

PROPIEDADES MECÁNICAS DE
Eucalyptus grandis Maiden.
DEL NORTE DE URUGUAY

Informe N° 5

**Grupo Técnico de Madera Aserrada
de Eucalipto - GT2**

Dirección General Forestal M.G.A.P.

Sociedad de Productores Forestales

Asociación de Industriales de la Madera

Facultad de Agronomía

INIA - Programa Nacional Forestal

LATU - Departamento de Proyectos Forestales

Junio 2005

Organización del Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto

Persona	Institución
Ing. Agr. Peter Baptista	Dirección General Forestal M.G.A.P.
Ing. Agr. Carlos Voulminot	Sociedad de Productores Forestales
Ing. Agr. Luis Soria	Facultad de Agronomía
Ing. Agr. Carlos Mantero	Facultad de Agronomía
Ing. Agr. Fernando Resquin	INIA. Programa Nacional Forestal
Ing. Quim. Raúl de Castro	LATU. Dpto. Proyectos Forestales
Dr. Sadaaki Ohta	LATU. Dpto. Proyectos Forestales
Per. Agr. Hugo O'Neill	LATU. Dpto. Proyectos Forestales
Tec. Agr. Felipe Tarigo	LATU. Dpto. Proyectos Forestales
Sr. Dilvar Silva	LATU. Dpto. Proyectos Forestales
Sr. Francisco Gatto	LATU. Dpto. Proyectos Forestales

Equipo de Trabajo Técnico
Per. Agr. Hugo O'Neill
Tec. Agr. Felipe Tarigo
Sr. Javier Tarigo (Tesisista Fac. Agronomía)
Sr. Gonzalo García (Tesisista Fac. Agronomía)

Agradecimientos:

A Compañía Forestal Uruguaya S.A. y URUFOR S.A.
por el apoyo recibido en la realización de este estudio.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Eucalyptus grandis* Maiden DEL NORTE DE URUGUAY

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES	1
2.1 Muestreo y clases diamétricas de los árboles	1
2.2 Características de los rodales muestreados	2
2.2.1 Datos técnicos del rodal	2
2.2.2 Tratamientos Silviculturales (podas y raleos)	3
3. ENSAYOS EN LAS TROZAS	3
3.1 Clasificación visual de las trozas	3
3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Básica	4
3.3 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer.	5
3.4 Aserrado de las trozas para obtención de las tablas de 50mm X 150 mm (2" X 6")	6
4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2" X 6"	7
4.1 Secado de las tablas en horno industrial	8
4.2 Dimensionado de las tablas e inspección visual	8
4.3 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2" X 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer	8
4.4 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en ensayo de flexión (Máquina Universal) sobre tablas de 2" X 6"	9
4.5 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Corriente de tablas ensayadas	10
5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS	10
5.1 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)	10
5.2 Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica	11
5.3 Determinación de la Dureza Janka	12
5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Aparente Corriente	13
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
6.1 Estudios realizados en trozas en estado verde	13
6.1.1 Clasificación visual	13
6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica	13
6.1.3 Contenido de Humedad y Densidad aparente Básica según ubicación en el radio	14
6.1.3.1 Análisis por altura según ubicación en el radio	15
6.1.4 Contenido de Humedad y Densidad aparente Básica según ubicación en altura	15
6.1.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	16
6.1.5 Módulo de elasticidad de las trozas	16
6.2 Estudios realizados en tablas secas (2" X 6")	18
6.2.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas 2" X 6"	18
6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas	19
6.2.3 Relación entre la Densidad Aparente Corriente y las propiedades mecánicas	20
6.2.4 Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según la ubicación en el radio	21
6.2.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	22
6.2.5 Análisis del Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura según ubicación en la altura	23

6.2.5.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	24
6.2.6 Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de sus tablas	24
6.2.7 Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural	25
6.2.8 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según normas JAS	25
6.3 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos	28
6.3.1 Resumen de las propiedades mecánicas	28
6.3.2 Variación de las propiedades mecánicas según la ubicación en el radio	29
6.3.3 Variación de las propiedades mecánicas en la altura	31
6.3.4 Análisis de las propiedades mecánicas por altura según ubicación en el radio	33
6.3.5 Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según altura	35
6.3.6 Relación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas	37
6.3.7 Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos	39
6.3.8 Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas de tamaño real y probetas libres de defectos	41
7. BIBLIOGRAFÍA	43
Ficha Técnica de Propiedades Físicas y Mecánicas de <i>Eucalyptus grandis</i> H. del Norte de Uruguay	45
Índice de Figuras y Cuadros	47
Índice de Gráficos	48

PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Eucalyptus grandis* Maiden DEL NORTE DE URUGUAY

RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de un rodal de *Eucalyptus grandis* Maiden, de dieciocho años de edad del departamento de Rivera, al norte de Uruguay. Se clasificaron visualmente las trozas obtenidas a tres alturas del fuste y se les determinó la densidad básica y el contenido de humedad y módulo de elasticidad. A las tablas secas 2"x 6" (50mm X 150mm) se les midió el módulo de elasticidad por método no-destructivo. Luego se determinó el módulo de rotura mediante ensayo de flexión estática. De las mismas tablas se confeccionaron y ensayaron pequeñas probetas libres de defectos. Se estudió la variación de las propiedades físicas y mecánicas en la dirección radial (variación de la médula a la corteza) y en la altura del fuste.
Palabras clave: *Eucalyptus grandis* Maiden, módulo de elasticidad, módulo de rotura, densidad, no destructivo.

SUMMARY

In this report mechanical properties of *Eucalyptus grandis* Maiden stand eighteen years old from Rivera department northern Uruguay were studied. The logs from three heights were visually graded, and the basic density and moisture content were measured. Modulus of elasticity and modulus of rupture (static bending) of kiln dried boards 2 x 6 inches (50mm X 150mm) by non destructive method were calculated. From the same boards, small clear specimens were tested. The variation of physical and mechanical properties within trees (variation from pith to bark and in the tree height) was analyzed.
Key words: *Eucalyptus grandis* Maiden, modulus of elasticity, modulus of rupture, density, non destructive

1. INTRODUCCIÓN

A los efectos de identificar e implementar los estudios faltantes para ayudar en la planificación a nivel nacional y a nivel de los productores, buscando facilitar el acceso a los mercados, en diciembre del 2000, se ha formado un Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucaliptos y Pinos (GT2 y GT3), en el cual participan la Sociedad de Productores Forestales, la Asociación de Industriales de la Madera, la Dirección General Forestal del M.G.A.P. y el LATU. En el año 2004 se integraron a este grupo la Facultad de Agronomía y el INIA.

Dado que las maderas nacionales están parcialmente caracterizadas, es necesario profundizar los conocimientos sobre ellas para definir la aptitud para los usos finales y promover su uso racional.

Se ha decidido realizar muestreos de plantaciones de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* Eng. y *Pinus taeda* L. de las zonas norte, centro, litoral y sur para estudiar las propiedades físicas y mecánicas de la madera, con el fin de caracterizarla para el uso en la construcción y su posterior clasificación.

Le atribuimos gran importancia al conocimiento y a la caracterización de las especies forestadas para la obtención de madera de buena calidad. Esta publicación pretende colaborar en el conocimiento del comportamiento de la especie *Eucalyptus grandis* implantada en el Uruguay, que en la actualidad ocupa un área de aproximadamente 150.000 hectáreas. En este caso analizaremos 25 árboles de 18 años de edad obtenidos de un rodal del norte de nuestro país, más precisamente del departamento de Rivera.

2. MATERIALES

2.1 Muestreo y clases diamétricas de los árboles

La selección de los árboles se realizó mediante un muestreo selectivo, en un rodal previamente elegido por especie, edad y manejo, dicho muestreo (Nº 9) se realizó en julio del 2002.

Dentro de este rodal, se seleccionaron 25 árboles divididos en tres clases diamétricas (8, 9 y 8 por clase). Para la selección de los árboles se evaluó el diámetro, la conicidad, la rectitud del fuste y el hábito de ramas.

A cada árbol se le midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura de la primera rama viva, altura total y altura comercial (15 cm. de diámetro con corteza).

Se obtuvieron tres trozas de cada árbol, cada una de 4 m de largo, identificándolas con un número compuesto de 2 partes, la primera el número de árbol (correlativos del 1 al 25) y la segunda el número de troza (1ra., 2da. y 3ra. troza), ejemplo la troza 5-2 es la 2da. troza del árbol 5.

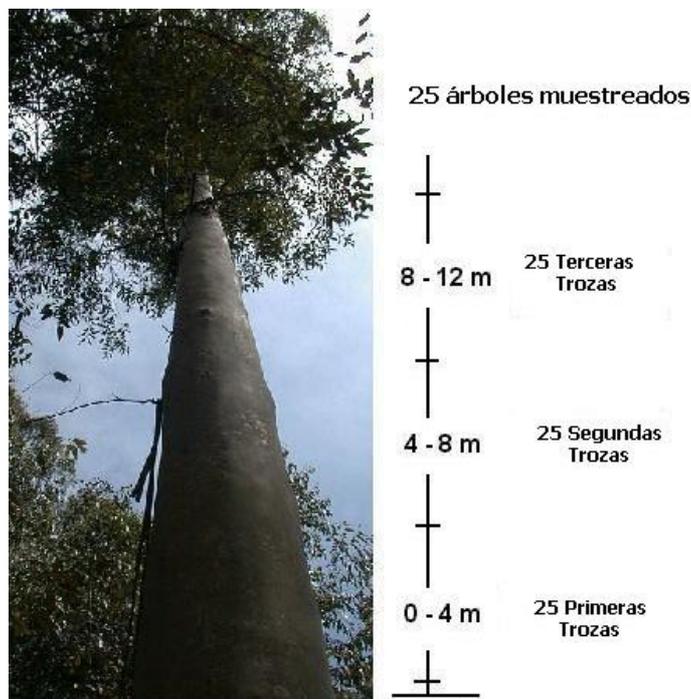


Figura N° 1: Muestreo y distribución de las trozas.

El siguiente cuadro muestra las características de los ejemplares seleccionados:

Cuadro N° 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados.

Clases diamétricas		Número de Individuos	DAP c/c Medio (cm)	Altura promedio (m)		
Clase	Rango (cm)			Total	Ø = 15 cm	1° rama viva
1	34 – 38	8	36	40,3	31,5	21,1
2	39 - 44	9	42	40,7	32,1	21,2
3	45 - 57	8	51	42,8	35,1	20,0

2.2 Características de los rodales muestreados

2.2.1 Datos técnicos del rodal

Cuadro N° 2: Datos técnicos del rodal.

Especie	<i>Eucalyptus grandis</i> Maiden
Localidad / Departamento	Batoví Dorado / Rivera
Año de Plantación	1984
Origen de la semilla	Facultad de Agronomía EEEM
Densidad de plantación (árboles / hectárea)	1111
Tipo de suelos C.O.N.E.A.T.	7.31

2.2.2 Tratamientos silviculturales (podas y raleos)

En el rodal muestreado no se realizaron podas, en el cuadro N° 3 se presentan los manejos realizados al rodal muestreado:

Cuadro N° 3: Raleos realizados.

Raleos		
Número	Edad (años)	Densidad remanente (árb./ha)
1	9,5	500
2	15,7	200

3. ENSAYOS EN LAS TROZAS

Sobre las 75 trozas verdes seleccionadas para el Grupo Técnico de Madera Aserrada, se realizaron en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU los ensayos que se comentan seguidamente:



Figura N° 2: Orden en la realización de los trabajos.

3.1 Clasificación visual de las trozas

Las trozas fueron clasificadas visualmente, agrupándolas en distintas categorías o grados de acuerdo con su rectitud, diámetro y cantidad y disposición de los nudos.

Los distintos grados se muestran a continuación:

Cuadro N° 4: Grados de clasificación de las trozas.

- Grado I: Troza derecha, sin nudos ni otros defectos, baja conicidad.
-Grado II: Troza levemente torcida, con nudos pequeños (poca cantidad) y conicidad media
- Grado III: Troza que presenta algunas de las siguientes características o varias combinadas: curvas, abundantes nudos o de gran tamaño, otros defectos como alta conicidad, rajaduras, etc.
- Grado IV: Troza con severos defectos.

3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Básica.

Una vez finalizada la clasificación visual, se cortaron las trozas, dejándolas de 3 m de longitud. Del metro del extremo superior restante se extrajo una rodaja de aproximadamente 5 cm de espesor para realizar las determinaciones de densidad básica y contenido de humedad. A la rodaja extraída se la identificó y se dibujó en forma radial la ubicación de las probetas de contenido de humedad y de densidad. Luego se tomó una fotografía con una regla sobre la rodaja de forma de usar ésta como referencia para medir la distancia del centro de las probetas a la médula.

Se extrajeron tres probetas por rodaja dispuestas en forma lineal y radial entre la médula y la corteza. A las mismas se las denominó "A" a la probeta próxima a la médula, "B" la ubicada en una zona intermedia, ambas con gran proporción de duramen y la "C" la próxima a la corteza conformada por albura (Figura N° 3).

La razón de tomar tres probetas bien definidas en el radio es la de permitir estudiar la variación de la médula a la corteza. En otros estudios con mayor profundidad se extrajeron mayor cantidad de probetas en el radio, lo que permite estudiar las variaciones con mayor precisión (leño tardío y temprano, zona de transición entre madera juvenil y adulta, etc). No está de más mencionar en este capítulo lo que significa madera juvenil, madera adulta y zona de transición entre ellas. La madera juvenil la podemos definir como la formada cercana a la médula y que se distribuye en el radio hasta cierto anillo de crecimiento (esto varía dependiendo de la especie y de la edad del árbol) y que se localiza a lo largo de todo el fuste. Madera adulta es aquella que se forma a partir de la zona de transición hacia el cambium y la corteza. Para determinar esta zona de transición se utilizan indicadores de la calidad de la madera como longitud de fibras o traqueidas, la densidad básica, etc. Debemos mencionar también que no es lo mismo duramen que madera juvenil, en la Figura N° 4 vemos las distintas proporciones de madera juvenil, madera adulta, duramen y de albura en eucaliptos de plantaciones jóvenes.

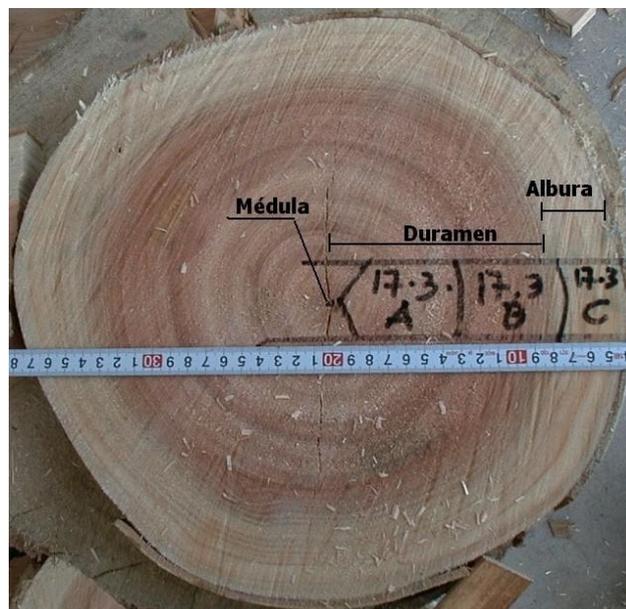


Figura N° 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas.

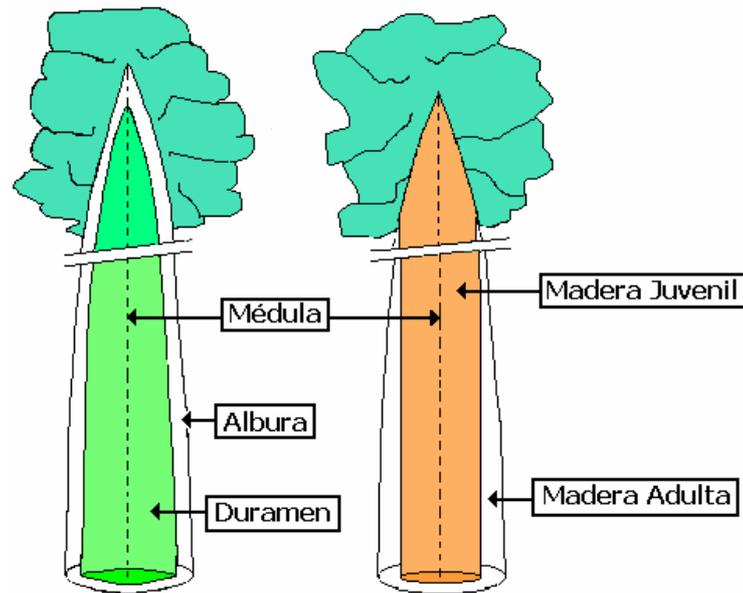


Figura N° 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie.

Una vez fotografiada la rodaja se cortaron y pesaron las probetas (Peso verde). Luego se sumergieron en agua para conservar su humedad, de forma de poder calcular el volumen por el principio de Arquímedes. Para calcular el volumen mediante este método se pesaron en el plato de la balanza las probetas húmedas y posteriormente se pesaron sumergidas en agua. El volumen es la diferencia entre el peso en el aire de la probeta húmeda y el peso de ésta sumergida.

Las probetas posteriormente fueron secadas en una estufa a 103 ± 2 ° C hasta llegar a estado anhidro (peso anhidro).

Para la determinación de la densidad básica se utilizó la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials D 2395, Method B-III.

Las fórmulas para los cálculos fueron las siguientes:

$$D_{básica} = \frac{P_{Anh}}{V_V}$$

$$V_V = P_{sat} - P_{sum}$$

$$CH = \frac{P_V - P_{Anh}}{P_{Anh}} \times 100$$

$D_{básica}$: Densidad aparente básica
V_V	: Volumen verde
P_{Anh}	: Peso anhidro
P_{sat}	: Peso húmedo
P_{sum}	: Peso sumergido
P_V	: Peso verde
CH	: Contenido de Humedad

3.3 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer

Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) mediante el ensayo no destructivo basado en el método de la principal frecuencia de vibración longitudinal, con equipo FFT Analyzer (Rápida Transformada de Fourier). Este es un equipo que analiza el sonido producido por el impacto de un martillo, que luego de atravesar la probeta es captado en el otro extremo mediante un

micrófono. De este sonido se analiza la principal frecuencia de vibración con la cual se calcula el MOE. Las trozas en estado verde (3 m de longitud) fueron pesadas, medidas en la longitud, el diámetro mayor y el diámetro menor, para poder obtener el volumen y con el peso determinar la densidad.

A partir de la frecuencia obtenida se calcula el Módulo de elasticidad mediante la siguiente fórmula:

$$f_l = \left(\frac{n}{2 \cdot L} \right) \cdot \left(\frac{E_{ft} \cdot g}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$E_{ft} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot f_l^2 \cdot \rho}{g}$$

E_{ft} :	MOE por vibración longitudinal
L :	Longitud de la troza
f_l :	Frecuencia de vibración longitudinal
g :	Constante de aceleración gravitacional
n :	nº de nodo = 1
ρ :	Densidad (troza verde, en ensayo)



Figura N° 5: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer

3.4 Aserrado de las trozas para obtención de las tablas de 2" X 6" (50mm X 150mm)

Las trozas fueron aserradas en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU, obteniendo de cada una de ellas tres tablas identificadas según su ubicación en el radio como: BA la que se extrajo contigua a la médula, por consiguiente madera juvenil, B tablas distantes de la médula (zona intermedia) con diferentes porcentajes de madera adulta y juvenil y C tablas próximas a la corteza con una mayor proporción de madera adulta. (Figura N° 6).

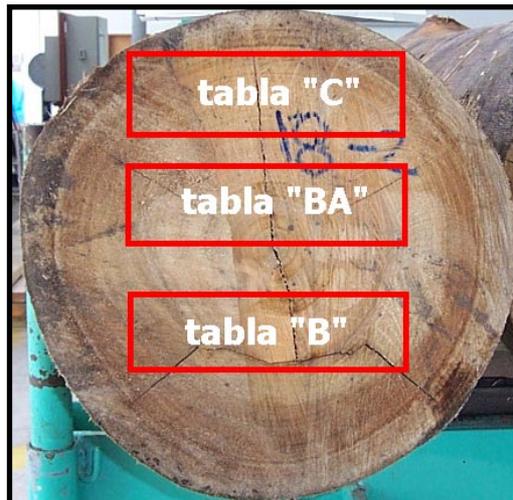


Figura N° 6 : Esquemas de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones BA-B-C en las trozas.



Figura N° 7 : Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6")

4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2"x 6"

Finalizado el aserrado de las trozas ensayadas se procedió con los ensayos sobre las tablas obtenidas:

Secado de las tablas en horno industrial
Dimensionado, escuadrado y cepillado (2"x 6") longitud 2,8 m
Inspección visual : Nudos (presencia, ubicación y tamaño), grietas y alabeos
Determinación del Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer, método no destructivo)
Determinación del Módulo de Elasticidad y de Rotura (Máquina Universal)
Determinación del Contenido de Humedad de las tablas ensayadas
Determinación de la Densidad Corriente de las tablas ensayadas

4.1 Secado de las tablas en horno industrial

El secado de las tablas se realizó en su totalidad en hornos industriales. El contenido de humedad final promedio de las tablas fue de 10,9 %. Luego del secado se controló el contenido de humedad mediante un xilohigrómetro de resistencia y se comprobó dicho contenido de humedad mediante pequeñas probetas obtenidas de los extremos de las tablas, una vez que éstas son ajustadas a su longitud final de ensayo 2,80 m.

4.2 Dimensionado de las tablas e inspección visual

Las tablas luego del secado fueron cepilladas y escuadradas, llevándolas a las dimensiones finales de ensayo con escuadrías de 50 mm x 150 mm x 2800 mm.

A estas tablas prontas para ser ensayadas se les realizó una inspección visual de defectos tales como: nudos (tamaño y ubicación), grietas, etc. Se confeccionó una ficha en la que se representa a las cuatro caras de la tabla en un mismo plano. Sobre esta ficha se dibujaron los nudos teniendo en cuenta su forma y ubicación. Se midió el área libre de defectos (clear) para cada una de las tablas, la razón de área nudosa (KAR) y la razón de diámetro nudoso (KDR).

4.3 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2" x 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer

A las tablas se les realizó el ensayo no destructivo para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) por medio del equipo FFT Analyzer. Para obtener la densidad se determinó el volumen por medio de las dimensiones.

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$E_{ft} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot fl^2 \cdot \rho}{g}$$

<p>E_{ft} : MOE por vibración longitudinal L : Largo de la tabla fl : Frecuencia de vibración longitudinal g : Constante de aceleración gravitacional ρ : Densidad corriente de la madera (peso corriente/ volumen corriente)</p>
--



Figura N° 8: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer.

4.4 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en ensayo de flexión (máquina universal) sobre tablas de 2" x 6"

Los ensayos mecánicos destructivos para determinar el MOE y el MOR fueron realizados en la Máquina universal Minebea de 250 kN de capacidad. Las tablas fueron sometidas a un esfuerzo de flexión estática de 4 puntos, con una separación entre apoyos inferiores (span) de 2520 mm y que recibieron un esfuerzo en 2 puntos separados 840 mm entre sí. (Figura N° 9)

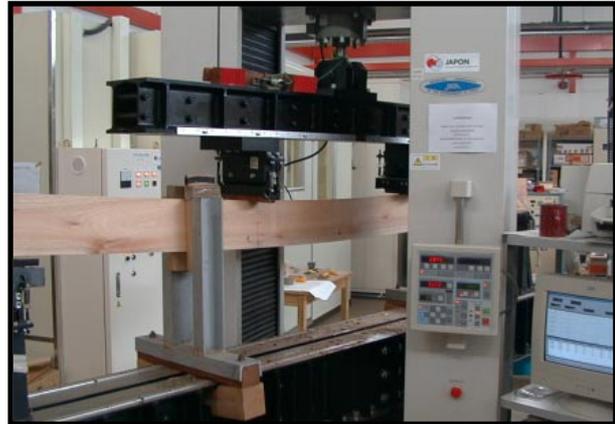
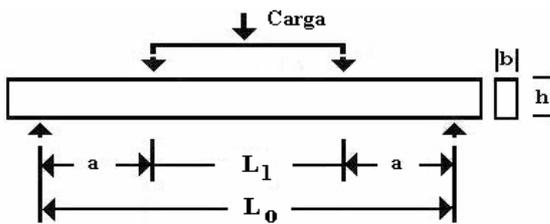


Figura N° 9: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal.

Se utilizó la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" D 198 –98 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes – Flexure.

El Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura fueron determinados mediante el mismo ensayo de flexión estática y calculados en forma automática por el software de la Máquina Universal una vez finalizado el ensayo, utilizando las siguientes fórmulas:

$$MOE_{4p} = \frac{\Delta P \cdot \frac{(L_0 - L_1)}{2} \cdot (2 \cdot L_0^2 + 2 \cdot L_0 \cdot L_1 - L_1^2)}{48 \cdot I \cdot \Delta y}$$

ΔP : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional.
 L_0 : Distancia entre apoyos inferiores (span)
 L_1 : Distancia entre apoyos superiores de carga
 I : Momento de Inercia
 Δy : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

I : Momento de Inercia
 b : Ancho de la tabla
 h : Altura de la tabla

$$MOR_{4p} = \frac{3 \cdot P \cdot (l - a)}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

P : Carga máxima
 l : Distancia entre apoyos inferiores (span)
 a : Distancia desde el apoyo inferior al punto de carga superior más próximo
 b : Ancho de la tabla
 h : Altura de la tabla

Una vez terminado el ensayo y rotas las tablas se dibujan las líneas de fractura en la misma ficha en la que se realizó la inspección visual. Además se fotografían las tablas de forma de tener un registro de la forma y el lugar en que se produjo la rotura.

4.5 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Corriente de tablas ensayadas

De las partes sobrantes del ensayo mecánico de flexión estática (50 x 150 x 2800 mm) se confeccionaron probetas escuadradas de 40 mm x 50 mm x 150 mm de longitud, orientadas perpendicularmente a la longitud de la tabla, cubriendo de esta forma el rango de variación de contenido de humedad y de la densidad en el ancho de la tabla.

Las probetas fueron pesadas (peso corriente), medidas en sus tres dimensiones para obtener el volumen y posteriormente secadas en estufa a $103 \pm 2^\circ \text{C}$ hasta peso constante para obtener el peso anhidro.

Para la determinación de la densidad aparente corriente se utilizó la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials D 2395, Method A.

Las formulas utilizadas fueron las siguientes:

$$D_{\text{corriente}} = \frac{P_{\text{Anh}}}{V_{\text{corriente}}}$$

$$CH = \frac{P_{\text{corriente}} - P_{\text{Anh}}}{P_{\text{Anh}}} \times 100$$

$D_{\text{corriente}}$: Densidad aparente corriente
$V_{\text{corriente}}$: Volumen a 10,9 % CH
P_{Anh}	: Peso anhidro
$P_{\text{corriente}}$: Peso corriente
CH	: Contenido de Humedad (%)

Nota: La densidad aparente corriente se define como el cociente entre el peso anhidro y el volumen a 12% CH. En este trabajo se estimó la densidad aparente corriente a partir del volumen a 10,9 % CH promedio para las tablas y a 11,5% CH promedio para las pequeñas probetas libres de defectos.

5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS

A partir de las probetas de 2" x 6" ensayadas en flexión estática, se confeccionaron pequeñas probetas libres de defectos, con una correcta orientación de los anillos de crecimiento respecto a las caras radiales (perpendiculares) y tangenciales (paralelos). Todas las probetas fueron acondicionadas en cámara climatizada en las condiciones de 20°C de temperatura y de 65 % de humedad relativa, para lograr una humedad de equilibrio en las mismas del orden del 12 %.

Se realizaron los tres ensayos en pequeños especímenes que se consideraron de mayor relevancia:

- Flexión Estática, determinación del Módulo de Elasticidad
- Flexión Estática, determinación del Módulo de Rotura
- Flexión Dinámica, determinación de la Resistencia al Impacto
- Dureza Janka

5.1 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)

El ensayo de flexión estática se realizó sobre probetas de 25 x 25 x 400 mm, en la Máquina universal Minebea, utilizando una celda de carga de 50 kN de capacidad, con una distancia de apoyos inferiores (span) de 350 mm, ejerciendo la carga en la cara radial y en el centro de la probeta. (Figura N° 10)

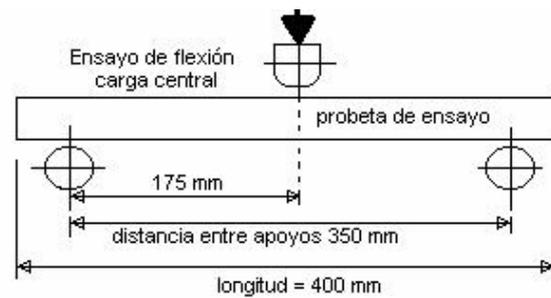
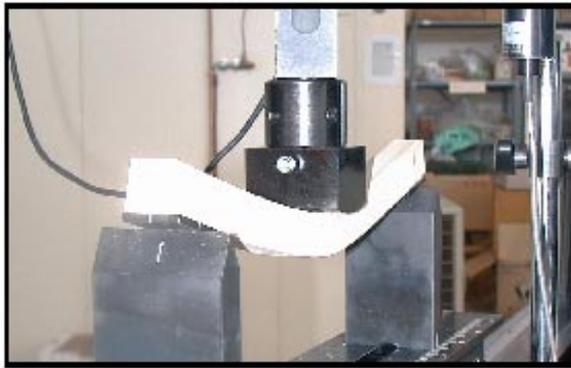


Figura N° 10: Esquema y ensayo de flexión estática en 3 puntos en máquina universal

Para este ensayo se utilizó la norma JIS (Japan Industrial Standard) Z 2101–1994 (JIS Z 2113-63) "Method of Bending Test for Wood".

Las fórmulas utilizadas para el cálculo del MOE y el MOR en pequeñas probetas fueron las siguientes:

$$MOE_{3P} = \frac{\Delta P \cdot l^3}{4 \cdot \Delta y \cdot b \cdot h^3}$$

ΔP : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional
 l : Distancia entre apoyos inferiores (span)
 b : Ancho de la probeta
 h : Altura de la probeta
 Δy : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

$$MOR_{3P} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

P : Carga máxima
 l : Span
 b : Ancho de la probeta
 h : Altura de la probeta

5.2 Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica

El ensayo de flexión dinámica se realizó sobre probetas de 20 x 20 x 300 mm en péndulo Maekawa con una energía de 98 J. El impacto se produjo en el centro de la probeta, con orientación sobre la cara radial.

La norma utilizada fue la JIS (Japanese Industrial Standard) Z 2116 "Method of Impact Bending Test for Wood".

Para el cálculo de la resistencia a la flexión dinámica se usó la siguiente fórmula:

$$RI = \frac{E}{b \cdot h}$$

RI : Resistencia al Impacto (J/cm²)
 E : Energía absorbida (J)
 b : Ancho de la probeta (cm)
 h : Altura de la probeta (cm)

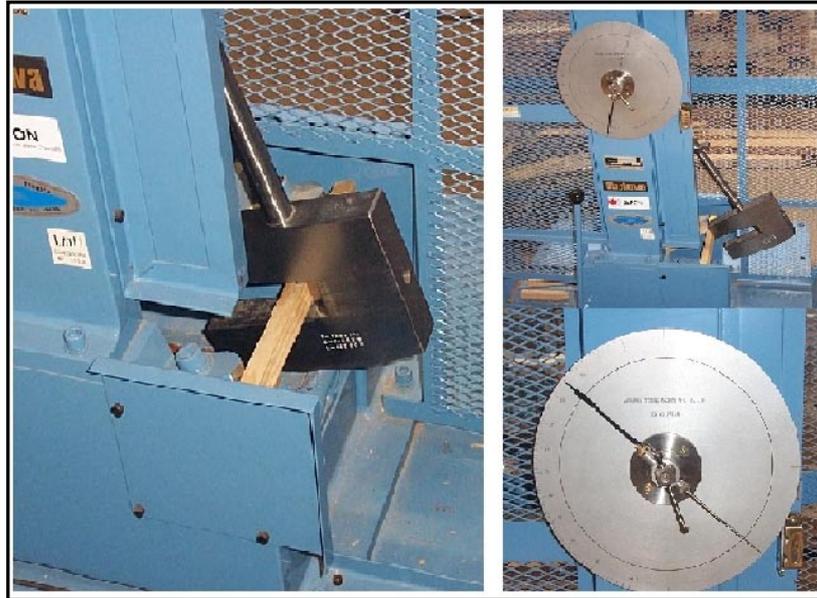


Figura N° 11: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)

5.3 Determinación de la Dureza JANKA

El ensayo de dureza se realizó sobre probetas de 45 x 45 x 150 mm en máquina universal Minebea con una celda 50 kN de capacidad, sobre las caras radiales, tangenciales y transversales. La determinación de la dureza se realiza por medio de la penetración en la madera de las probetas de una media esfera ($\varnothing = 11.3$ mm) a una velocidad de 6 mm/min. Se utilizó para este ensayo la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" D 143 Hardness.

La dureza se expresa como el valor de la carga requerido para la penetración del accesorio en la probeta. (Figura N° 12)

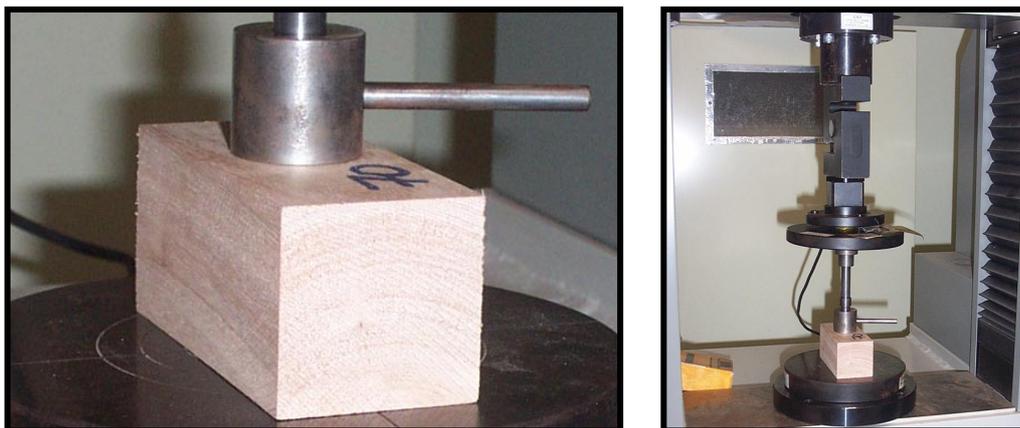


Figura N° 12: Ensayo de dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio.

5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Aparente Corriente

Una vez finalizados los ensayos en pequeñas probetas, se determinó el contenido de humedad y la densidad aparente corriente de las mismas. Se utilizaron los mismos métodos y fórmulas de cálculo que en las determinaciones de tablas (2"x 6")

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Estudios realizados en trozas en estado verde.

6.1.1 Clasificación visual

Se realizó una clasificación visual de las trozas como una forma de categorizarlas y diferenciar la calidad de las mismas.

De cada árbol se obtuvieron 3 trozas de 4 metros cada una, y a cada troza se la clasificó en cuatro grados distintos.

En el Cuadro N° 5 vemos para cada altura de troza el porcentaje de las mismas que pertenecen a cada grado. El criterio de clasificación esta detallado en el capítulo 3.1.

Cuadro N° 5: Porcentaje de trozas según el grado a la que pertenecen

	GRADO			
	I	II	III	IV
Troza 1	60	36	4	0
Troza 2	40	44	16	0
Troza 3	12	40	32	16

Recordemos que nos encontramos ante un monte raleado a los 10 años y que no fue podado. Esto concuerda con el cuadro N° 5 en el que vemos que las trozas basales en que un 96% está en la categoría I y II, las trozas 2 un 84 % corresponde a las categorías I y II, con un 16% a la categoría III. Para las trozas 3 el mayor porcentaje es para el grado II, con un 40 %, un 12 % para las trozas grado I, un 32 % para el grado III y aparece por primera vez con un 16 % la categoría IV, lo que nos muestra que estamos ante un rodal muy uniforme y con una muy buena calificación visual de las trozas.

6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica.

El contenido de humedad promedio de las trozas fue de 109%, encontrándose variaciones importantes entre individuos y también para una misma ubicación en el radio y en la altura.

Esta variación esta dada por características físicas y químicas de la madera, y por la variabilidad entre los distintos individuos presentes en un mismo rodal y la humedad en el sitio en el momento de la cosecha.

El contenido de humedad y su variabilidad son características importantes a tener en cuenta para definir programas de secado y para los procesos de impregnación.

La densidad básica promedio fue de 0,402 g/cm³ encontrándose también variaciones importantes entre árboles y dentro de un mismo árbol, en el radio y en la altura de fuste.

Cuadro N° 6: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica.

	Contenido de Humedad (%)	Densidad Ap. Básica (g/cm ³)
N° de probetas	225	225
Promedio	109	0,402
Máximo	183	0,522
Mínimo	64	0,318
Desv. Est.	25,22	0,037
Coef. de Variación (%)	23,1	9,1

6.1.3 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio.

Para el contenido de humedad y la densidad aparente básica se encontró que existe variación en el radio y en la altura. Como nos muestra el cuadro N° 7 y el gráfico N° 1, el contenido de humedad aumenta desde la zona cercana a la médula (probetas A), pasando por la zona central (probetas B) y siendo mayor en la zona cercana a la corteza (probetas C). Al igual que estudios anteriores la mayor variación la vemos en las probetas B. El conocimiento de esta variación nos permite optimizar los programas de secado y de impregnación, dependiendo de donde son obtenidas las tablas respecto a su ubicación en el radio.

La densidad aparente básica no tiene el mismo comportamiento que la humedad, ya que tenemos una disminución de densidad en la posición B, que analizada estadísticamente con una comparación de medias vemos que hay diferencia significativa entre ellos con 95% de confianza. Vemos también que en todas las ubicaciones no existen grandes diferencias en los coeficientes de variación.

Cuadro N° 7: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio.

Probeta	N°	HUMEDAD (%)			Densidad Ap. Básica (g/cm ³)		
		Media	Desv.Est.	CV (%)	Media	Desv.Est.	CV (%)
A	75	90,7	15,5	17,1	0,399	0,031	7,8
B	75	110,9	25,6	23,1	0,384	0,032	8,5
C	75	126,3	19,9	15,7	0,424	0,034	8,1

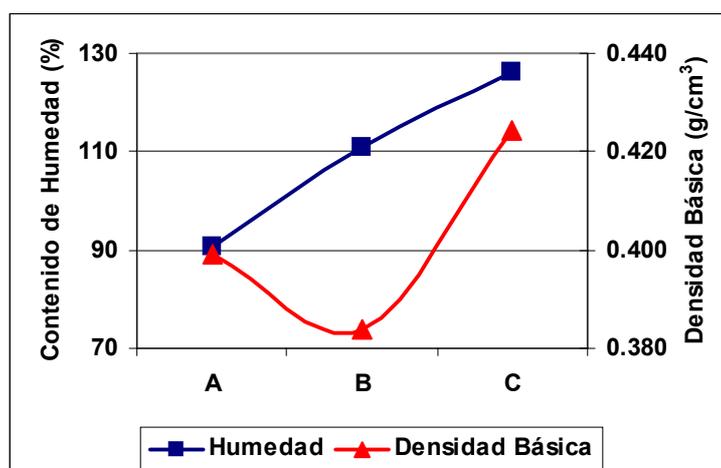


Gráfico N° 1: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación radial.

6.1.3.1 Análisis por altura según ubicación en el radio.

En el análisis según la ubicación en el radio para cada una de las alturas por separado se puede ver que todos los casos, las propiedades siguen la misma tendencia que se observó en el promedio. Las diferencias entre alturas están dadas básicamente por las distintas características de la madera, las que podrían ser influidas por la proporción de albura y por la distinta relación madera juvenil / madera adulta.

Como observamos en los gráficos 2 y 3 el contenido de humedad y la densidad básica se comportan en forma inversa si lo analizamos según la altura. La mayor humedad la vemos en las trozas 1, mientras que presentan los menores valores para la densidad, presentando para los dos casos los valores medios en las trozas 2. Si lo analizamos según el radio, vemos que la humedad presenta un comportamiento homogéneo, aumentando los valores a medida que nos alejamos de la médula. La densidad no presenta unos valores tan homogéneos, ya que vemos un descenso en los valores de las probetas B con respecto a las probetas A, aumentando nuevamente en las probetas C.

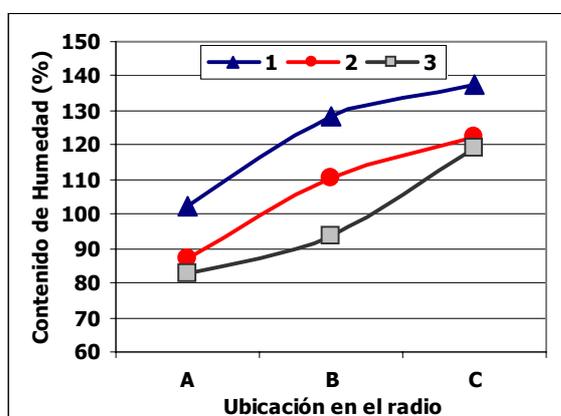


Gráfico N° 2: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio

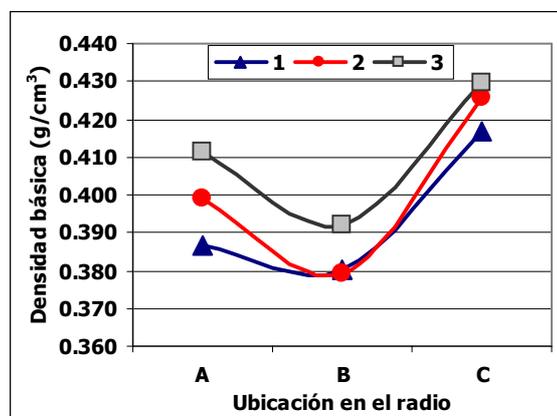


Gráfico N° 3: Densidad Aparente Básica por altura según ubicación en el radio

6.1.4 Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura.

En cuanto a la variación en altura, el contenido de humedad promedio disminuyó a medida que aumentaba la altura, siendo menor en la tercer troza, mientras que la densidad básica aumentó con la altura, siendo superior en la tercer troza.

Cuadro N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en altura.

Troza	N°	Humedad (%)			Densidad Ap. Básica (g/cm ³)		
		Media	Desv.Est.	CV (%)	Media	Desv.Est.	CV (%)
1	75	122,8	24,1	19,6	0,395	0,038	9,6
2	75	106,7	22,9	21,5	0,401	0,037	9,2
3	75	98,4	22,7	23,1	0,411	0,034	8,2

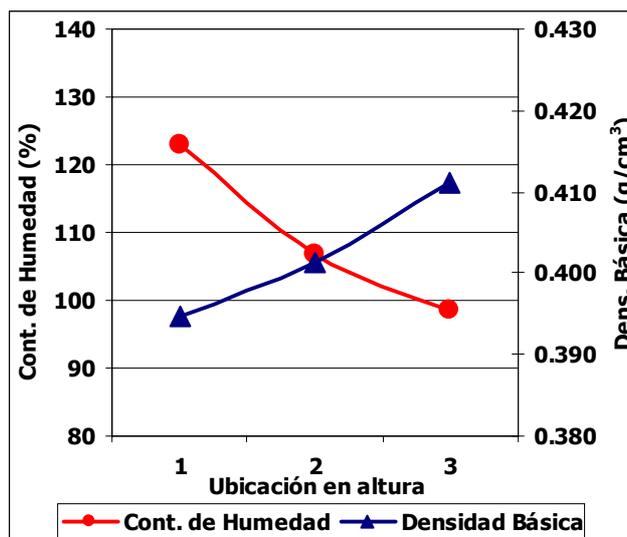


Gráfico N° 4: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura.

6.1.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura.

Analizando ambas propiedades por altura para cada una de las probetas (A, B y C) se ve una misma tendencia en la altura para todas las ubicaciones en el radio, variando solo el valor absoluto de la propiedad para cada caso. Tanto para la Humedad como para la Densidad no hay mayores diferencias entre las tres alturas.

Para la humedad, las probetas "C" muestran los valores más altos, seguidas de las "B" y luego de las "A". Para el caso de la densidad, las probetas C, mantienen los valores mas altos, seguidos por las probetas A, y por último los probetas B. (Gráficos N° 5 y N° 6)

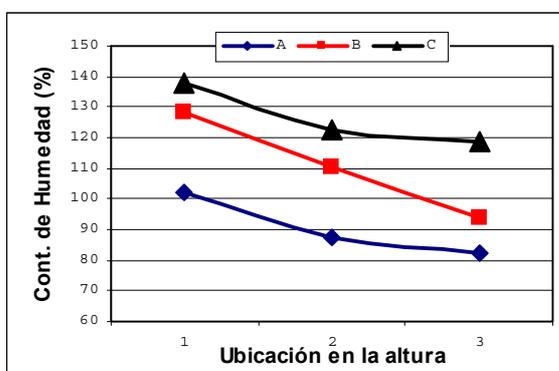


Gráfico N° 5: Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura

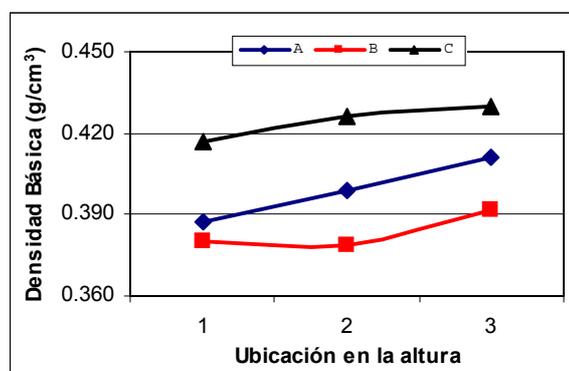


Gráfico N° 6: Densidad Aparente Básica por probeta según ubicación en altura

6.1.5 Módulo de elasticidad de las trozas.

El MOE promedio de los 25 árboles analizados es de 12735 MPa, existiendo una variación importante entre los distintos individuos, hallando un rango de valores que van desde 10000 a más de 14000 MPa (Gráfico N° 7). Un 92 % de los árboles presentan valores de MOE entre 11000 y 14000 MPa. Se tomó como valor del árbol el promedio de los valores de las tres trozas (primera, segunda y tercera troza).

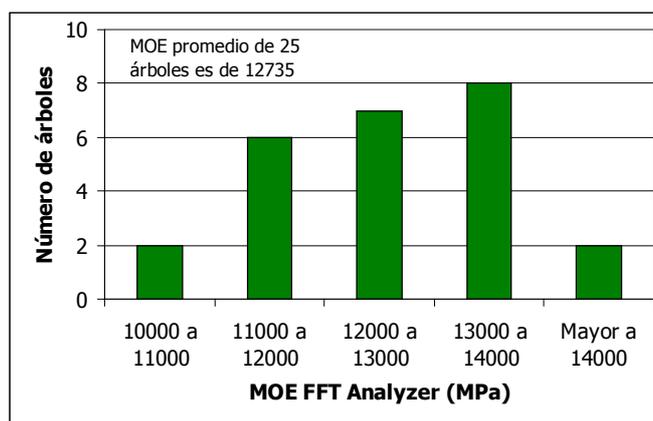


Gráfico N° 7: Variación de los valores de MOE entre árboles.

Existe un patrón de variación para las trozas dentro de un mismo árbol. El valor más alto de MOE se encontró en la tercer troza, seguido de la segunda troza y luego de la primera.

Cuadro N° 9: MOE sin corteza (FFT Analyzer) según troza

	MOE Trozas sin corteza (FFT Analyzer)			Media (MPa)
Trozas	1	2	3	
Promedio	11300	13178	13728	12735
Máximo	13105	16061	16624	15263
Mínimo	8804	11317	8723	9615
Desv.Est.	1094	1172	1696	1321
CV (%)	9,7	8,9	12,4	10,3

No se encontró relación entre el MOE de las trozas y la velocidad de crecimiento que para este estudio se expresó como diámetro a la altura de pecho (DAP), este hecho nos permite decir que en este estudio la calidad de la madera no depende de la velocidad de crecimiento ($r = -0,394$) (Gráfico N° 8) pero si vemos una mejor relación entre el MOE con la densidad básica ($r = 0,609$)

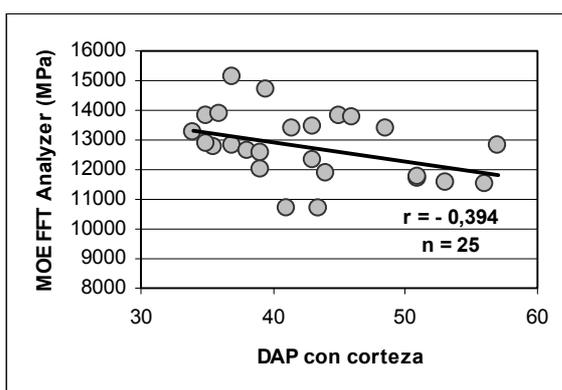


Gráfico N° 8: Relación entre el MOE y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP)

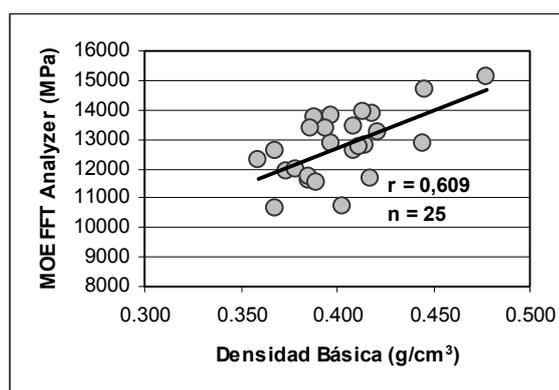


Gráfico N° 9: Relación entre el MOE y la densidad aparente básica (condición verde)

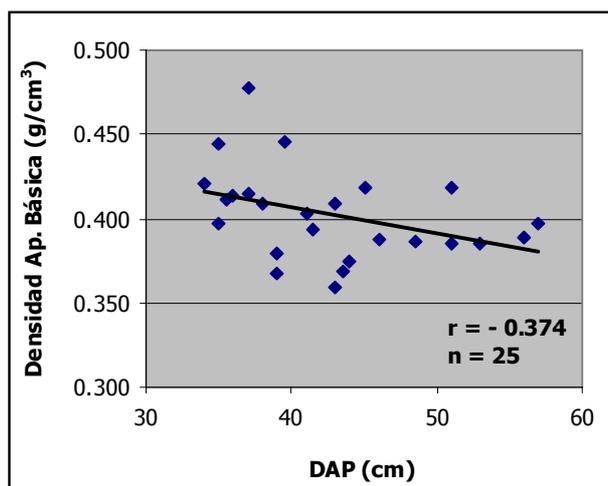


Gráfico N° 10: Relación entre la densidad aparente básica y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP)

6.2 Estudios realizados en tablas secas (2" X 6")

Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) en tablas secas y dimensionadas (50mm x 150mm x 2,8m) mediante dos ensayos mecánicos uno no destructivo, por el método de la principal frecuencia de vibración longitudinal, utilizando el equipo de FFT Analyzer y otro destructivo, el ensayo de flexión estática en Máquina Universal donde se determinaron el MOE y el módulo de rotura (MOR).

Las tablas fueron secadas en horno industrial, y posteriormente fueron llevadas a sus dimensiones finales de ensayo. El contenido de humedad promedio de las tablas luego del secado y en condiciones de ensayo fue de 10,9 %.

6.2.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas 2" X 6".

En el cuadro N° 10 se muestran los promedios de las propiedades estudiadas para todas las tablas obtenidas en el aserrado de las trozas ("BA", "B" y "C"). En estos promedios se incluyen las tablas "BA" ya que en el aserrado se descarto la médula, a diferencia de los muestreos de pinos anteriores en que la tabla "A" contiene médula.

Cuadro N° 10: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (BA, B y C).

	FFT Analyzer MOE (MPa)	Máquina Universal		Densidad Ap. Corriente (g/cm ³)
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	
Número	205	231	231	233
Promedio	13476	11764	50,3	0,442
Máximo	18439	21267	79,6	0,642
Mínimo	8874	7415	15,4	0,355
Desv.Est.	1930	2025	14,7	0,043
CV (%)	14,3	17,2	29,1	9,8

En el cuadro anterior se ven unos valores mínimos de MOE y MOR que son bajos. El valor mínimo de MOE lo presenta una tabla BA de una troza basal, y el valor mínimo de MOR lo presenta una tabla B de una tercer troza. Fueron incluidos en este estudio para mostrar la gran variabilidad que presenta la madera. En el proceso industrial se debe realizar una inspección visual de la madera y descartar esta madera para uso estructural y darle otro destino. También podemos observar la gran variación que existe en el MOR con un 29 %.

Más adelante en este informe veremos la influencia que tiene la presencia de nudos en el comportamiento de la madera en el ensayo de flexión en pequeñas probetas libres de defectos, afectando los valores del MOE y del MOR, estos últimos en forma significativa.

En el cuadro N° 11 veremos el resumen de los valores promedio de las propiedades mecánicas de las tablas B y C provenientes de las primeras y segundas trozas.

Cuadro N° 11: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1ª y 2ª troza.

	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Corriente (g/cm ³)
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	
Número	95	105	105	107
Promedio	14088	12174	57,4	0,447
Máximo	18439	17604	79,6	0,642
Mínimo	10994	8850	25,0	0,366
Desv.Est.	1634	1788	13,6	0,045
CV (%)	11,5	14,7	23,7	10,2

De los valores promedio de las propiedades analizadas en los cuadros N° 10 y 11, se puede concluir que la influencia de las tablas BA y de la totalidad de las tablas de las terceras trozas no es significativa en los resultados de MOE y si tienen diferencia significativa en el MOR, influenciado por la presencia de nudos y rajaduras, analizado con comparación de medias con un 95% de confianza.

6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas.

Se realizó la comparación entre los valores de Módulo de Elasticidad obtenidos mediante ensayos no destructivos (FFT Analyzer) y destructivos en ensayo de Flexión Estática en Máquina Universal. En anteriores estudios se encontró buena relación entre ambos ensayos y por primera vez en este muestreo, encontramos una baja correlación entre ambas variables, hecho que puede estar influenciado por la edad y los defectos de la madera, que hayan afectado en la determinación del Módulo Elástico por el método no destructivo.

Se hizo un análisis de las distintas variables que comprenden al ensayo y se detectaron una serie de datos anómalos y una vez descartados obtuvimos un $r = 0,796$ como podemos ver en el gráfico N° 11.

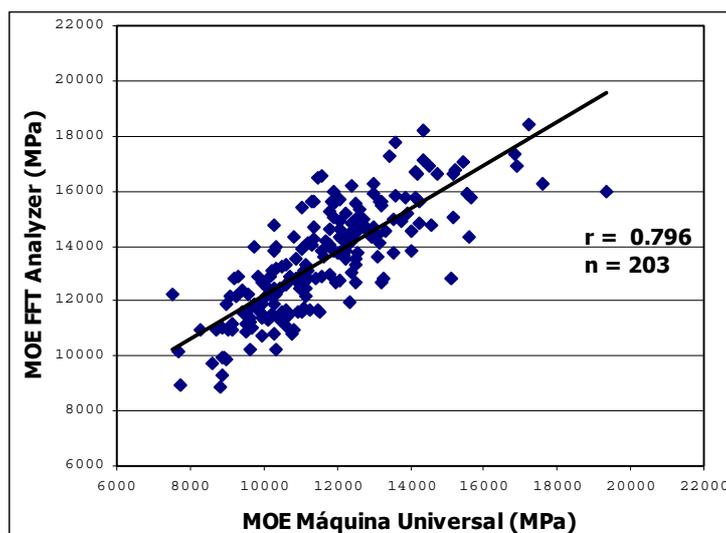


Gráfico N°11 : Relación entre el MOE (Máquina Universal) y el MOE (FFT Analyzer).

En las tablas no se encontró una alta correlación entre el MOE y el MOR, esto se debe principalmente a que el MOR está muy influenciado por los defectos de la madera como los nudos, cosa que no sucede con el MOE, ya que está más influenciado por las características de la madera y la edad cambial. Podemos ver en el gráfico N° 12, a modo de ejemplo que para un valor de 12000 MPa (que fue el promedio de las 231 tablas) existe una variación de valores de MOR de 25 a 77 MPa.

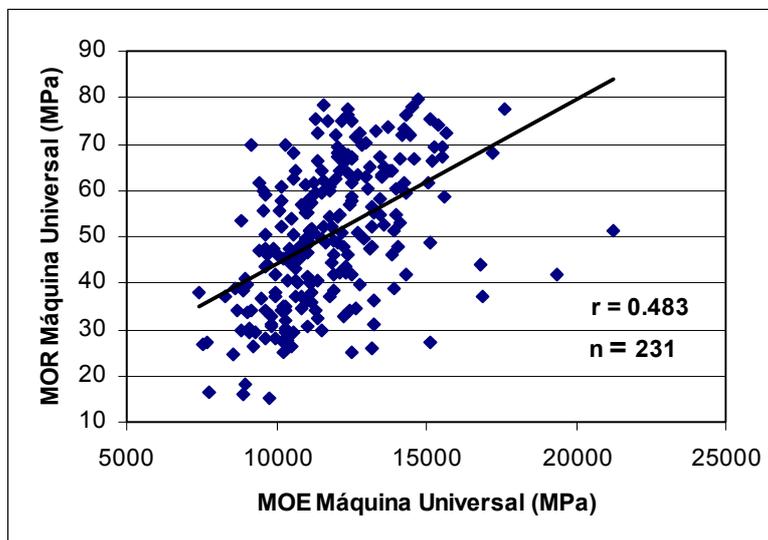


Gráfico N° 12 : Relación entre el MOE y el MOR.

6.2.3 Relación entre la Densidad Aparente Corriente y las propiedades mecánicas.

Se analizó la relación de las propiedades mecánicas (MOE y MOR) con la densidad corriente. Se encontró una correlación significativa solo en las tablas BA para el caso del MOE, y en el MOR no se encontró correlación para ninguna de las tres ubicaciones de las tablas. (Gráficos N° 13 y 14).

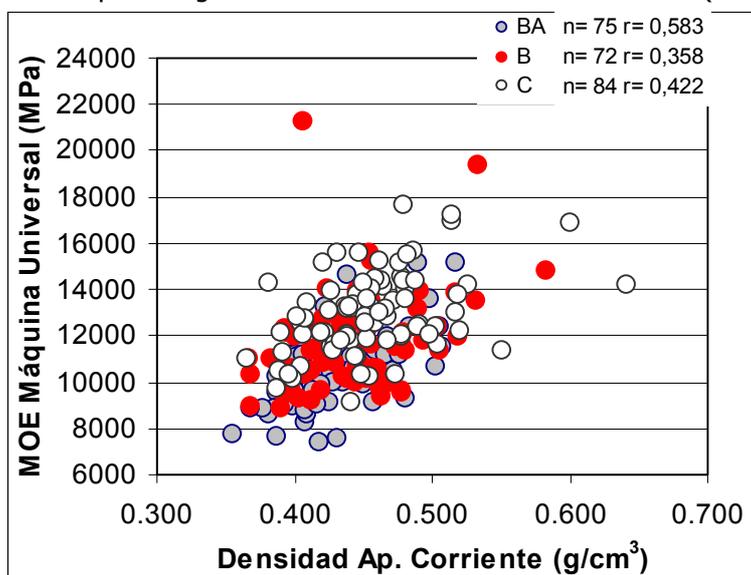


Gráfico N° 13 : Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)

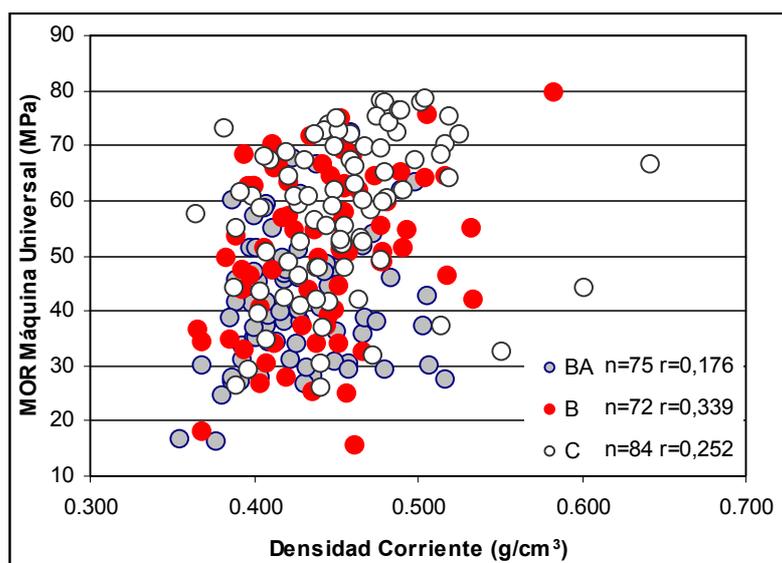


Gráfico N° 14 : Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo de Rotura (Máquina Universal)

6.2.4 Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según la ubicación en el radio.

La variación del módulo de elasticidad y el módulo de rotura en el radio muestra una tendencia muy clara, aumentando a medida que nos alejamos de la médula, pasando por madera juvenil, madera de transición y madera adulta cercana a la corteza.

Las tablas C son las que presentan los mayores valores para las propiedades mecánicas. (Cuadro N° 12 y Gráfico N° 15)

Cuadro N° 12: Valores promedio para el MOE y MOR obtenido en Máquina Universal según ubicación en el radio.

Ubicación de la tabla	Número de las tablas	Máquina Universal		Densidad Corriente (g/cm ³)
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	
BA	75	10524	41,4	0,427
B	74	11703	50,8	0,443
C	84	12924	57,9	0,455

Cuadro N° 13: Valores promedio para el MOE obtenido con FFT Analyzer según ubicación en el radio

Ubicación de la tabla	Número de las tablas	FFT Analyzer MOE (MPa)
BA	72	12002
B	65	13557
C	66	14978

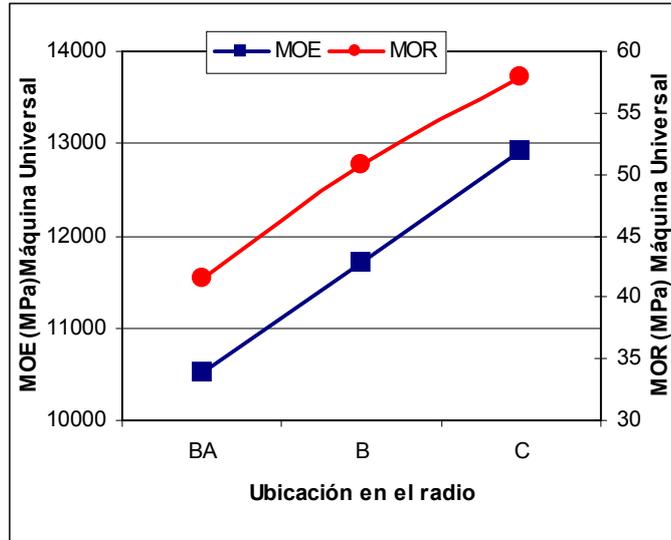


Gráfico N° 15: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio.

6.2.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura.

Si se analiza la variación en el radio de las propiedades mecánicas para las distintas alturas por separado, el comportamiento encontrado es el mismo para todas las alturas e igual al promedio. (Gráficas N° 16 y 17).

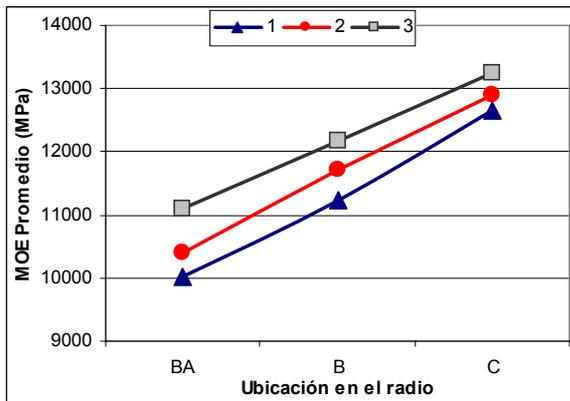


Gráfico N° 16: MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

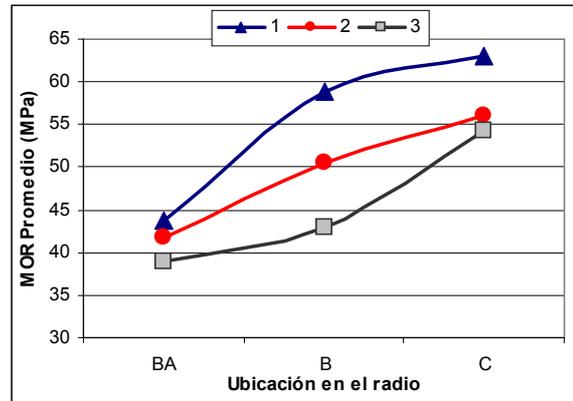


Gráfico N° 17: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

Notoriamente la edad cambial de la madera influye en las propiedades mecánicas de la madera, a diferencia de los datos obtenidos en el Informe N° 4 (Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay de 12 años de edad) en el que hubo una diferencia significativa en los valores de MOR en tablas BA, siendo muy similares en tablas B y en tablas C, y para este muestreo vemos unos resultados mas homogéneos, influenciado también por el hecho de que al tener mayor diámetro de trozas, el lugar de donde se obtuvieron las probetas en el aserrado es más preciso y se pueden diferenciar las posiciones de donde obtener las mismas.

6.2.5 Análisis del Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura según ubicación en la altura.

Los valores promedio de MOE aumentan a medida que subimos en la altura y por el contrario en MOR los valores promedio son más altos en troza basal, siendo menores en la segunda troza, y menor aún en la tercer troza.(Cuadro N° 14 Gráfico N° 18).

La densidad corriente tiene unos valores similares en las tres alturas, siendo un poco superior en las primeras y las terceras trozas.

Cuadro N° 14: Valores promedio para el MOE y MOR obtenidos con Máquina Universal según ubicación en la altura.

Ubicación en altura	Número de las tablas	Máquina Universal		Densidad Ap. Corriente (g/cm ³)
		MOE (MPa)	MOR (MPa)	
1	76	11402	55,9	0,447
2	78	11696	49,6	0,429
3	77	12190	45,6	0,451

Cuadro N° 15: Valores promedio para el MOE obtenidos con FFT Analyzer según ubicación en la altura.

Ubicación en altura	Número de las tablas	FFT Analyzer MOE (MPa)
1	68	11470
2	73	13452
3	64	13954

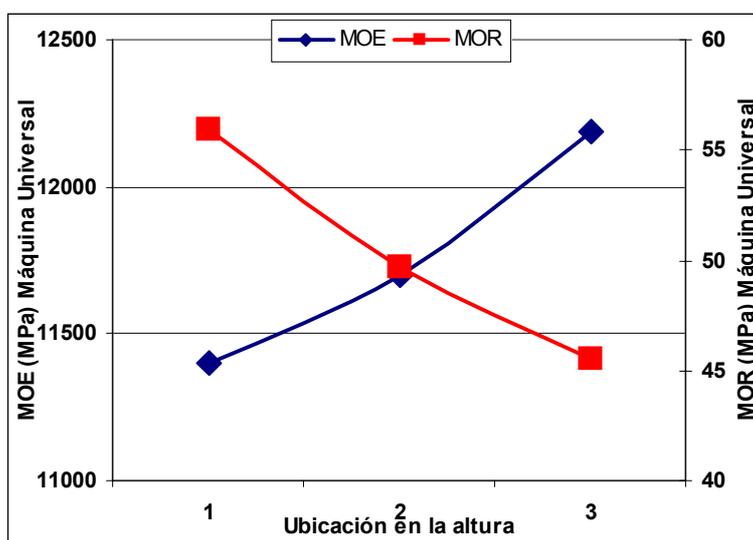


Gráfico N° 18: MOE y MOR según ubicación en altura.

6.2.5.1 Análisis por ubicación en el radio según altura.

Los valores promedio del módulo de elasticidad y del módulo de rotura tienen un comportamiento muy similar para las tres alturas, aumentando los valores a medida que nos alejamos de la médula, para el caso del MOE y disminuyendo para el caso del MOR.

Una vez más encontramos los mayores valores en las tablas C, seguidos por las tablas B, y con los valores más bajos para las tablas BA. Encontramos un comportamiento muy homogéneo, que se puede explicar por los mayores diámetros de las trozas en las que en el proceso de aserrado fue más fácil obtener las probetas que queríamos analizar.

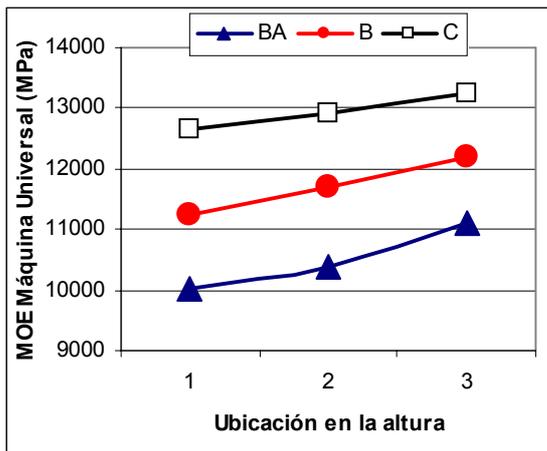


Gráfico N° 19: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

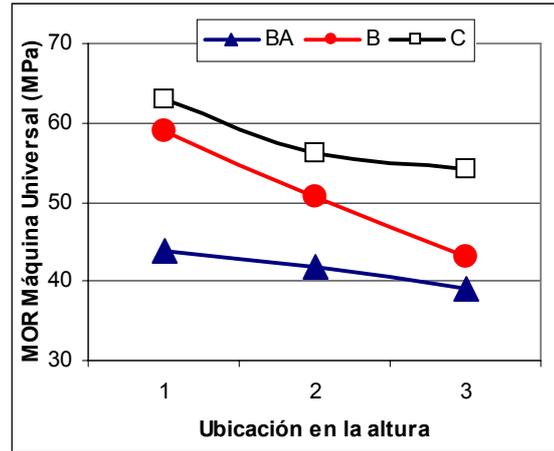


Gráfico N° 20: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

6.2.6 Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de sus tablas

Se estudió la relación entre el Módulo de Elasticidad de las trozas verdes obtenido mediante el ensayo no destructivo (FFT Analyzer) y el MOE obtenido en ensayo de flexión estática (Máquina Universal) del promedio de las tablas aserradas de cada una de las trozas.

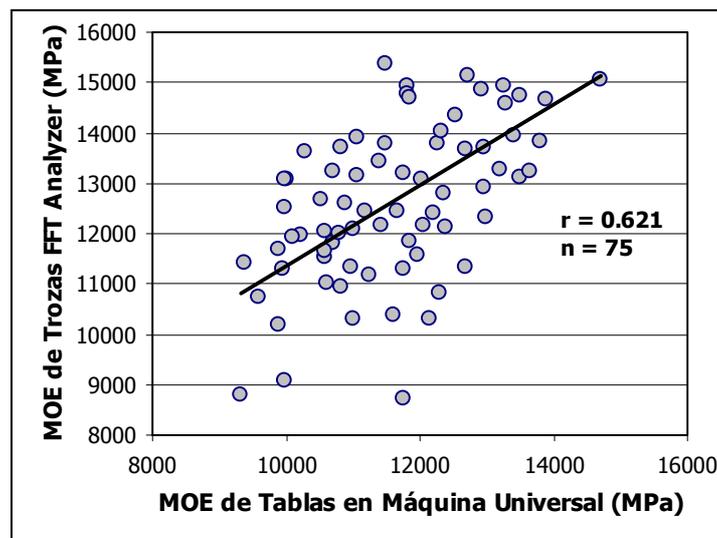


Gráfico N° 21: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas.

Se encontró buena relación entre los dos métodos ($r = 0,621$). En el estudio anterior de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay (Informe N° 4), encontramos una relación mas baja, explicada por la menor edad de los árboles y por lo tanto menor volumen de madera ensayada. La importancia de que exista una buena correlación entre ambos métodos nos permite utilizar el FFT Analyzer como un método de ensayo no destructivo de fácil y práctica aplicación que puede ser utilizado en el patio de trozas de un aserradero o en lugar donde se estime necesario para facilitar la clasificación por resistencia mecánica de las trozas.

6.2.7 Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural

Siguiendo el mismo criterio que utilizamos en los informes del Grupo Técnico de Madera Aserrada, tendremos en cuenta la clasificación de las tablas según normas JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de uso estructural.

En el gráfico N° 22 se muestra cómo se relacionan el MOE obtenido en ensayo de flexión estática con la Máquina Universal y el obtenido mediante el FFT Analyzer, con el propósito de poder visualizar la magnitud y la dispersión de los valores para los distintos tipos de tablas y también si dichas tablas entran dentro de las categorías estructurales.

Como ya vimos cuando relacionamos el MOE obtenido en Máquina Universal con el MOE obtenido con el FFT Analyzer de todas las tablas había una relación baja, por lo que estos fueron analizados y se descartaron algunos datos anómalos.

Analizándolo por separado para las distintas ubicaciones de las tablas, vemos una buena relación en las tablas BA, B y C.

Como podemos observar en el Gráfico N° 22 hay solo tres tablas BA no clasifican para uso estructural, según Máquina Universal.

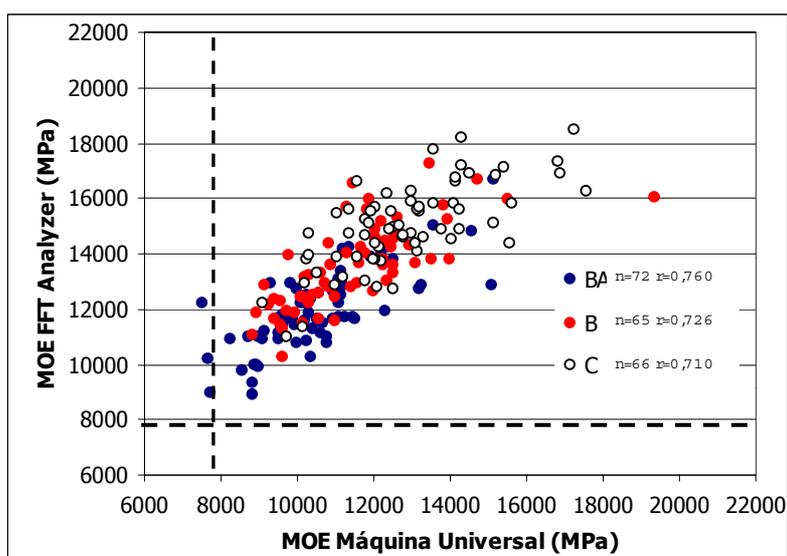


Gráfico N° 22: Relación entre el MOE (Máquina Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas BA, B y C.

6.2.8 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según normas JAS

En los siguientes cuadros N° 16y N° 17 se muestra la clasificación de las tablas según normas JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de coníferas de uso estructural. Según dichas normas a partir de las categorías E 90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa), la madera puede ser utilizada con fines estructurales en la construcción. Si bien esas normas son para madera de coníferas, la seguimos utilizando con madera de latifoliadas a modo de poder comparar con los muestreos realizados anteriormente.

Es importante aclarar que la evaluación de las tablas se basó en los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal y hemos visto en este trabajo como en otros realizados con anterioridad, que existe una diferencia en el MOE promedio obtenido mediante FFT Analyzer de aproximadamente un 10 % superior a los valores de MOE obtenidos mediante máquina universal, diferencia que deberemos tener presente cuando hagamos un estudio de la madera para uso estructural en ensayo que no sea destructivo.

Cuadro N° 16: Porcentaje de tablas según categoría JAS

Categoría JAS	MOE 10 ³ kgf/cm ²	MOE Máquina Universal (MPa)	Cantidad de Tablas	Porcentaje %
<E 50	< 40	< 3920	0	0
E 50	40 – 60	3920 – 5880	0	0
E 70	60 – 80	5880 – 7850	4	1,7
E 90	80 – 100	7850 – 9810	33	14,3
E 110	100 – 120	9810 – 11770	84	36,4
E 130	120 – 140	11770 – 13730	72	31,2
E 150	140 – 160	13730 – 15690	32	13,9
> E 150	> 160	> 15690	6	2,6

En el cuadro N° 16 y en el gráfico N° 23 representamos la distribución de los valores de MOE de las tablas, donde observamos que entre los rangos E 90 y E 130 se concentra un 82 % de las tablas ensayadas. A partir de la categoría E 90 inclusive la madera sería apta para uso estructural. Entre las categorías E 110 y E 130 se concentra el 68 % de las tablas.

En el cuadro N° 17 y el gráfico N° 24 vemos esta misma distribución pero discriminada por tipo de tabla (BA – B – C), donde la totalidad de las tablas B y C son iguales o mayores a E 90 y de las tablas BA solo cuatro están en la categoría E 70 y no calificarían como madera estructural. En las categorías E 110 y E 130 se concentran un 64,5 % de las tablas BA, un 68,9 % de las tablas B, y un 63,6 % de las tablas C. Estos valores porcentuales son menores que los del Informe N°4 de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay (Agosto 2004), pero vemos incrementados los valores de la categoría E 150 o mayores de E 150, en que encontramos un 5% de tablas BA, un 14,9% de tablas B y un 34,1% de tablas C.

Cuadro No 17: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS

Categoría JAS	MOE 10 ³ kgf/cm ²	MOE Máquina Universal (MPa)	Tablas BA		Tablas B		Tablas C	
			n	%	n	%	n	%
<E 50	< 40	< 3920	-----	-----	-----	-----	-----	-----
E 50	40 – 60	3920 – 5880	-----	-----	-----	-----	-----	-----
E 70	60 – 80	5880 – 7850	4	5,3	-----	-----	-----	-----
E 90	80 – 100	7850 – 9810	19	25,0	12	16,2	2	2,3
E 110	100 – 120	9810 – 11770	40	52,6	28	37,8	16	18,2
E 130	120 – 140	11770 – 13730	9	11,8	23	31,1	40	45,5
E 150	140 – 160	13730 – 15690	3	4,0	7	9,7	22	26,2
> E 150	> 160	> 15690	-----	-----	2	2,7	4	4,5
Porcentaje de tablas de categoría estructural				94,7		100		100

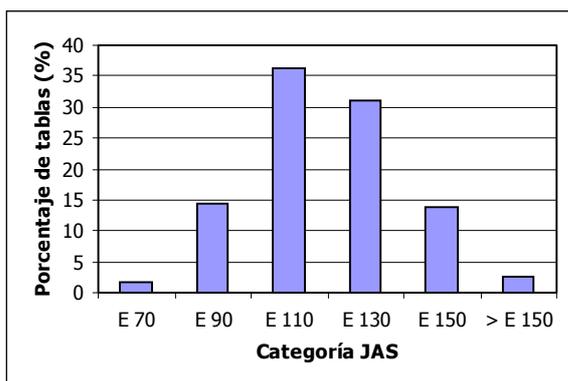


Gráfico N° 23: Porcentaje de tablas ensayadas según categoría JAS

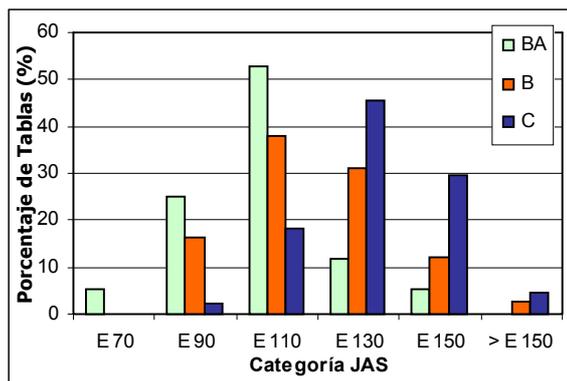


Gráfico N° 24: Porcentaje de tablas ensayadas por ubicación en el radio según categoría JAS

Si analizamos el gráfico N° 24, vemos una distribución uniforme entre las distintas categorías de tablas, y vemos como las tablas BA y las B tienen el mayor porcentaje de tablas en la categoría E 110 y las tablas C en la categoría E 130. En el cuadro N° 18 vemos con mayor detalle esta distribución y sus porcentajes correspondientes, en que se destaca como el mayor porcentaje de tablas se concentra en las categorías E 110 y E 130.

Analizamos el porcentaje de BA, B y C que según las normas JAS calificarían como madera para uso estructural, discriminándolas también por la altura del fuste (primera, segunda y tercera troza).

Cuadro N° 18: Porcentaje de tablas por ubicación en la altura y en el radio aptas para uso estructural según norma JAS.

TROZA 1		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
TABLA	No	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%
BA	22	7	31,8	14	63,6	1	4,5	0	0	0	0
B	24	5	20,8	12	50,0	6	25,0	1	4,2	0	0
C	29	1	3,4	7	24,1	13	44,8	7	24,1	1	3,4
TOTAL	75	13		33		20		8		1	

TROZA 2		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
TABLA	No	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%
BA	24	8	33,3	13	54,2	1	4,2	2	8,3	0	0
B	24	3	12,5	9	37,5	9	37,5	3	12,5	0	0
C	28	1	3,6	6	21,4	13	46,4	7	25,0	1	3,6
TOTAL	76	12		28		23		12		1	

TROZA 3		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
TABLA	No	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%	Tablas	%
BA	25	4	16,0	13	52,0	7	28,0	1	4,0	0	0
B	24	4	16,7	7	29,2	8	33,3	3	12,5	2	8,3
C	27	0	0	3	11,1	14	51,9	8	29,6	2	7,4
TOTAL	76	8		23		29		12		4	

6.3 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos

Una vez realizados los ensayos en tablas de 50mm X 150mm X 2,80 m se obtuvieron pequeñas probetas libres de defectos para realizar los siguientes ensayos: flexión dinámica con la que se obtuvo la resistencia al impacto, flexión estática, con las que se determinó el MOE y el MOR y dureza Janka, con las que se determinó dureza radial, tangencial y transversal.

6.3.1 Resumen de las propiedades mecánicas

Las probetas fueron acondicionadas en una cámara climatizada (en condiciones de 20° C de temperatura y 65 % de humedad relativa) para llevarlas a un contenido de humedad cercano al 12 %, hasta alcanzar la humedad de equilibrio en la madera mediante el peso constante. El contenido de humedad promedio de las probetas en el momento de ensayo fue de 11,5 %. Los cuadros N° 19 y N° 20 nos muestran los promedios de las propiedades estudiadas para las probetas provenientes de todas las tablas (BA, B y C).

Cuadro N° 19: Resumen de las propiedades mecánicas (MOE y MOR) de pequeñas probetas libres de defectos

	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Apar. Corriente (g/cm ³)	Contenido de Humedad (%)
Número	233	233	232	232
Promedio	11628	72,5	0,439	11,5
Máximo	17812	104,7	0,612	13,2
Mínimo	6635	44,3	0,325	10,5
Des.Est.	2093	13,1	0,049	0,35
CV (%)	18,0	18,0	11,2	3,1

Analizando el Cuadro N° 19 vemos que el Coeficiente de Variación del MOE es similar al que encontramos cuando se analizaron las tablas de tamaño real, pero para el caso del MOR es notoriamente inferior, (CV = 29,1% para tablas de tamaño real), lo que nos marca la importancia de realizar los ensayos en madera libre de defectos para ver el verdadero potencial que puede dar esta madera cuando es manejada con podas y raleos.

Cuadro N° 20: Resumen de las propiedades mecánicas (Flexión Dinámica y Dureza Janka) de pequeñas probetas libres de defectos

	FLEXIÓN DINAMICA Resist. al Impacto (J/cm ²)	DUREZA JANKA		
		Radial (MPa)	Tangencial (MPa)	Transversal (MPa)
Número	218	231	231	36
Promedio	5,1	27,9	31,0	47,7
Máximo	12,5	62,9	88,5	63,2
Mínimo	1,5	14,7	14,2	34,9
Desv. Est.	2,4	7,6	9,1	7,4
CV (%)	47,8	27,1	29,4	15,5

En las dos durezas se observa que la transversal es mayor que la tangencial y ésta a su vez es mayor que la radial. Esto concuerda con la bibliografía y se presenta como una relación bastante constante para otras especies. También observamos que los coeficientes de variación para la flexión dinámica y las durezas radiales y tangenciales son altos, algo que ya habíamos visto en el informe N° 4 de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay "GT2" (Agosto 2004).

6.3.2 Variación de las propiedades mecánicas según la ubicación en el radio

A continuación se presenta un análisis de la variación de las propiedades en función de la ubicación en el radio (BA, B y C).

El comportamiento del MOE y del MOR, así como la densidad aparente corriente tienen un comportamiento similar, aumentando los valores a medida que nos alejamos de la médula, o sea aumenta a medida que aumenta la edad cambial, a diferencia del Informe N° 4, en el que no vimos una tendencia en este sentido, y también vemos un aumento en los coeficiente de variación lo que podría explicarse por los mayores diámetros obtenidos en el muestreo, y por lo tanto una mayor variación entre madera juvenil y madera adulta.

Cuadro N° 21: Propiedades mecánicas MOE y MOR según ubicación en el radio

Probeta	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Densidad Aparente Corriente (g/cm ³)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
BA	75	10848	16,9	67,9	17,8	0,421	9,9
B	74	11326	17,9	72,4	18,2	0,438	10,9
C	84	12590	16,0	76,7	16,4	0,455	11,2

Cuadro N° 22: Resistencia al Impacto según la ubicación en el radio

Probeta	N°	Resistencia al Impacto (J/cm ²)	
		Media	C.V. (%)
BA	66	3,8	47,1
B	70	5,2	43,4
C	82	6,0	43,3

Cuadro N° 23: Dureza Janka según ubicación en el radio.

Probeta	N°	Dureza Janka Radial (MPa)		Dureza Janka Tangencial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)
BA	73	25,9	29,3	28,5	29,6
B	74	28,1	28,0	31,2	34,0
C	84	29,4	23,7	33,0	23,5

En los gráficos siguientes N° 25, 26 y 27 veremos claramente lo anteriormente mencionado, donde se ilustra la tendencia de las propiedades en función del radio.

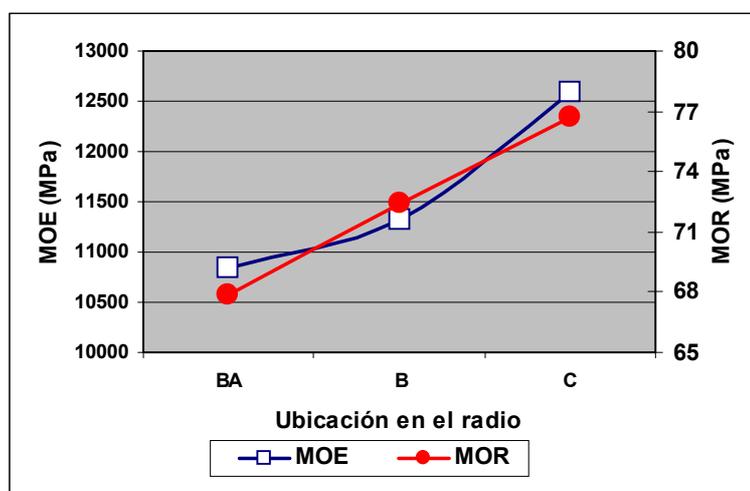


Gráfico N° 25: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio

Tanto para el MOE como para el MOR, se observa un incremento en forma lineal a medida que nos alejamos de la médula hacia la corteza.

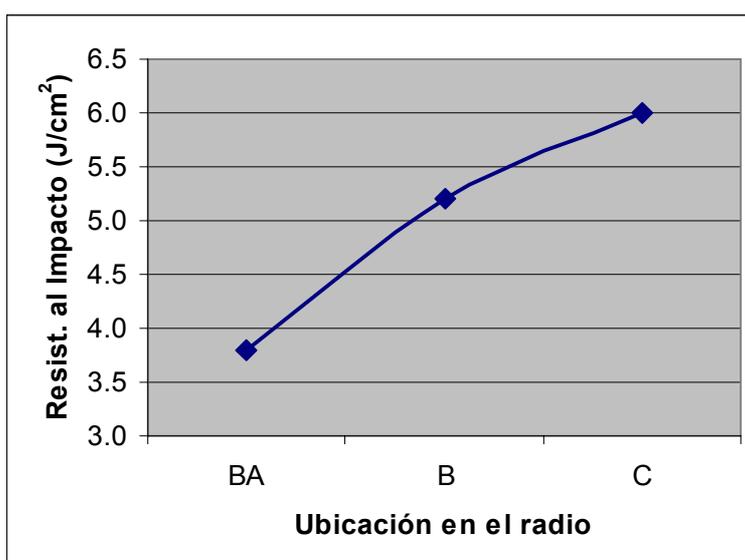


Gráfico N° 26: Resistencia al Impacto según ubicación en el radio

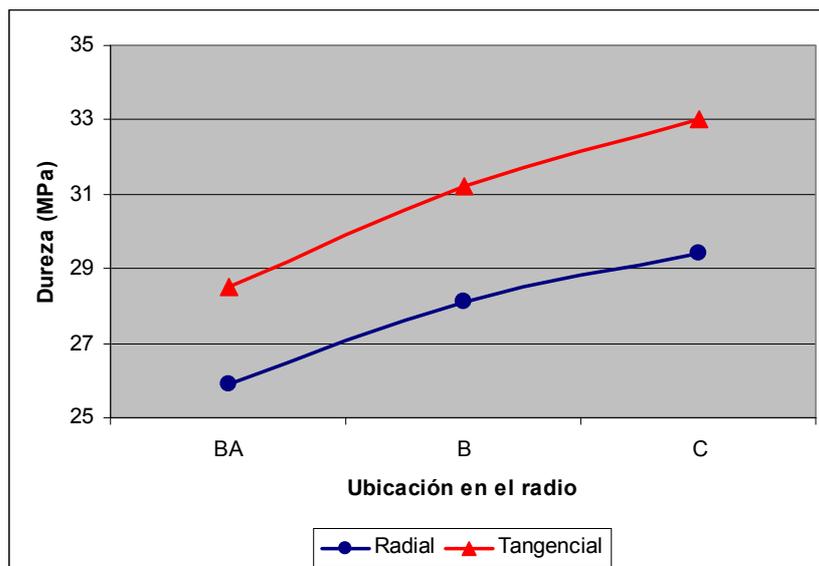


Gráfico N° 27: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio

La Resistencia al Impacto tiene la misma tendencia que el MOE y el MOR (Gráfico N° 26). Las probetas C, son más de un 60 % superiores a las probetas BA. Analizando el Gráfico N° 27 observamos que en la Dureza, la cara tangencial es un 10 % superior que la cara radial y la cara transversal es un 55 % superior a la cara tangencial.

6.3.3. Variación de las propiedades mecánicas en la altura

La variación de las propiedades mecánicas en la altura tiene un comportamiento homogéneo como en el radio, el MOE aumenta con la altura, el valor promedio del MOR disminuye en las tablas de la 2ª troza, y en el resto de las propiedades no hay diferencias significativas. Vemos si valores promedio más bajos que los presentados en el Informe N° 4 de este Grupo de Trabajo (Agosto 2004).

Cuadro N° 24: Propiedades mecánicas MOE y MOR según ubicación en la altura

TROZA	n	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Densidad Aparente Corriente (g/cm ³)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	76	11060	16,4	74,9	16,8	0,452	11,9
2	80	11694	19,5	70,2	18,9	0,425	10,6
3	77	12119	16,7	72,6	18,0	0,438	10,1

Cuadro N° 25: Resistencia al Impacto según la ubicación en la altura

TROZA	n	Resistencia al Impacto (J/cm ²)	
		Media	CV (%)
1	73	5,1	35,7
2	76	4,8	53,4
3	69	5,4	52,4

Cuadro N° 26: Dureza Janka según la ubicación en altura

TROZA	n	Dureza Janka Radial (MPa)		Dureza Janka Tangencial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	75	30,4	30,7	34,4	35,4
2	79	25,7	22,4	28,9	22,1
3	77	27,6	23,6	29,9	23,1

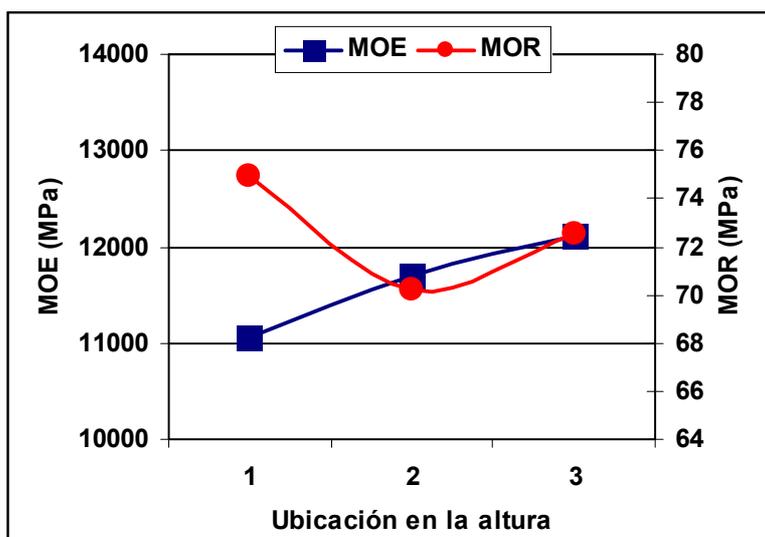


Gráfico N° 28: MOE y MOR promedio según ubicación en la altura

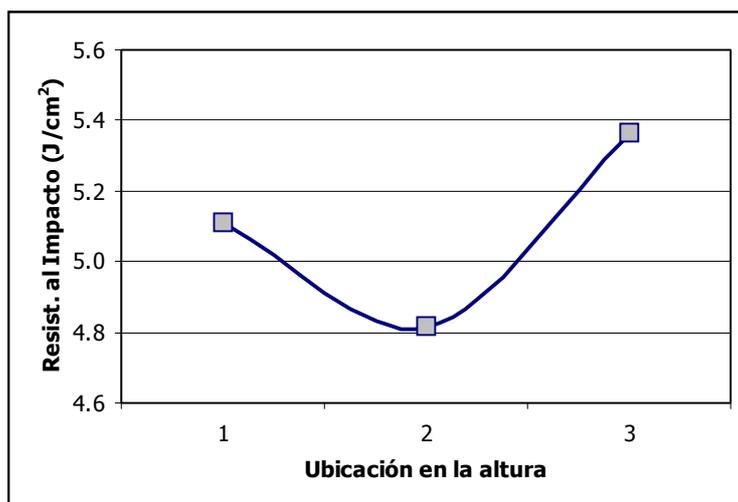


Gráfico N° 29: Resistencia al Impacto según ubicación en la altura

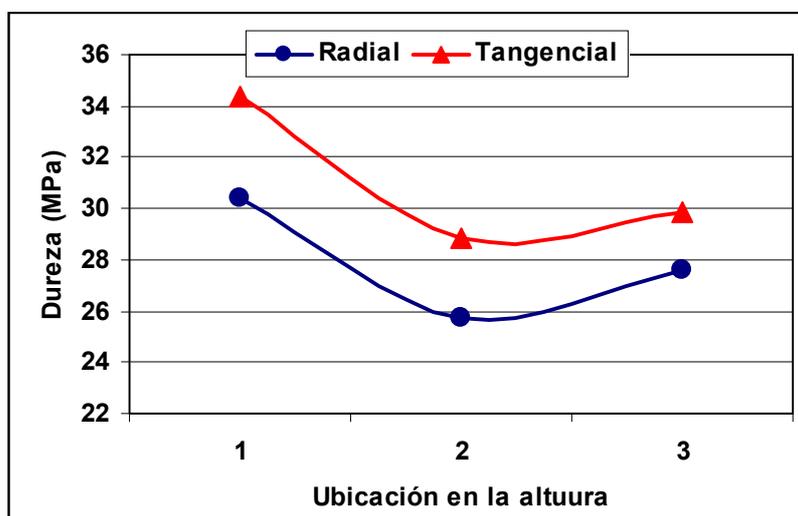


Gráfico N° 30: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en la altura

6.3.4 Análisis de las propiedades mecánicas por altura según ubicación en el radio

En este capítulo se busca analizar la variación de las propiedades en el radio para cada una de las tres alturas consideradas.

Los valores radiales promedio del MOE aumentan con la altura, salvo las tablas B de la troza 3 que son levemente inferiores que los valores de igual posición en las trozas 2. (Gráfico N° 31)

En el MOR vemos un comportamiento homogéneo para las trozas 1 y 2, pero encontramos un comportamiento diferente en las trozas 3, que tiene los valores más altos para las tablas BA y presentó valores similares a las trozas 2 en el resto de las posiciones. (Gráfico N° 32)

Si analizamos la densidad corriente, vemos también que la densidad de las trozas 3 es mayor que el promedio de las trozas 2. (Gráfico N° 33)

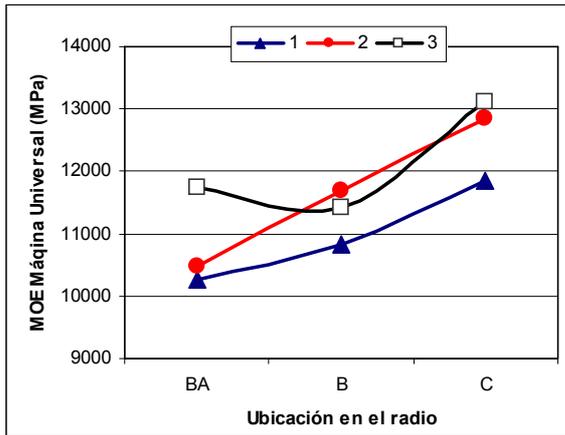


Gráfico N° 31: MOE promedio por altura según ubicación en el radio

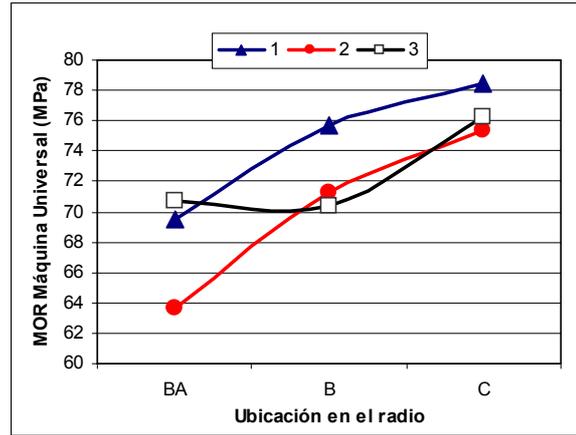


Gráfico N° 32: MOR promedio por altura según ubicación en el radio

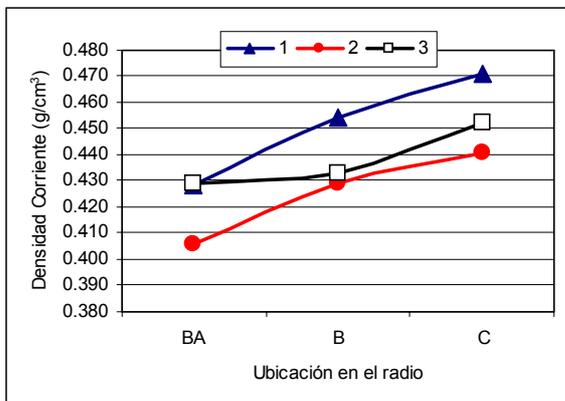


Gráfico N° 33: Densidad Aparente Corriente promedio por altura según ubicación en el radio

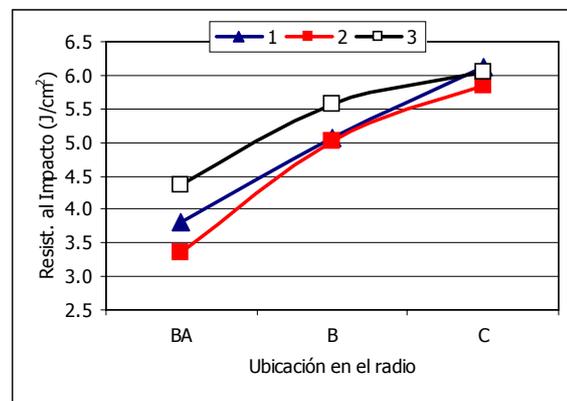


Gráfico N° 34: Resistencia al Impacto promedio por altura según ubicación en el radio

En la Resistencia al Impacto tenemos un comportamiento homogéneo para las tres alturas teniendo los valores promedio más altos en las trozas 3, seguidas por las trozas 1, y notamos un comportamiento muy similar para las probetas C, en las tres alturas. (Gráfico N° 34)

En la dureza vemos un notorio aumento de los valores promedio para las Trozas 1 y valores similares para las Trozas 2 y 3, aunque volvemos a ver que los valores promedio más altos se dan en las Trozas 3 y también lo podemos asociar con la mayor densidad de las Trozas 3, que como vimos en el Informe de Investigación N° 4 del Proyecto JICA – LATU (Ing. Agr. Álvaro Pérez del Castillo, 2001) encontró una correlación alta y positiva entre la densidad y la dureza ($r = 0,890$).

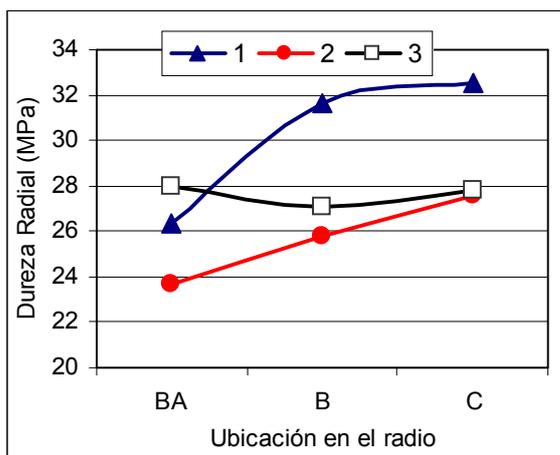


Gráfico No 35: Dureza Radial promedio por altura según ubicación en el radio

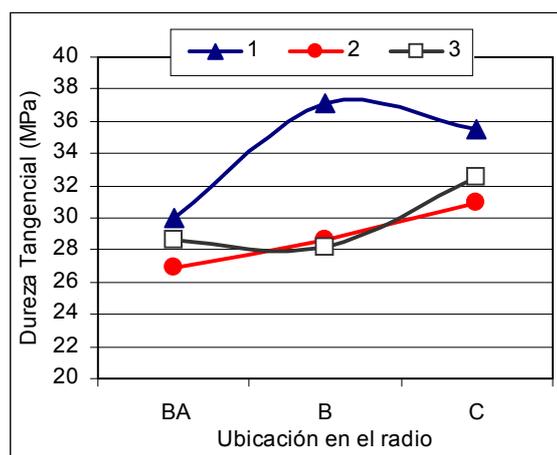


Gráfico No 36: Dureza Tangencial promedio por altura según ubicación en el radio

6.3.5 Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según altura

El siguiente es un análisis de las variaciones de las propiedades en la altura para cada una de las ubicaciones en el radio.

Los valores promedio del MOE aumentan con la altura para cada posición, salvo para las tablas B en las Trozas 3, en que los valores son un poco inferiores que las tablas BA. (Gráfico N° 37)

Los valores promedio del MOR aumentan a medida que aumenta la edad cambial de la madera, por lo que encontramos que las tablas C tienen los mayores valores promedio, seguidas por las B y luego por las BA. En relación a la altura encontramos una tendencia muy homogénea para las tablas B y C, y para las tablas BA vemos que los valores promedio más bajo se dieron en las trozas 2. (Gráfico N° 38)

La densidad aparente corriente es similar al comportamiento del MOR (Gráfico N° 39)

En caso de la Resistencia al Impacto, el comportamiento es muy homogéneo para las tres alturas, pero marcando bien la diferencia entre las distintas posiciones radiales de las tablas (Gráfico N° 40)

La dureza radial tiene un comportamiento constante para las tres posiciones, siendo los valores mayores los de las trozas basales y con valores promedio muy similares en las trozas 3.

La dureza tangencial es similar a la dureza radial, salvo en las tablas B de las trozas 1 que presenta los valores más altos.

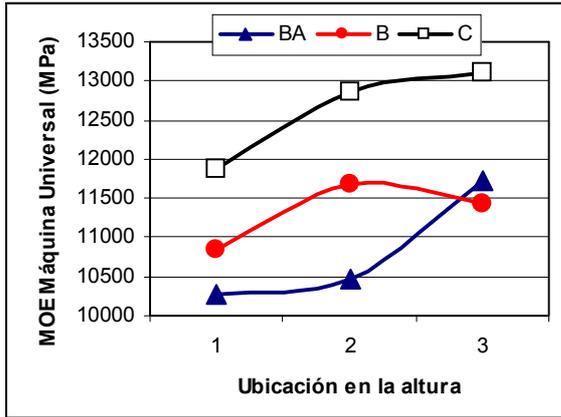


Gráfico N° 37: MOE promedio por ubicación en el radio según altura

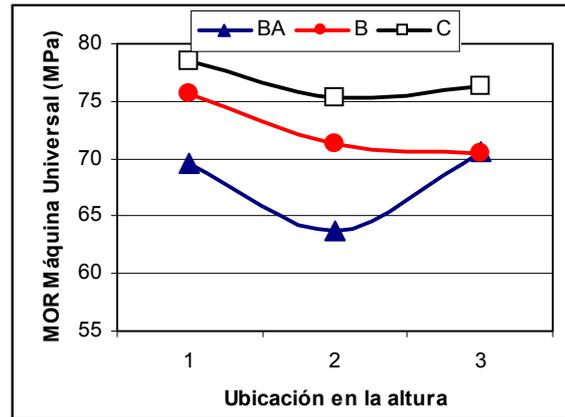


Gráfico N°38: MOR promedio por ubicación en el radio según altura

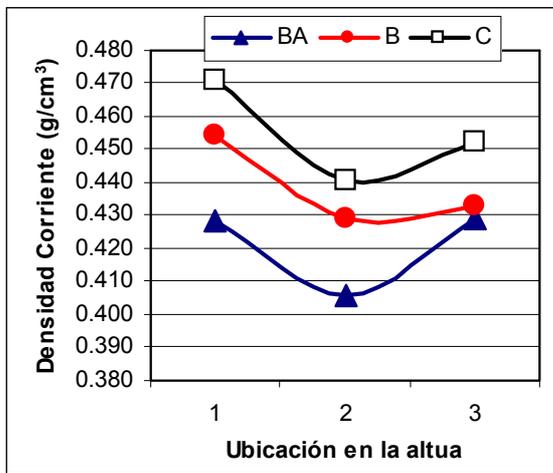


Gráfico N° 39: Densidad Aparente Corriente por ubicación en el radio según altura

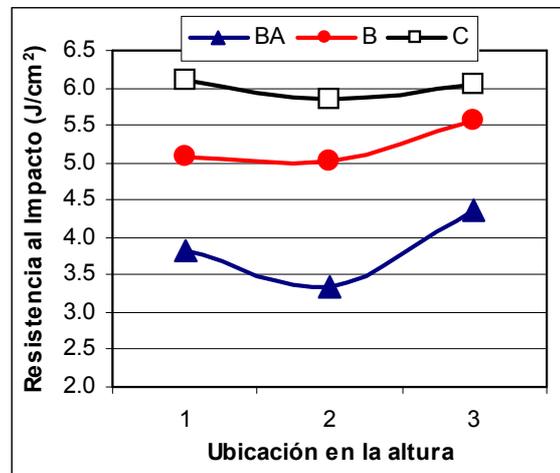


Gráfico N° 40: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura

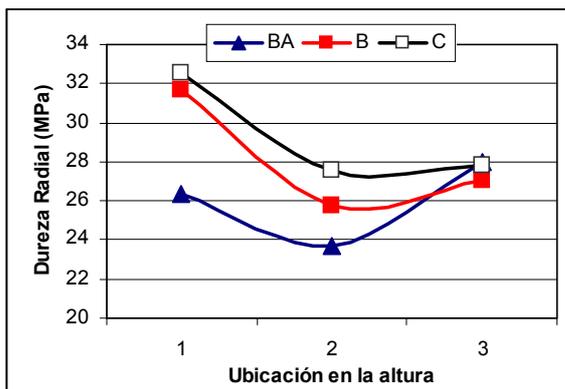


Gráfico N° 41: Dureza Radial por ubicación en el radio según altura

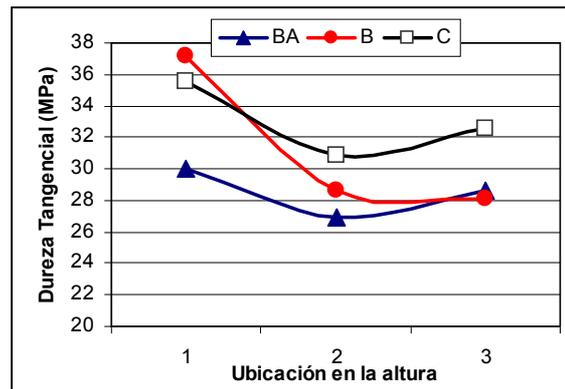


Gráfico N° 42: Dureza Tangencial por ubicación en el radio según altura

6.3.6 Relación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas

Se buscó analizar las correlaciones de las distintas propiedades mecánicas de las probetas libres de defectos entre ellas y también con la densidad corriente.

En los gráficos N° 43 y 44 vemos que existe relación entre MOE con el MOR ($r = 0,625$) y con la densidad aparente corriente ($r = 0,530$).

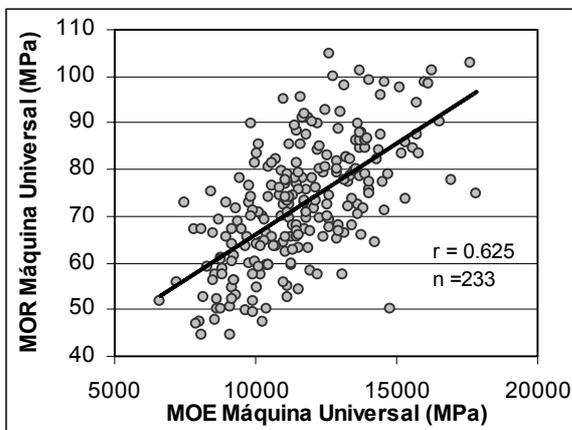


Gráfico N° 43: Relación entre el MOE y el MOR en probetas clear

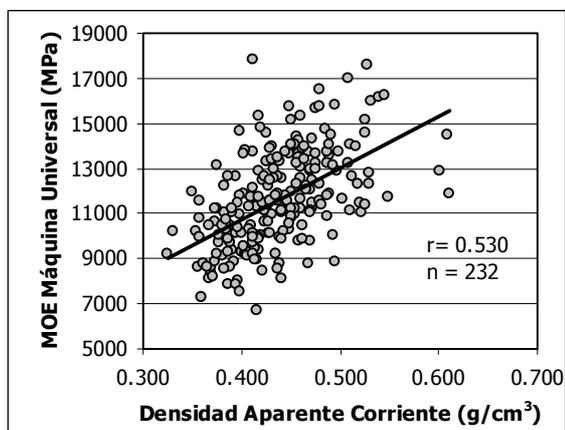


Gráfico N° 44: Relación entre la Densidad Corriente y el MOE de las probetas clear

Si correlacionamos la densidad corriente y el MOR vemos un valor $r = 0,721$ mayor que el obtenido con el MOE, $r = 0,530$.

La correlación entre el MOR y la dureza radial fue buena y algo más baja con la dureza tangencial. ($r = 0,522$ y $r = 0,489$ respectivamente). Ver gráficos N° 45 y 46. Estas menores correlaciones pueden explicarse porque la determinación de la dureza se realiza en un punto determinado, no contemplando la totalidad de la madera de la probeta, y para el cálculo de la densidad si se toma una sección de toda la probeta.

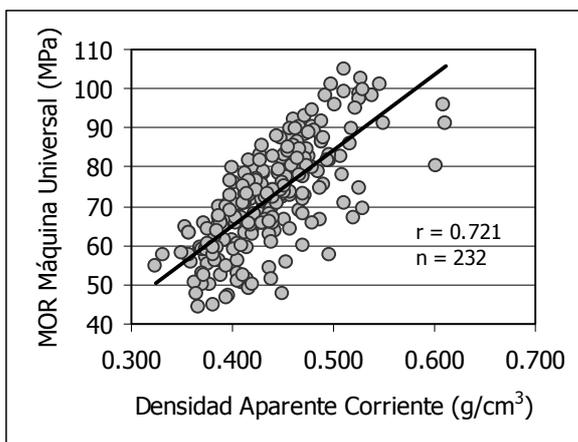


Gráfico N° 45: Relación entre la Densidad Corriente y el MOR en probetas clear

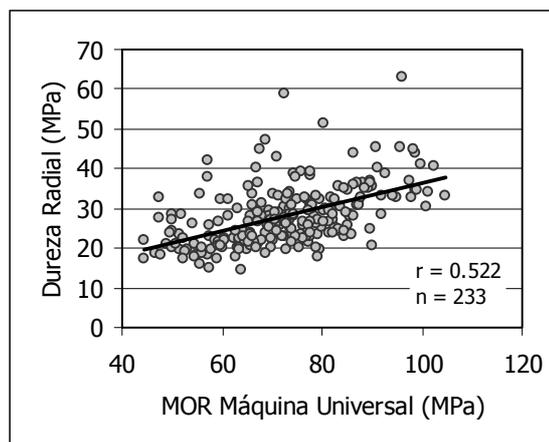


Gráfico N° 46: Relación entre la Dureza Radial y el MOR en probetas clear

Existe una buena relación entre las durezas tangenciales y radiales entre sí y también con la densidad corriente, aunque sería de esperar que ésta fuese mayor ya que en general la densidad está muy relacionada con la dureza. También se observa en este trabajo, al igual que en otros de este Grupo Técnico, que los valores de la dureza tangencial son siempre mayores que los de la dureza radial. (Gráficos N° 47, 48 y 49).

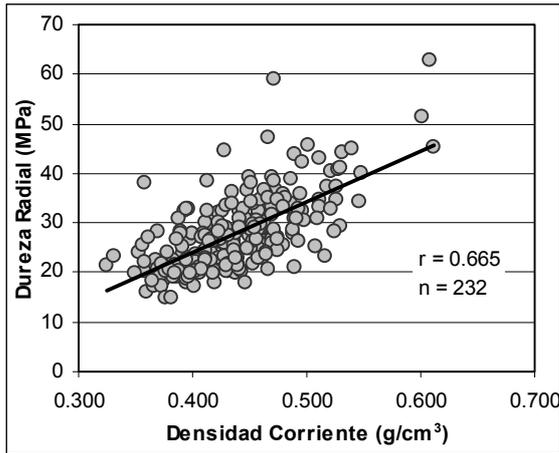


Gráfico N° 47: Relación entre la Dureza Radial y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear

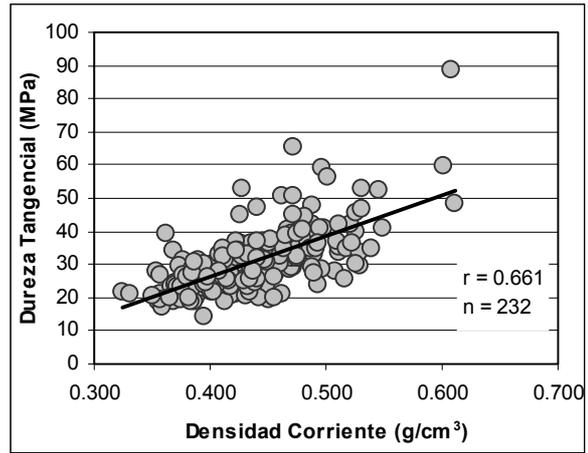


Gráfico N° 48: Relación entre la Dureza Tangencial y la Densidad Aparente Corriente en las probetas clear

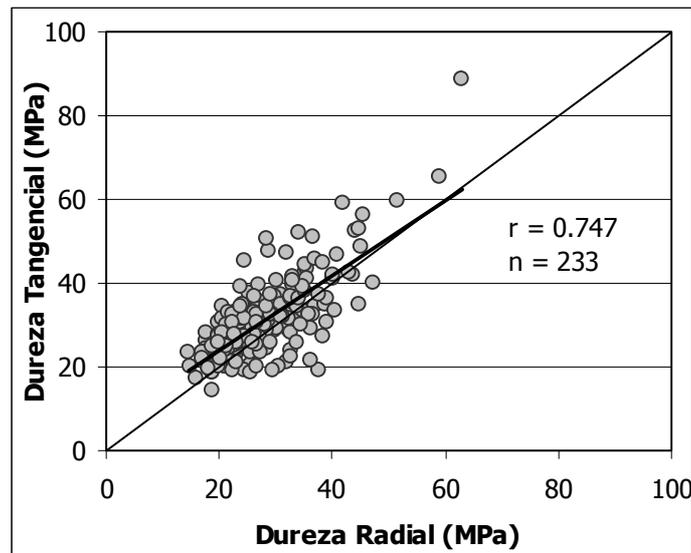


Gráfico N°49: Relación entre la Dureza Tangencial y la Dureza Radial en probetas clear

Como hemos visto en las gráficas anteriores y en el cuadro N° 27 no todas las propiedades tienen cierta correlación entre sí. Las propiedades que si la tienen son el MOE y el MOR, el MOE y el MOR con la densidad corriente, el MOR con la dureza radial, las durezas entre sí y éstas con la densidad corriente.

Cuadro N° 27: Relaciones entre las distintas propiedades efectuadas con el coeficiente de correlación lineal.

	MOE	MOR	Resist. al Impacto	Dureza Radial	Dureza Tangencial	Densidad Corriente
MOE	1	0,625	0,352	0,302	0,323	0,530
MOR		1	0,361	0,522	0,489	0,721
Resist. al Impacto			1	0,294	0,291	0,237
Dureza Radial				1	0,747	0,665
Dureza Tangencial					1	0,661
Dens Ap. Corriente						1

6.3.7 Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos

Se analizó la relación entre las pequeñas probetas libres de defectos, o probetas clear y las tablas para todas las ubicaciones (BA, B y C), recordemos que se eliminó en el aserrado la médula y por consiguiente su influencia en los valores de resistencia.

Cuadro N° 28: Relación entre las propiedades mecánicas de tablas y las probetas libres de defectos

	PROBETAS CLEAR		TABLAS TAMAÑO REAL	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE(MPa)	MOR (MPa)
Número	233	233	231	231
Promedio	11628	72,5	11764	50,3
Máximo	17812	104,7	21267	79,6
Mínimo	6635	44,3	7415	15,4
Desv. Est.	2217	17	2202	19
CV (%)	19,1	23,1	18,7	38,2

La correlación entre el MOE de las tablas y el MOE de las probetas clear fue de $r = 0,441$, la que podemos considerar de mediana a baja (Gráfico N° 50). Si tenemos en cuenta esto podemos decir que el MOE en este caso es una propiedad influenciada por las características de la madera. Sin embargo si analizamos los valores promedio de las 233 probetas ensayadas, vemos que el valor medio para las tablas fue de 11628 MPa y el de las probetas libres de defectos es de 11764 MPa, o sea un 1,2% superior. Para el MOR no se observó correlación entre los valores encontrados en tablas y en los valores de las pequeñas probetas obtenidas de éstas (Gráfico N° 51, $r = 0,351$). Esto se debe principalmente a que el MOR es influenciado en forma negativa por la presencia de defectos de las tablas, como los nudos, grano inclinado, etc. Como se puede ver en el cuadro N° 28, el promedio del MOR para las tablas de tamaño real fue de 50,3 MPa, para las probetas libres de defectos fue de 72,5 MPa, por lo que encontramos una diferencia porcentual de 44 % superior en las probetas clear.

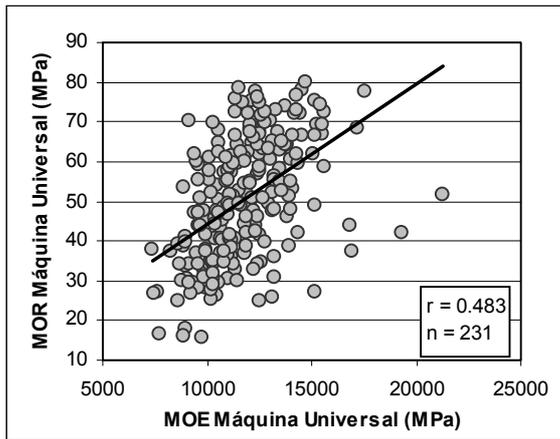


Gráfico N° 50: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

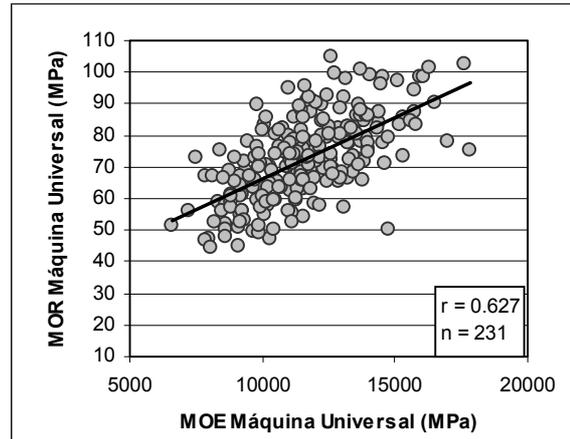


Gráfico N° 51: Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

En las gráficas N° 50 y 51 vemos la relación entre el MOR y el MOE de las tablas ensayadas en tamaño real ($r = 0,483$) y la relación entre el MOE y el MOR de las probetas clear ($r = 0,627$) esta última la hemos mostrado en el numeral anterior, pero a modo de comparación la incluimos ahora.

Comparando estas dos gráficas observamos además que las probetas clear tienen una mejor correlación entre sí (sin la influencia de los defectos), vemos la diferencia en la dispersión y en que zona se agrupan los valores de las propiedades.

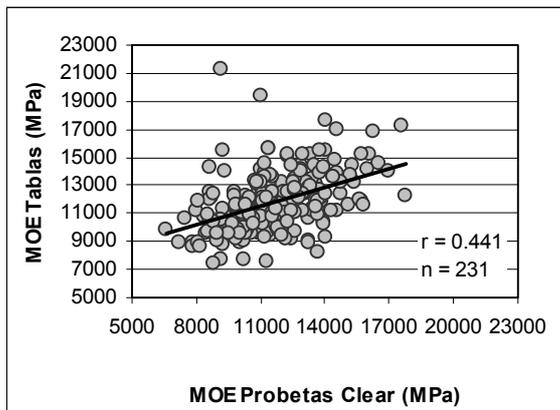


Gráfico N° 52: Relación entre el MOR y el MOE en tablas de 2" X 6"

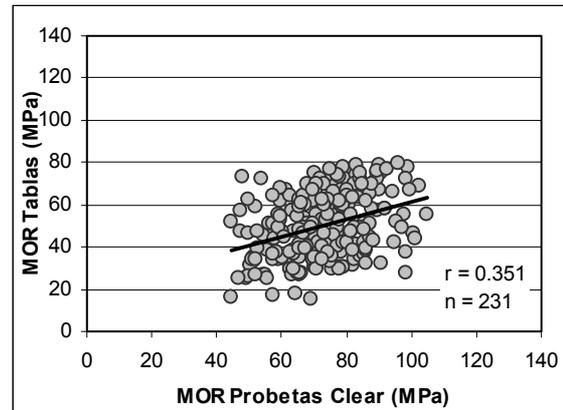


Gráfico N° 53: Relación del MOR y el MOE en probetas clear

6.3.8 Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas de tamaño real y probetas libres de defectos

Analizamos en este capítulo los coeficientes de variación de las distintas propiedades físicas y mecánicas de los ensayos realizados en trozas, tablas de tamaño real y en pequeñas probetas libres de defectos. Cuadros N° 29, 30 y 31.

Cuadro N° 29: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas en condición verde

Propiedad	Coeficiente de Variación (%)
Módulo de Elasticidad (No Destructivo)	10,3
Contenido de Humedad	23,1
Densidad Aparente Básica	9,1

Como podemos observar el coeficiente de variación en el contenido de humedad es alto debido a la gran variación que se presenta dentro de un mismo árbol, y también dentro de los árboles muestreados.

Cuadro N° 30: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a 10,9 % de Contenido de Humedad promedio

Propiedad	Coeficiente de Variación (%)
Módulo de Elasticidad (No Destructivo)	14,3
Módulo de Elasticidad (Destructivo)	17,2
Módulo de Rotura (Destructivo)	29,1
Contenido de Humedad	4,4
Densidad Ap. Corriente	9,8

El alto porcentaje del coeficiente de variación que observamos en el módulo de rotura nos muestra la gran influencia que ejerce en esta propiedad la presencia de nudos, grietas y otros defectos en las tablas de tamaño real.

Cuadro N° 31: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas libres de defectos a 11,5 % de Contenido de Humedad promedio

Propiedad	Coeficiente de Variación (%)
Módulo de Elasticidad (Destructivo)	18,0
Módulo de Rotura (Destructivo)	18,0
Resistencia al Impacto (Destructivo)	47,8
Dureza Radial (Destructivo)	27,1
Dureza Tangencial (Destructivo)	29,4
Dureza Transversal (Destructivo)	15,5
Contenido de Humedad	3,1
Densidad Ap. Corriente	11,2

En el cuadro anterior volvemos a comprobar la influencia que tienen en el módulo de rotura la ausencia de defectos en las pequeñas probetas en que el coeficiente de variación disminuye sensiblemente con respecto al coeficiente de variación de las tablas de tamaño real.

Los altos coeficientes de variación de las propiedades tales como la resistencia al impacto y las durezas radiales y tangenciales dependen mucho de la propia variación que se presenta en la madera.

Vimos anteriormente que el contenido de humedad tiene una gran variación en las trozas, esta disminuye sensiblemente tanto en tablas de tamaño real (secas en horno) como en las pequeñas probetas (acondicionadas en cámara climatizada).

7. BIBLIOGRAFÍA

1. TUSET, R. ; DURÁN, F./ Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización, Editorial Hemisferio Sur, 1986.
2. CORONEL, E./ Fundamento de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994.
3. OHTA, S; WATANABE, H./ Mechanical Properties of juvenile wood in the stem of Hinoki (*Chamaecyparis obtuse*), Japan Wood Research Society, 1968. 14(5).
4. NAGAO, H; NAKAI, T; TANAKA,T./ Non destructive evaluation of bending and tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber, Eight International Nondestructive Testing of Wood Symposium, Proceedings, Washington State Univ, and USDA Forest Products Lab., 1991.
5. PEREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA S./ Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos, Informe de Investigación No 1, LATU-JICA, 2000.
6. PEREZ DEL CASTILLO A./ Propiedades Mecánicas y Calidad de Madera de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay, Informe de Investigación No4, JICA-LATU, 2001
7. O´NEILL, H/ Propiedades mecánicas de *Pinus taeda*, Métodos destructivos y no destructivos, Expoforesta, Pag 15 a 24, 2000.
8. OLASO MARI, E.; Tesis para título de Ingeniero Agrónomo, sobre "Estudio de la variación en las propiedades Físicas y Mecánicas de *E. grandis* (HILL) ex Maiden del Uruguay", 2002.
9. PEREZ DEL CASTILLO, A.; VENTURINO CAMAROTA, A.; "Resumen de propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pino elliottii* y *Pinus taeda* de distintas zonas del Uruguay" Informe de Investigación No 14, LATU-JICA, 2003.
10. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto "GT2"/ Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del Norte de Uruguay, 2004.

FICHA TÉCNICA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICASEspecie : *Eucalyptus grandis* MaidenEnsayos realizados en 25 árboles de 18 años de edad
Localidad de origen: Batoví Dorado, Rivera**Propiedades Físicas**

Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Densidad Aparente Básica	ASTM D 2395 Method B-III	g/cm ³	0,402
Densidad Aparente Corriente	ASTM D 2395 Method A	g/cm ³	0,442

Propiedades MecánicasNo destructiva en trozas verdes sin corteza de 4 m de longitud (valores promedio de 1^{ras}, 2^{das} y 3^{ras} trozas)

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	12735	Kgf/cm ²	129861

En tablas dimensionadas (2,8m X 150 mm X 50 mm) n= 233 Posición radial BA, B y C. Cont. de Humedad = 10,9 %

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	13467	Kgf/cm ²	137326
Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)	ASTM D 198 - 98	MPa	11764	Kgf/cm ²	119960
Módulo de Rotura (Máquina Universal)	ASTM D 198 - 98	MPa	50,3	Kgf/cm ²	513

En pequeñas probetas libres de defectos. Cont. de Humedad = 11,5%

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	11628	Kgf/cm ²	118573
Módulo de Rotura (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	72,5	Kgf/cm ²	739
Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)	JIS Z 2116 - 94	J/cm ²	5,1	Kgf.m/cm ²	0,52
Dureza Janka Radial	ASTM D 143 - 94 Hardness	MPa	27,9	Kgf	285
Dureza Janka Tangencial	ASTM D 143 - 94 Hardness	MPa	31,0	Kgf	316
Dureza Janka Transversal	ASTM D 143 - 94 Hardness	MPa	47,7	Kgf	486

Tabla de Conversión de Unidades

DE:	A:	Factor:
Pascal (Pa)	Kgf/cm ²	1,0197 E-05
Mega Pascal (MPa)	Kgf/cm ²	10,1972
Joule (J)	Kgf.m/cm ²	0,1020
Newton (N)	Kgf	0,1020
g/cm ³	Lbs/ft ³	62,4280
Pascal (Pa)	lbs/in ² (psi)	1,450E-04
Mega Pascal (MPa)	lbs/in ² (psi)	1,450E+02

Solo para Dureza Janka

Mega Pascal (MPa)	KN	0,1000
Mega Pascal (MPa)	Kgf	10,1972

Índice de Figuras, Cuadros y Gráficos

Figuras	Página
Nº 1: Muestreo y distribución de las trozas _____	2
Nº 2: Orden en la realización de los trabajos _____	3
Nº 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas _____	4
Nº 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie ____	5
Nº 5: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer _____	6
Nº 6: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones BA-B-C en las trozas	7
Nº 7: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6") _____	7
Nº 8: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer _____	8
Nº 9: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal _____	9
Nº 10: Esquema y ensayo de Flexión Estática en 3 puntos en máquina universal _____	11
Nº 11: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica) _____	12
Nº 12: Ensayo de Dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio _____	12

Cuadros	Página
Nº 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados _____	2
Nº 2: Datos técnicos del rodal _____	2
Nº 3: Raleos realizadas _____	3
Nº 4: Grados de clasificación de las trozas _____	3
Nº 5: Porcentaje de trozas según el grado a la que pertenecen _____	13
Nº 6: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica _____	14
Nº 7: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio _____	14
Nº 8: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en altura _____	15
Nº 9: MOE sin corteza (FFT Analyzer) según troza _____	17
Nº 10: Resumen de las propiedades mecánicas en tablas secas (BA, B y C) _____	18
Nº 11: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1º y 2º troza _____	19
Nº 12: Valores promedio para el MOE y MOR según ubicación en el radio _____	21
Nº 13: Valores promedio para el MOE obtenido con FFT Analyzer según ubicación en el radio _____	21
Nº 14: Valores promedio para el MOE y MOR según ubicación en la altura _____	23
Nº 15: Valores promedio para el MOE obtenidos con FFT Analyzer según ubicación en la altura ____	23
Nº 16: Porcentaje de tablas según categoría JAS _____	26
Nº 17: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS _____	26
Nº 18: Porcentaje de tablas por ubicación en la altura y en el radio aptas para uso estructural según norma JAS _____	27
Nº 19: Resumen de las propiedades mecánicas del MOE y el MOR de pequeñas probetas libres de defectos _____	28
Nº 20: Resumen de las propiedades mecánicas Flexión Dinámica y Dureza Janka de pequeñas probetas libres de defectos _____	29
Nº 21: Propiedades mecánicas MOE y MOR según ubicación en el radio _____	29
Nº 22: Resistencia al Impacto según la ubicación en el radio _____	29
Nº 23: Dureza Janka según ubicación en el radio _____	30
Nº 24: Propiedades mecánicas MOE y MOR según su ubicación en altura _____	31
Nº 25: Resistencia al Impacto según su ubicación en la altura _____	32
Nº 26: Dureza Janka según la ubicación en altura _____	32
Nº 27: Relación entre las distintas propiedades _____	39
Nº 28: Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y las pequeñas probetas libres de defectos _____	38
Nº 29: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas en condición verde	41
Nº 30: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a	

11,3 % CH. promedio _____	41
Nº 31: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas libres de defectos a 11,6 % CH. promedio _____	42

Gráficos	Página
Nº 1: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación radial _____	14
Nº 2: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio _____	15
Nº 3: Densidad Básica por altura según ubicación en el radio _____	15
Nº 4: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura _____	15
Nº 5: Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura _____	16
Nº 6: Densidad Básica por probeta según ubicación en altura _____	16
Nº 7: Variación de los valores de MOE entre árboles _____	17
Nº 8: Relación entre el MOE y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) _____	17
Nº 9: Relación entre el MOE FFT Analyzer y la Densidad Aparente Básica (Condición verde) _____	17
Nº 10: Relación entre la densidad aparente básica y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) _____	18
Nº 11: Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer) _____	19
Nº 12: Relación entre el MOE y el MOR _____	20
Nº 13: Relación entre la Densidad Ap. Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal) _____	20
Nº 14: Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo de Rotura (Máquina Universal) _____	21
Nº 15: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio _____	22
Nº 16: MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	22
Nº 17: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	22
Nº 18: MOE y MOR según ubicación en altura _____	23
Nº 19: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	24
Nº 20: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	24
Nº 21: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas _____	24
Nº 22: Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "BA", "B" y "C" _____	25
Nº 23: Porcentaje de tablas ensayadas según categoría JAS _____	27
Nº 24: Porcentaje de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS _____	27
Nº 25: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio _____	30
Nº 26: Resistencia al Impacto según ubicación en el radio _____	30
Nº 27: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio _____	31
Nº 28: MOE y MOR promedio según ubicación en altura _____	32
Nº 29: Resistencia al Impacto según ubicación en altura _____	33
Nº 30: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en la altura _____	33
Nº 31: MOE promedio por altura según ubicación en el radio _____	34
Nº 32: MOR promedio por altura según ubicación en el radio _____	34
Nº 33: Densidad Aparente Corriente por altura según ubicación en el radio _____	34
Nº 34: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio _____	34
Nº 35: Dureza radial promedio por altura según ubicación en el radio _____	35
Nº 36: Dureza tangencial promedio por altura según ubicación en el radio _____	35
Nº 37: MOE promedio por ubicación en el radio según altura _____	36
Nº 38: MOR promedio por ubicación en el radio según altura _____	36
Nº 39: Densidad Aparente Corriente por ubicación en el radio según altura _____	36
Nº 40: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura _____	36
Nº 41: Dureza radial por ubicación en el radio según altura _____	36
Nº 42: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura _____	36
Nº 43: Relación entre el MOE y el MOR en probetas clear _____	37
Nº 44: Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el MOE en probetas clear _____	37
Nº 45: Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el MOR en probetas clear _____	37
Nº 46: Relación entre la Dureza Tangencial y el MOR en probetas clear _____	37
Nº 47: Relación entre la Dureza Radial y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear _____	38
Nº 48: Relación entre la Dureza Tangencial y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear _____	38
Nº 49: Relación entre la Dureza Tangencial y la Radial en probetas clear _____	38
Nº 50: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas _____	40

N° 51: Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas	40
N° 52: Relación entre el MOR y el MOE en tablas de 2" x 6"	40
N° 53: Relación entre el MOR y el MOE en probetas clear	40



Dirección General Forestal M.G.A.P.



Sociedad de Productores Forestales



Asociación de Industriales de la Madera



Facultad de Agronomía



INIA - Programa Nacional Forestal



LATU - Departamento de Proyectos Forestales