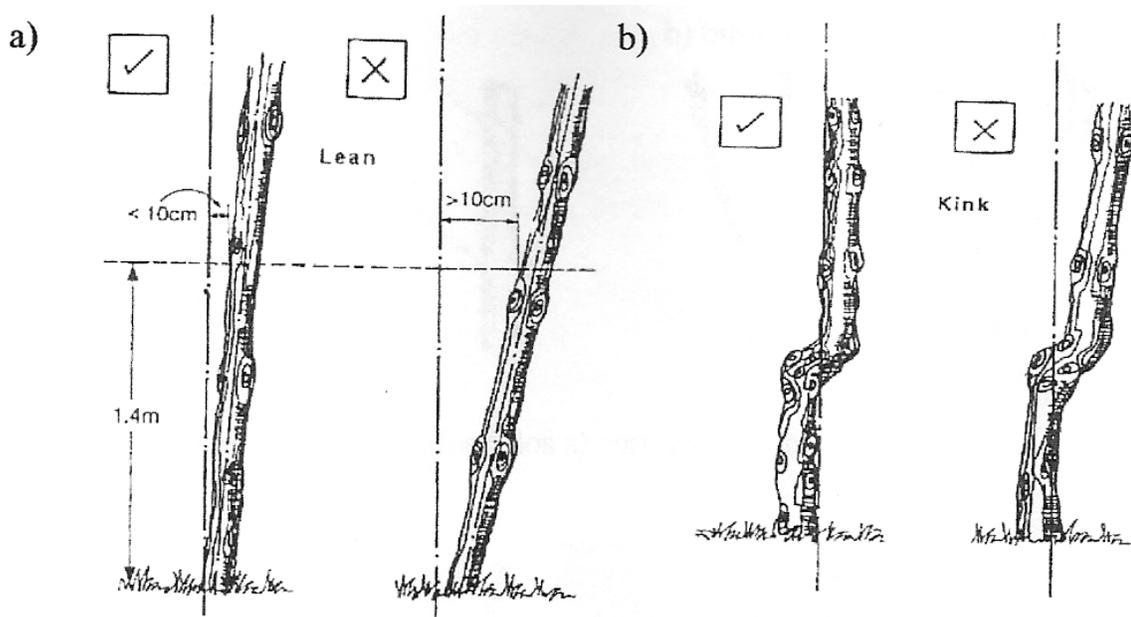


Figura 3. Tipos de malformaciones por sinuosidad, a) Inclinación, y b) Torcedura e inclinación

- **Altura (cm.)**
- **Altura de poda (cm.)**
- **Módulo de elasticidad.** Es el módulo de elasticidad longitudinal, es decir, la medición de la acústica, expresada como la velocidad de la onda de sonido a través de la madera (km/s) y junto con la densidad de la madera ha mostrado proporcionar una medición directa del stiffness en la madera. Los instrumentos desarrollados para medir stiffness permiten evaluar y segregar árboles en pie, fustes y trozas.

- **Materiales e instrumentos utilizados**

- Plano de ubicación de rodales
- Formularios
- Pintura spray
- GPS
- Brújula
- Vertex
- Huincha diamétrica
- Fakopp Tree Sonics

Anexo 3. Análisis inferencial

Análisis de Varianza y Test de Tukey entre los sitios

Cuadro 3. Análisis de varianza

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
IS	72.443	2	36.221	18.090	0.000
Error	186.212	93	2.002		

Cuadro 4. Test de Tukey

	IS 26,8	IS 28,8	IS 30,6
IS 26,8		0.000	
IS 28,8	-0.946		0.000
IS 30,6	-2.109	-1.163	

Análisis de Varianzas dentro de los sitios

Análisis de Varianza para el índice de sitio 26,8

Cuadro 5. Análisis de Varianza, con factor DAP

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
DAP	18.263	3	6.088	1.694	0.196
Error	82.676	23	3.595		

*Andeva no significativo

Cuadro 6. Análisis de Varianza, con factor Altura

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
Altura	16.071	3	5.357	1.452	0.254
Error	84.868	23	3.690		

*Andeva no significativo

Cuadro 7. Análisis de Varianza, con factor altura/dap

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
h/dap	28.097	3	9.366	2.957	0.054
Error	72.843	23	3.167		

*Andeva no significativo

Análisis de Varianza para el índice de sitio 28,8

Cuadro 8. Análisis de Varianza, con factor DAP

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
DAP	1.665	3	0.555	0.476	0.702
Error	24.477	21	1.166		

*Andeva no significativo

Cuadro 9. Análisis de Varianza, con factor Altura

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
Altura	0.432	3	0.144	0.118	0.949
Error	25.710	21	1.224		

*Andeva no significativo

Cuadro 10. Análisis de Varianza, con factor altura/dap

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
h/dap	4.908	3	1.636	1.618	0.215
Error	21.234	21	1.011		

*Andeva no significativo

Análisis de Varianza para el índice de sitio 30,6

Cuadro 11. Análisis de Varianza, con factor DAP

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
DAP	3.896	3	1.299	2.297	0.101
Error	14.703	26	0.565		

*Andeva no significativo

Cuadro 12. Análisis de Varianza, con factor Altura

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
Altura	4.331	3	1.444	2.631	0.071
Error	14.268	26	0.549		

*Andeva no significativo

Cuadro 13. Análisis de Varianza, con factor altura/dap

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F	P
h/dap	4.343	3	1.448	2.640	0.071
Error	14.256	26	0.548		

*Andeva no significativo

Anexo 4. Clasificación estructural australiana y neozelandesa

Grados australianos para los sitios 1, 2 y 3

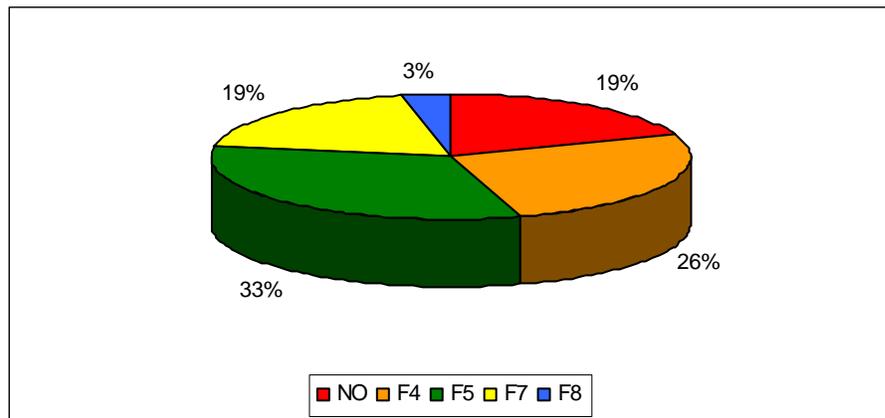


Figura 4. Grados australianos para sitio 1, Predio "Ranchillo"

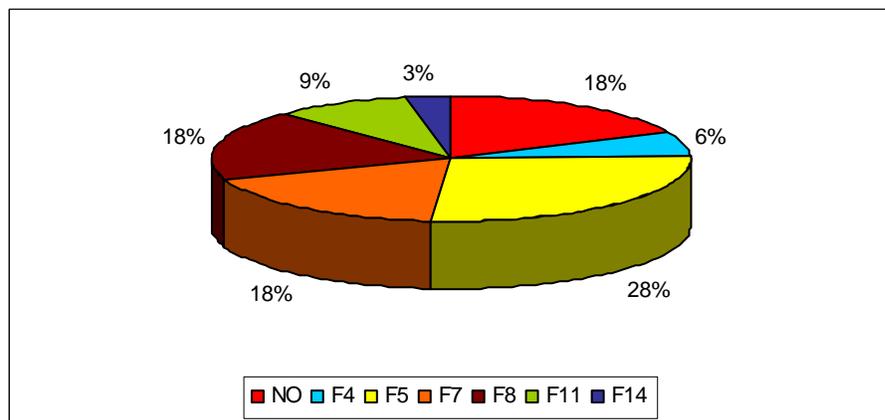


Figura 5. Grados australianos para sitio 2, Predio "Los Mellicos"

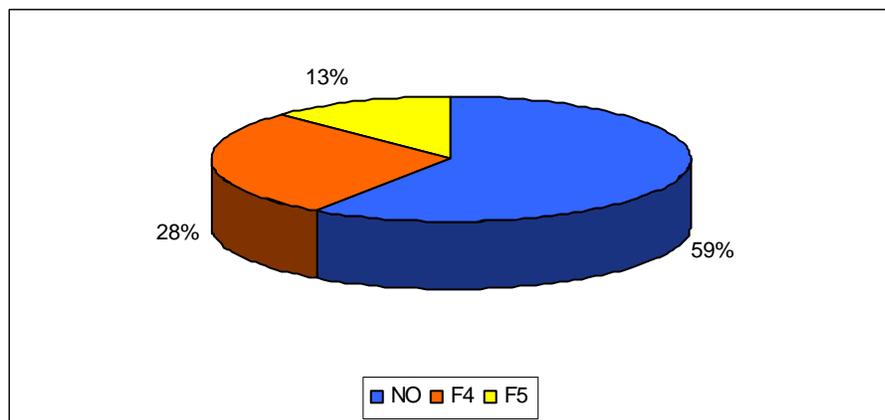


Figura 6. Grados australianos para sitio 3, Predio "P-20 Col Lautaro"

Grados neozelandeses para sitios 1, 2 y 3

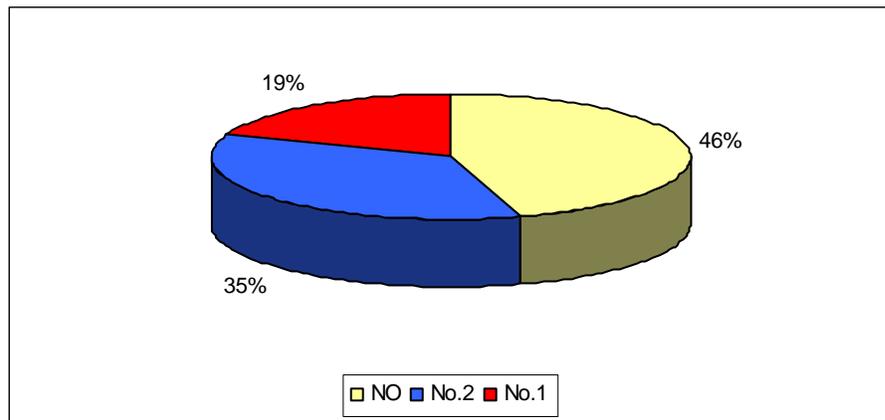


Figura 7. Grados neozelandeses para sitio 1, Predio "Ranchillo"

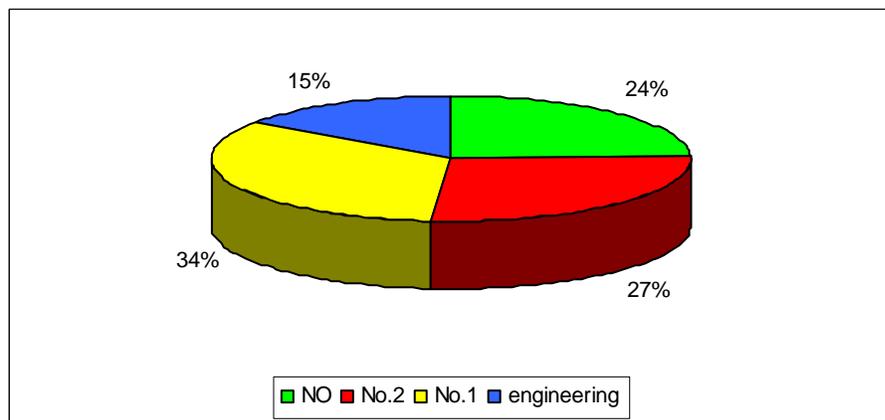


Figura 8. Grados neozelandeses para sitio 2, Predio "Los Mellicos"

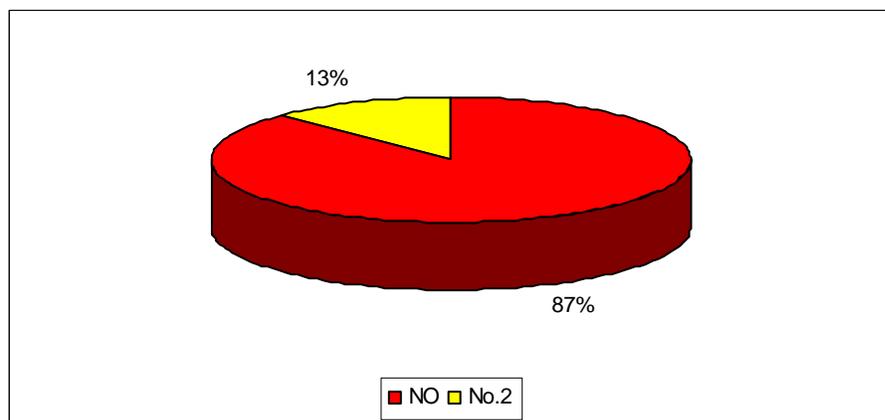


Figura 9. Grados neozelandeses para sitio 3, Predio "P-20 Col Lautaro"