

# PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Eucalyptus grandis* Maiden DEL CENTRO DEL URUGUAY



## Informe N° 6

### 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

**Setiembre 2006**

## Organización del Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto

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

<b>Equipo de trabajo técnico</b>
Per. Agr. Hugo O'Neill
Tec. Agr. Felipe Tarigo
Sra. Patricia Cardenas (Tesisista Fac. Agronomía)
Sra. Carolina Olivera (Tesisista Fac. Agronomía)
Sr. Javier Tarigo (Tesisista Fac. Agronomía)
Sr. Gonzalo García (Tesisista Fac. Agronomía)

### Agradecimientos

Al Sr. Omar M. Urioste por el apoyo en el material que hizo posible la realización de este estudio.

# PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Eucalyptus grandis* Maiden DEL CENTRO DE URUGUAY

	Página
1. <b>INTRODUCCIÓN</b>	1
2. <b>MATERIALES</b>	1
2.1 <u>Muestreo y clases diamétricas de los árboles</u>	1
2.2 <u>Características de los rodales muestreados</u>	2
2.2.1 <u>Datos técnicos del rodal</u>	2
2.2.2 <u>Tratamientos silviculturales (podas y raleos)</u>	3
3. <b>ENSAYOS EN ÁRBOLES EN PIE</b>	3
4. <b>ENSAYOS EN LAS TROZAS</b>	4
4.1 <u>Clasificación visual de trozas</u>	4
4.2 <u>Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Básica</u>	5
4.3 <u>Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer</u>	6
4.4 <u>Aserrado de trozas para obtención de las tablas ( 2"X 6")</u>	7
5. <b>ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2" X 6"</b>	8
5.1 <u>Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas verdes de 2"x 6" por métodos de ensayo no destructivos</u>	9
5.2 <u>Secado de las tablas en horno industrial</u>	9
5.3 <u>Redimensionado de las tablas e inspección visual</u>	9
5.4 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2"x 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer</u>	9
5.5 <u>Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en ensayo de flexión (máquina universal) sobre tablas de 2" x 6"</u>	10
5.6 <u>Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Corriente de tablas ensayadas</u>	11
6. <b>ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS</b>	12
6.1 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)</u>	12
6.2 <u>Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica</u>	13
6.3 <u>Determinación de la Dureza JANKA</u>	13
6.4 <u>Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Aparente Corriente</u>	13
7. <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	14
7.1 <u>Ensayos no destructivos en árboles en pie, estimación del Módulo de Elasticidad</u>	14
7.2 <u>Estudios realizados sobre trozas en estado verde</u>	15

7.2.1	Clasificación visual	15
7.2.2	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica	15
7.2.3	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio	15
7.2.3.1	Análisis por altura según ubicación en el radio	16
7.2.4	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura	17
7.2.4.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	18
7.2.5	Módulo de Elasticidad de las trozas	18
7.3	<u>Estudios no destructivo realizados en tablas verdes (2"x 6")</u>	21
7.3.1	Resumen de las propiedades mecánicas en tablas en estado verde de 2"x 6"	21
7.4	<u>Estudios realizados en tablas secas (2"x 6")</u>	21
7.4.1	Resumen de las propiedades mecánicas en tablas 2"x 6"	21
7.4.2	Relación entre los diferentes métodos para la determinación del Módulo de Elasticidad	23
7.4.3	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y las propiedades mecánicas	24
7.4.4	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio	25
7.4.4.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	26
7.4.5	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en altura	27
7.4.5.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	27
7.4.6	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de sus tablas	28
7.4.7	Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural	29
7.4.8	Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS	30
7.5	<u>Ensayos en tablas obtenidas de la zona ensayada en los árboles en pie</u>	32
7.5.1	Módulo de Elasticidad de tablas obtenidas en la zona ensayada en los árboles en pie	32
7.5.2	Relación entre el Módulo de Elasticidad de árboles en pie y el Módulo de Elasticidad de tablas verdes en ensayo de flexión en Máquina Universal	32
7.5.3	Relación entre el Módulo de Elasticidad de árboles en pie y el Módulo de Elasticidad de tablas secas en ensayo de flexión en Máquina Universal	34
7.6	<u>Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos</u>	35
7.6.1	Resumen de las propiedades mecánicas	35
7.6.2	Variación de las propiedades mecánicas según la ubicación en el radio	35
7.6.3	Variación de las propiedades mecánicas en la altura	38
7.6.4	Análisis de las propiedades mecánicas por altura según la ubicación en el radio	40
7.6.5	Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según la altura	41
7.7	<u>Relación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas</u>	43
7.8	<u>Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos</u>	46
7.9	<u>Coefficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas de Tamaño real y pequeñas probetas libres de defectos</u>	48
8	<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>	49
	Ficha Técnica de Propiedades Físicas y Mecánicas de <i>Eucalyptus grandis</i> Maiden del Centro del Uruguay	51
	Índice de Figuras y Cuadros	52
	Índice de Gráficos	53

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Eucalyptus grandis* Maiden DEL CENTRO DE URUGUAY

### RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* Maiden, de veintiséis años de edad del departamento de Durazno, en el centro 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 de 2"x 6" (50 mm x 150 mm x 2800 mm) 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, no destructivo, módulo de rotura, densidad.

### SUMMARY

In this report, mechanical properties of *Eucalyptus grandis* Maiden. 26 years old from Durazno department plantation were studied.

Logs from 3 heights were visually graded and the basic density, moisture content and elastic modulus were measured.

Non destructive modulus of elasticity was evaluated on 2"x 6" kiln dry boards. From the same boards modulus of rupture was measured by static bending method.

Moreover small clear specimens were obtained from the boards. Physical & mechanical properties were measured along the radial direction (variation from pith to bark) and along tree height.

Key words: *Eucalyptus grandis* Maiden, modulus of elasticity, non destructive, modulus of rupture, density.

## 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* Maiden., *Pinus elliotii* 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 implantadas para la obtención de madera de buena calidad. Esta publicación pretende colaborar en el conocimiento del comportamiento de la especie *Eucalyptus grandis* Maiden implantada en el Uruguay, que en la actualidad ocupa un área de aproximadamente 160.000 hectáreas. En este caso analizaremos 30 árboles de 26 años de edad de un rodal del centro de nuestro país, más precisamente del departamento de Durazno.

## 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 (N° 10) se realizó en noviembre del 2002.

Dentro de este rodal, se seleccionaron 30 árboles divididos en tres clases diamétricas (9, 13 y 8 por clase) ver Cuadro N° 1. 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 (22 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 30) y la segunda el número de troza (1ra., 2da. y 3ra. troza), ejemplo la troza 5-2 es la 2da. troza del árbol 5.

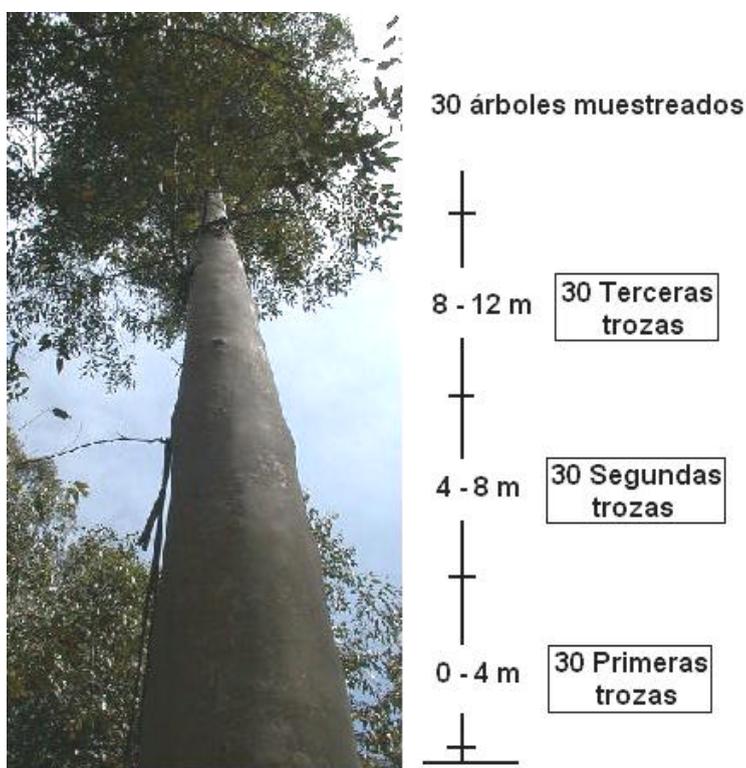


Figura N° 1: Muestreo y distribución de las trozas.

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 = 22 cm	1° rama viva
1	41 – 48	9	45	36	27	21
2	49 – 53	13	52	38	28	20
3	53 - 64	8	56	37	29	15

## 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	Blanquillo / Durazno
Año de Plantación	1976
Origen de la semilla	Concordia Rep. Argentina
Densidad de plantación ( árboles / hectárea )	1111
Tipo de suelos C.O.N.E.A.T.	8,8

### 2.2.2 Tratamientos silviculturales (podas y raleos)

En el rodal muestreado no se realizaron podas.

Cuadro N° 3: Raleos realizados.

Raleos		
Número	Edad (años)	Densidad remanente (árb./ha)
1	22	250

## 3. ENSAYOS EN ÁRBOLES EN PIE

De los 30 árboles seleccionados para este muestreo, se realizaron ensayos no destructivos sobre 18 árboles. Se estimó el módulo de elasticidad (MOE) de árboles en pie midiendo la propagación de una onda o ultrasonido inducido en tiempo y distancia entre un emisor y un receptor. Los equipos no destructivos portátiles utilizados fueron el Fakopp de origen Húngaro y el Sylvatest de origen Suizo.



Figuras N° 2 y 3: Estimación del Módulo de Elasticidad en árboles en pie, equipos Fakopp y Sylvatest

Después de apeados los árboles fueron transportados al Departamento de Proyectos Forestales del LATU en forma de trozas. A la totalidad de las trozas (90) se les realizó ensayos no destructivos para estimar el módulo de elasticidad. También se estimó el módulo de elasticidad de las vigas o tablas verdes y secas provenientes de las 18 trozas basales de los árboles ensayados en pie, los equipos no destructivos utilizados fueron el Fakopp, el Sylvatest y el FFT Analyzer. Una vez culminados los ensayos no destructivos en las vigas secas, se les realizó el ensayo de flexión estática en máquina universal, determinando el módulo de elasticidad, ensayo que utilizamos como método de referencia para los ensayos no destructivos. En los numerales 5.1 y 7.1 se presentarán la descripción de los ensayos y los valores promedio, los coeficientes de variación, las correlaciones entre los diferentes ensayos no destructivos y el ensayo de referencia en máquina universal.

#### 4. ENSAYOS EN LAS TROZAS

Sobre las 90 trozas verdes muestreadas se realizaron en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU los ensayos que se comentan seguidamente:



Figura N° 4: Orden en la realización de los trabajos en las trozas.

##### 4.1 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. Dicha clasificación quizás no sea reproducible en la práctica de un aserradero pero si lo es a los efectos de los trabajos realizados dentro del Grupo de Madera Aserrada. Los distintos grados se muestran a continuación:

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

- Grado I: <b>Troza derecha, sin nudos ni otros defectos, baja conicidad.</b>
- Grado II: <b>Troza levemente torcida, con nudos pequeños (poca cantidad) y conicidad media</b>
- Grado III: <b>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.</b>
- Grado IV: <b>Troza con severos defectos.</b>

#### 4.2 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 (Ver figura N° 5).

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 la 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, vemos en la figura N° 6 las distintas proporciones de madera juvenil, madera adulta, duramen y de albura en eucaliptos de plantaciones jóvenes.

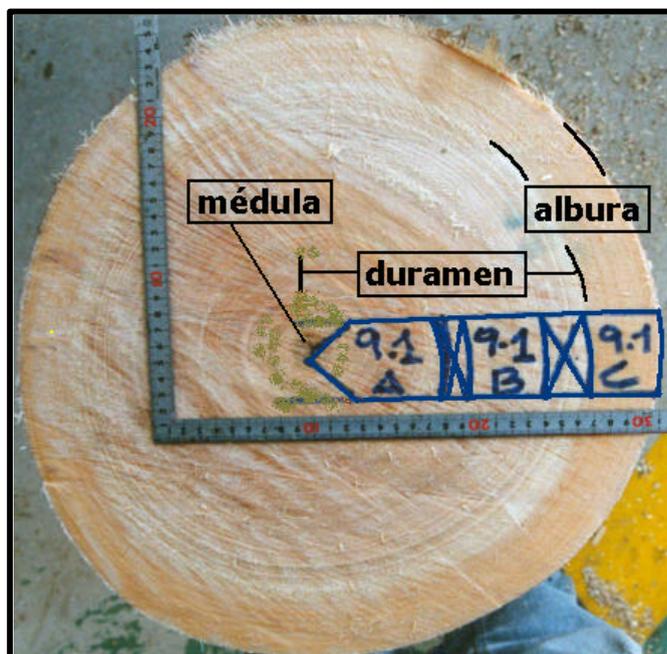


Figura N° 5: Esquema de preparación e identificación de las probetas.

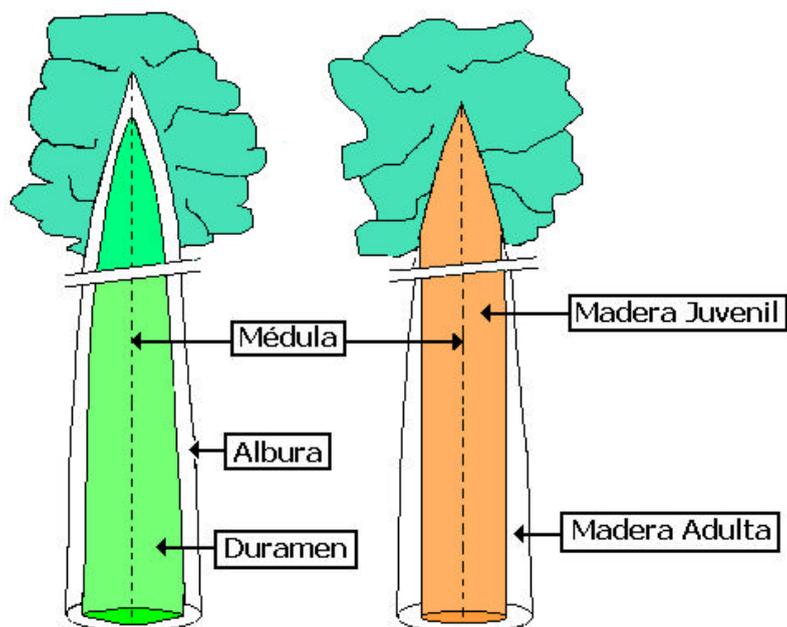


Figura N° 6: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie.

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  $103 \pm 2 \text{ } ^\circ \text{C}$  hasta llegar a estado anhidro (peso constante o 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

#### 4.3 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 equipo 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
$n$	: n° de nodo = 1
$\rho$	: Densidad (troza verde, en ensayo)

Finalizado el ensayo de las trozas, se procedió a descortezar y ensayar nuevamente a alguna de ellas, de forma de estimar los valores del MOE sin corteza y poder correlacionarlos con los valores de MOE con corteza.

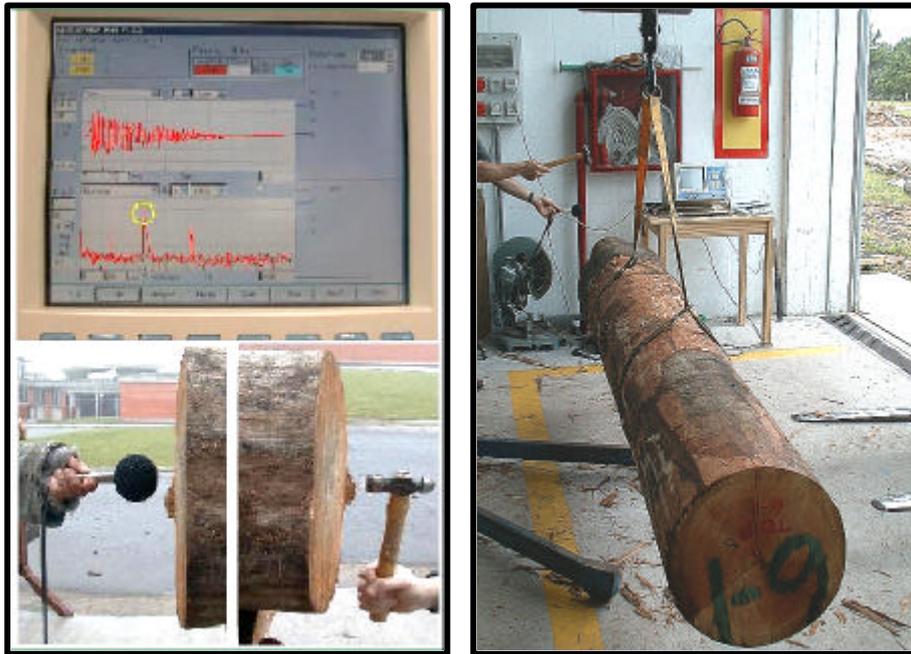


Figura N° 7: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer

#### 4.4 Aserrado de las trozas para obtención de las tablas (2"X 6")

Las trozas fueron aserradas en el Sector Productos 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. (ver la siguiente figura N° 8).

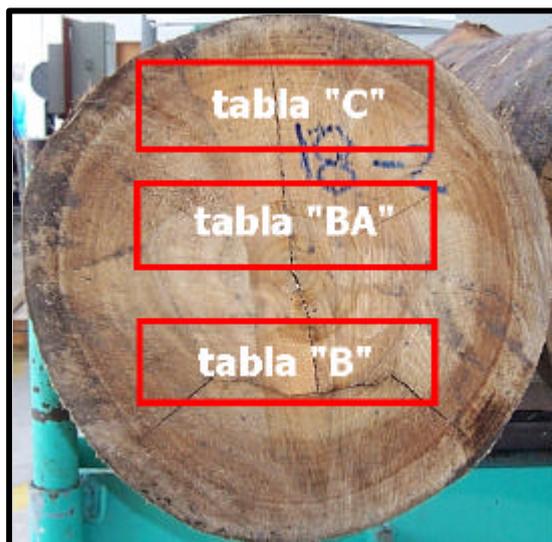


Figura N° 8: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones BA -B-C en las trozas.



Figura N° 9 : Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6")

## 5. 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:

- Determinación del módulo de elasticidad en tablas verdes (FFT Analyzer, método no destructivo)
- Secado de las tablas en horno industrial
- Dimensionado, escuadrado y cepillado 2"x 6" (50 mm x 150 mm x 2800 mm)
- Inspección visual: Nudos (presencia, ubicación y tamaño), grietas y alabeos
- Determinación del módulo de elasticidad en tablas secas (FFT Analyzer)

- Determinación del módulo de elasticidad y Módulo de Rotura (Máquina Universal)
- Determinación del Contenido de Humedad de las tablas ensayadas
- Determinación de la Densidad Corriente de las tablas ensayadas

### **5.1 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas verdes de 2" x 6" por métodos de ensayo no destructivos**

De un total de 30 árboles seleccionados para este trabajo, se ensayaron 18 árboles en pie y de las trozas basales obtenidas de estos 18 árboles se aserraron 159 tablas o vigas de 2"x 6". Inmediatamente después del aserrado a la totalidad de las tablas verdes obtenidas se les determinó el módulo de elasticidad (MOE) no destructivo mediante el equipo FFT Analyzer y a 18 de las tablas obtenidas de las zonas ensayadas de los árboles en pie (trozas basales) se les determinó también el MOE con los equipos de ensayos no destructivos Fakopp y Sylvatest.

### **5.2 Secado de las tablas en horno industrial**

El secado de las tablas se realizó en su totalidad en horno de secado convencional. El contenido de humedad final promedio de las tablas fue de 11,7 %. Luego del secado se controló el contenido de humedad mediante un xilohigrómetro de resistencia y se comprobó dicho contenido de humedad (estufa y peso constante) 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.

### **5.3 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).

### **5.4 Estimación 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 estimación 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:

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

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



Figura N° 10: Estimación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer.

### 5.5 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 de Ensayos, marca 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. (Ver figura N° 11)

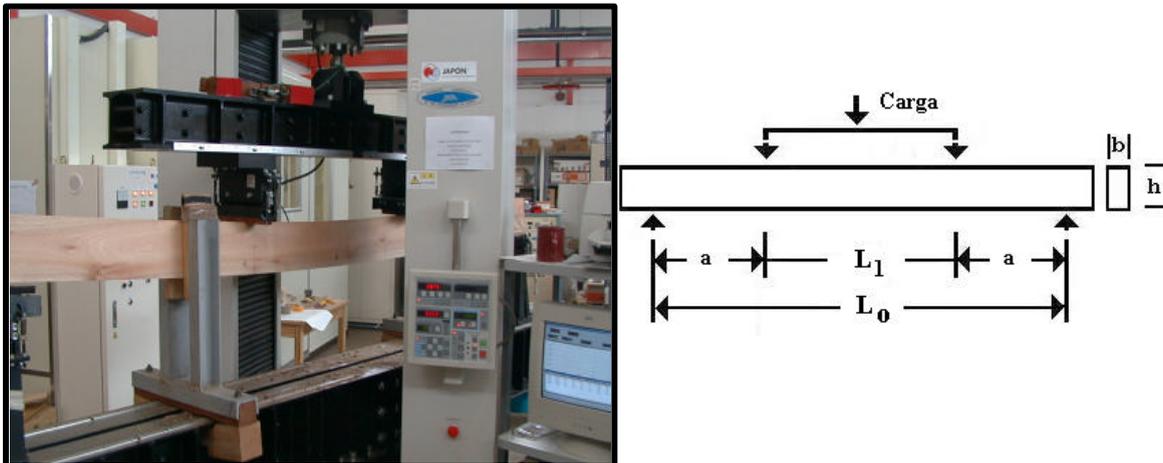


Figura N° 11: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal.

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<sub>0</sub>**: Distancia entre apoyos inferiores (span)  
**L<sub>1</sub>**: 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 fotografian las tablas de forma de tener un registro de la forma y el lugar en que se produjo la rotura.

## 5.6 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 transversalmente 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 ± 2° 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:

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

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

**D<sub>corriente</sub>**: Densidad aparente corriente  
**V<sub>corriente</sub>**: Volumen  
**P<sub>Anh</sub>**: Peso anhidro  
**P<sub>corriente</sub>**: 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 11,7 % CH promedio para las tablas y a 11,6% CH promedio para las pequeñas probetas libres de defectos.

## 6 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

### 6.1 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 de Ensayos, marca 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. (Ver figura N° 12)

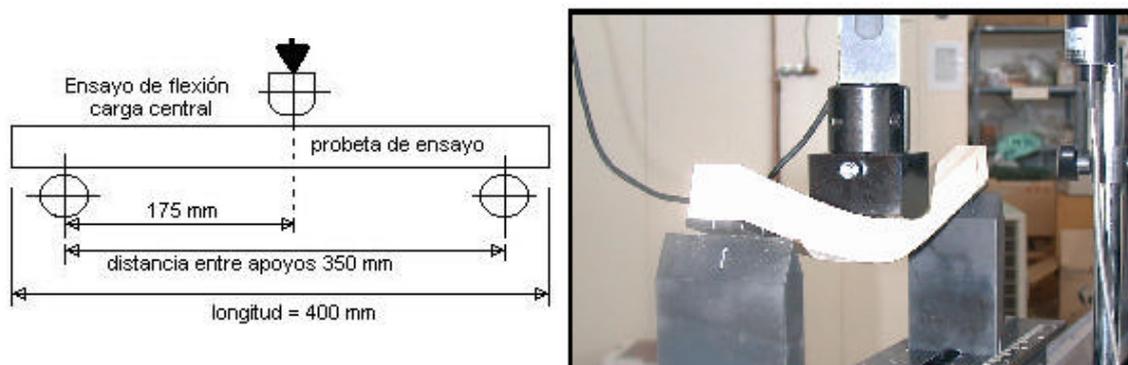


Figura N° 12: Esquema y ensayo de flexión estática en 3 puntos en máquina universal

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:

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

**$\Delta P$**  : 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  
 **$\Delta y$**  : 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

## 6.2 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 formula:

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

**RI** : Resistencia al Impacto (J/cm<sup>2</sup>)  
**E** : Energía absorbida ( J )  
**b** : Ancho de la probeta (cm)  
**h** : Altura de la probeta (cm)

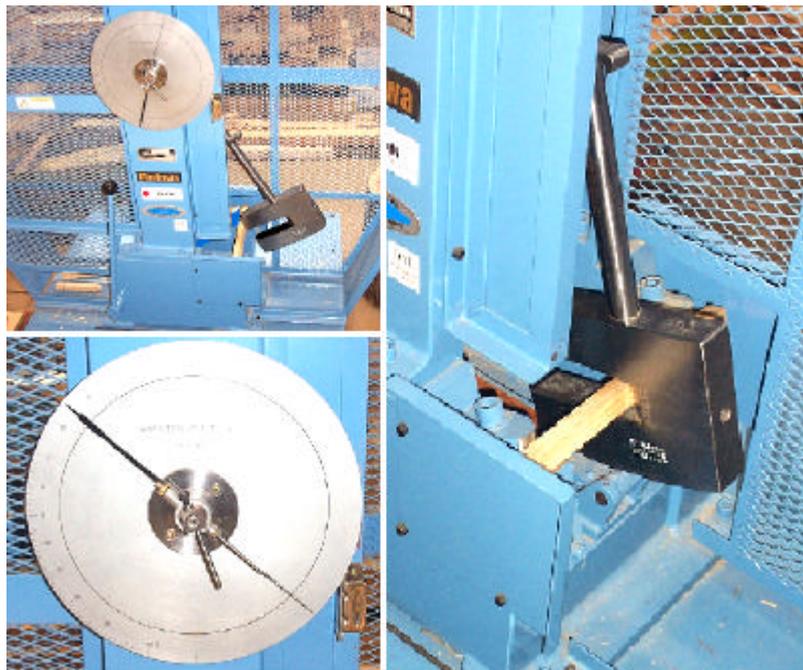


Figura N° 13: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)

## 6.3 Determinación de la Dureza JANKA

El ensayo de resistencia a la 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. (Ver Figura N° 14)

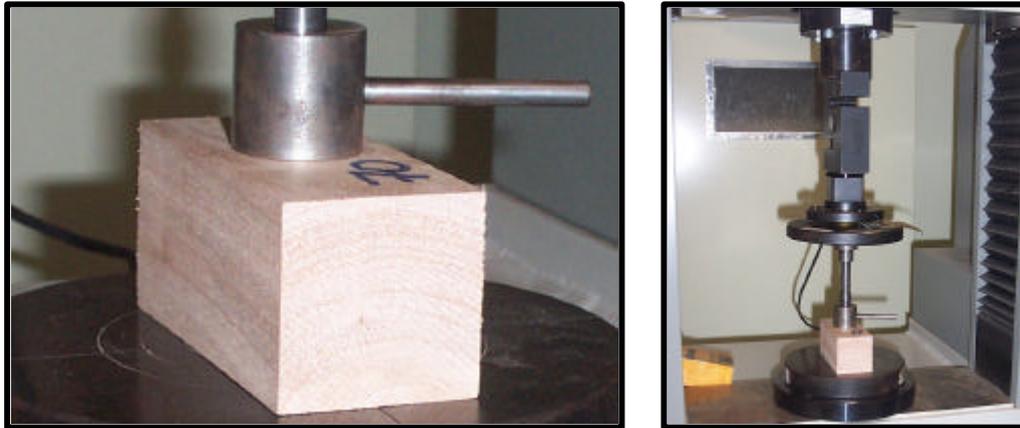


Figura N° 14: Ensayo de dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio.

#### 6.4 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")

## 7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Ensayos no destructivos en árboles en pie, estimación del Módulo de Elasticidad

El conocimiento del Módulo de elasticidad de los árboles en pie, es un buen indicador de la calidad de la madera y expresa los valores de resistencia esperados en los productos finales a obtener de estos árboles. Sirviendo de herramienta en el manejo forestal, como indicador para el mejoramiento genético, para la identificación de árboles plus, para la realización de raleos, etc. Se estimó el módulo de elasticidad de 18 árboles en pie, mediante dos equipos de ensayos no destructivos y de principio de funcionamiento similar, estos equipos fueron el Fakopp y el Sylvatest. A continuación se presentan los resultados de los valores de MOE obtenidos. (Cuadro N° 5)

Cuadro N° 5: Módulo de Elasticidad de árboles en pie

Ensayo / Equipo	MOE Fakopp (MPa)	MOE Sylvatest (MPa)
Número	18	18
<b>Promedio</b>	<b>11460</b>	<b>15213</b>
Máximo	13535	18466
Mínimo	9849	12544
Desv. std.	1166	1761
CV (%)	10,2	11,6

En siguientes capítulos analizaremos los resultados del módulo de elasticidad de trozas, tablas o vigas en estado verde y seco a 12 % de C.H., también veremos la relación que existe entre el módulo de elasticidad obtenido mediante los equipos no destructivos y el método de referencia ensayo de flexión estática en máquina universal.

## 7.2 Ensayos realizados sobre trozas en estado verde

### 7.2.1 Clasificación visual

Con la finalidad de caracterizar y diferenciar la calidad de las trozas a las distintas alturas, se clasificaron en cuatro categorías o grados. De cada árbol se obtuvieron 3 trozas de 4 metros de longitud cada una. El Cuadro N° 6 presenta para cada altura de troza el porcentaje de las mismas que pertenecen a cada grado. El criterio de clasificación está descrito en el capítulo 4.1.

**Cuadro N° 6: Porcentaje de trozas según el grado al que pertenecen**

	GRADO			
	I	II	III	IV
Troza 1	43,3	53,3	3,3	0
Troza 2	13,3	43,3	36,7	6,7
Troza 3	6,7	26,7	40,0	26,7

Recordemos que el rodal no fue podado y solo fue raleado (raleo comercial) a los 22 años de edad. Esto concuerda con lo observado en el cuadro, donde en las trozas 1 y 2 se encuentra el mayor número de trozas grado I y II, en segundas trozas predominan los grados II y III siendo menor el número de grado I y menor aun el grado IV, en las terceras trozas hay una preponderancia de trozas de grado II, III y IV, siendo menor en estas últimas, el grado I.

### 7.2.2 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica

El contenido de humedad promedio de las trozas fue de 88,5 % con un coeficiente de variación de 16,0 %; se observaron variaciones entre los individuos, variaciones según la ubicación en el radio y también en la altura e incluso dentro de la misma ubicación.

Esta variación está dada por características de la madera como la edad, los procesos de duraminización, la variabilidad propia de la madera y la variabilidad entre individuos.

El contenido de humedad y su variabilidad son características importantes de la madera en el momento de definir programas de secado, para los procesos de impregnación, etc. La densidad aparente básica promedio fue de 0,451 g/cm<sup>3</sup> con un coeficiente de variación de 13,2 %, mostrando también al igual que el contenido de humedad variaciones entre árboles, dentro del mismo árbol en el radio y en la altura del fuste. (Cuadro N° 7)

**Cuadro N° 7: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica**

	Contenido de Humedad (%)	Densidad Aparente Básica (g/cm <sup>3</sup> )
Número	270	270
<b>Promedio</b>	<b>88,5</b>	<b>0,451</b>
Máximo	135,5	0,641
Mínimo	60,9	0,334
Desv. std.	14,1	0,06
CV (%)	16,0	13,2

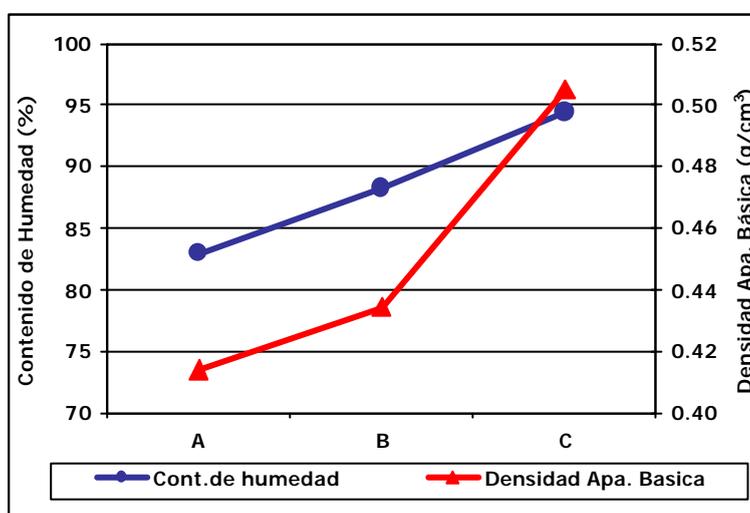
### 7.2.3 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio

Existe variación en el radio y en altura tanto para el contenido de humedad como para la densidad aparente básica. En el radio, el contenido de humedad aumenta linealmente desde la ubicación próxima a la médula (probetas "A") pasando por la zona intermedia (probetas "B") y siendo mayor en la zona cercana a la corteza (probetas "C").

La densidad aparente básica tiene un comportamiento similar al contenido de humedad, aunque el aumento es más significativo entre las ubicaciones "B" y "C" que entre las "A" y "B". Los valores de la densidad varían significativamente según la ubicación en el radio y no existen grandes diferencias entre los coeficientes de variación en todas las ubicaciones analizadas. (Ver Cuadro N° 8 y Grafico N° 1)

**Cuadro N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio**

Probeta	N°	Humedad (%)			Densidad Ap. Básica (g/cm <sup>3</sup> )		
		Media	Desv. Std.	CV (%)	Media	Desv. Std.	CV (%)
A	90	82,9	12,1	14,5	0,414	0,03	7,7
B	90	88,2	13,9	15,7	0,434	0,05	11,2
C	90	94,42	14,1	14,9	0,505	0,05	10,4



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

Actualmente dos estudiantes avanzados de Facultad de Agronomía están trabajando en una tesis sobre parte de este mismo muestreo de *E. grandis* de 26 años, donde se estudió con más profundidad la variación en el radio. En el informe N° 4 "Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. Del Norte de Uruguay", trabajo sobre eucaliptos de 12 años de edad, la tendencia de la densidad aparente básica es similar a la que observamos en este estudio, pero los valores promedio por ubicación en el radio son superiores y la variación entre éstas es significativa.

### 7.2.3.1 Análisis por altura según ubicación en el radio

En el análisis según ubicación en el radio para cada una de las alturas por separado se puede ver que las propiedades siguen una similar tendencia al promedio por ubicación. 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 (son árboles de 26 años) que encontramos en las tres alturas.

Podemos observar en los gráficos 2 y 3 el comportamiento del contenido de humedad y de la densidad aparente básica; el contenido de humedad es mayor en la primer troza en todas las ubicaciones, medio en la segunda y menor en la tercera. En cuanto a la densidad básica no se observan grandes diferencias en las tres alturas según la ubicación en el radio salvo en la ubicación "A" de la primer troza.

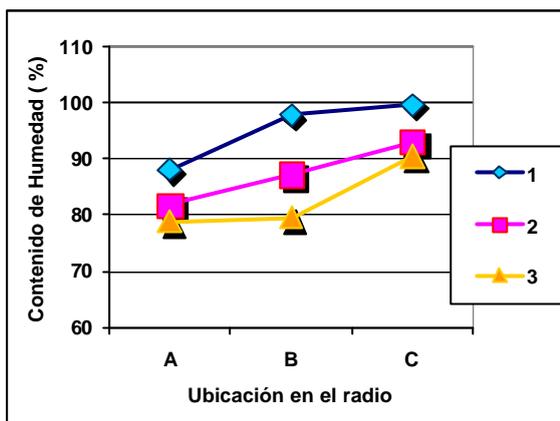


Gráfico N° 2: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio

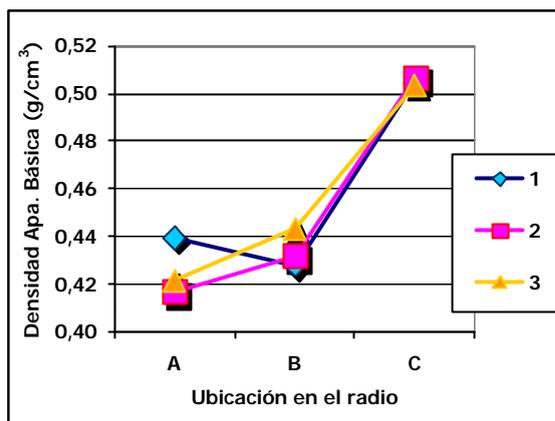


Gráfico N° 3: Densidad Aparente Básica por altura según ubicación en el radio

#### 7.2.4 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura

El contenido de humedad promedio disminuye con el aumento en la altura del fuste, este aumento es proporcional; existiendo una diferencia de aproximadamente un 8 % entre la primera y segunda troza (Cuadro N° 9 y Gráfico N° 4).

El comportamiento de la densidad aparente básica fue a la inversa, se observó un aumento con la altura, siendo superior en la tercer troza (ver Cuadro N° 9). Estas tendencias son similares a las observadas en los Informes N° 4 "Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. Del Norte de Uruguay" en árboles de 12 años y en el N° 5 "Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* Maiden Del Norte de Uruguay" en árboles de 18 años.

También debemos destacar que los coeficientes de variación son sensiblemente mayores en la variación en la altura del fuste que en la variación en el ancho del radio.

Cuadro N° 9: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en altura

Troza	N°	Humedad (%)			Densidad Básica (g/cm³)		
		Media	Desv. std.	CV (%)	Media	Desv. std.	CV (%)
1	90	95,2	14,6	15,4	0,445	0,06	14,4
2	90	87,4	12,5	14,3	0,452	0,06	14,3
3	90	83,0	12,5	15,1	0,456	0,06	12,5

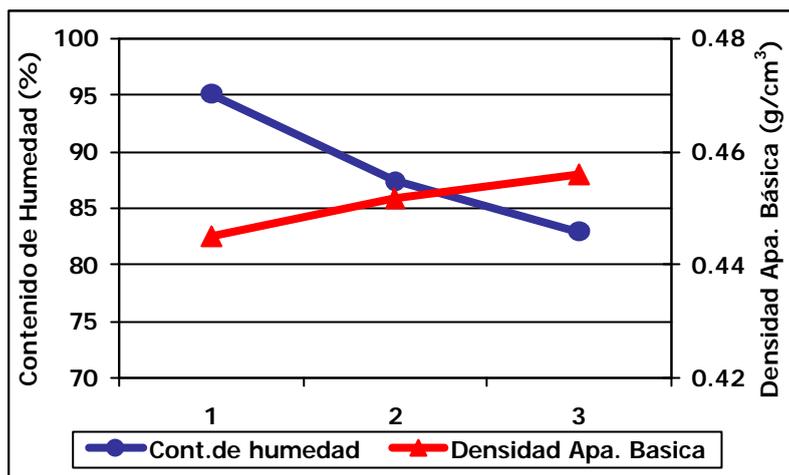


Gráfico N° 4: Contenido de Humedad y Densidad Apparente Básica según ubicación en la altura

#### 7.2.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura

En el análisis de la variación en el radio según la altura se observó que la tendencia de disminución del contenido de humedad en la altura del fuste es acompañada por la madera de todas las ubicaciones en el radio (A, B y C) y mostrando variaciones significativas entre la ubicación "A" y la "B y C" sólo en la tercer troza. En cuanto a la densidad aparente básica se observó que la madera de las tres ubicaciones presenta una tendencia similar, salvo en la ubicación "A" en la cual el valor promedio es mayor en la primer troza que en las segundas y terceras trozas, donde en estas últimas los valores promedios son similares. También consideramos importante mencionar que existe una clara diferencia entre la madera cercana a la médula y la intermedia con la madera periférica o de mayor edad cambial (Ver gráficas N° 5 y 6).

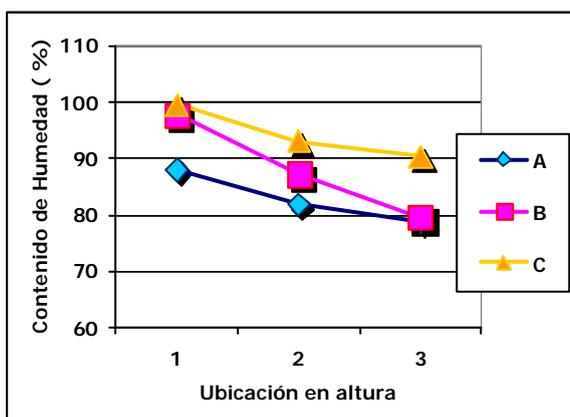


Gráfico N° 5: Contenido de Humedad (por probeta) según ubicación en altura

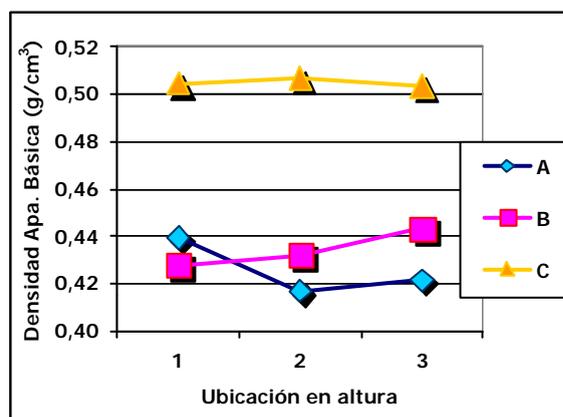


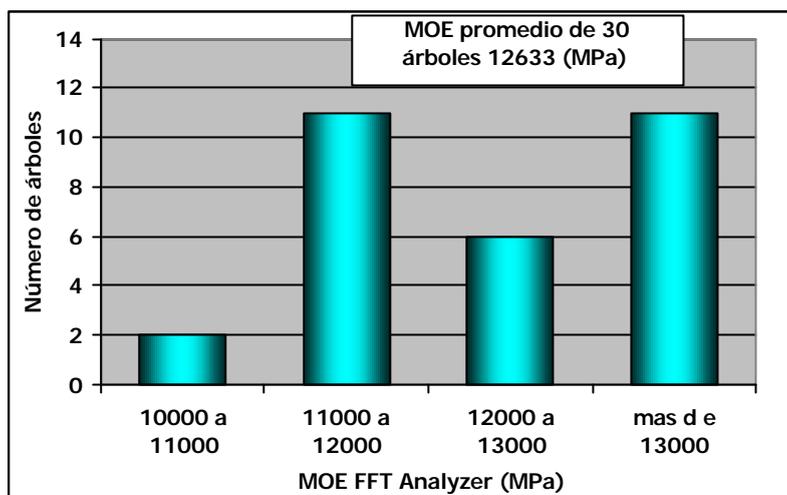
Gráfico N° 6: Densidad App. Básica (por Probeta) según ubicación en altura

#### 7.2.5 Módulo de Elasticidad de las trozas

El valor promedio del módulo de elasticidad de las trozas analizadas (30 de cada altura) es de 12633 MPa, existiendo variación entre los valores individuales de las trozas.

Se observó también una gran variación en los valores de MOE entre árboles, existiendo un rango de valores que van desde 10000 a más de 13000 MPa. El 93,3 % de los árboles presentan

valores de MOE entre 11000 y 13000 MPa. Se tomó como valor del árbol el promedio de los valores de las primeras, segundas y terceras trozas. (Ver gráfico N° 7).



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

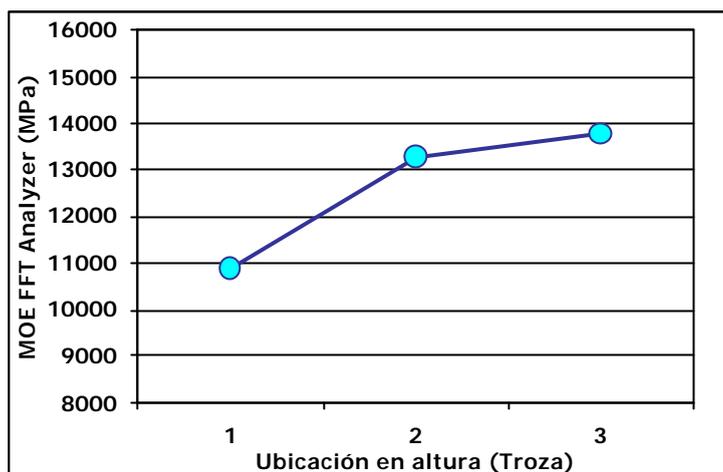
Existió un patrón de variación de los valores de MOE entre las trozas dentro de los árboles. El valor más alto de MOE se observó en las terceras trozas, seguido de las segundas y luego el menor valor en las primeras. (Cuadro N° 10)

**Cuadro N° 10: MOE sin corteza (FFT Analyzer) según troza**

Árbol N°	MOE Trozas sin corteza (MPa)			Media (MPa)
	1	2	3	
<b>Media</b>	<b>10856</b>	<b>13287</b>	<b>13756</b>	<b>12633</b>
<b>Máximo</b>	13724	16492	16694	15505
<b>Mínimo</b>	8450	8955	11809	10690
<b>Desv. Std.</b>	1222	1547	1169	1219
<b>CV (%)</b>	11,3	11,6	8,5	9,6

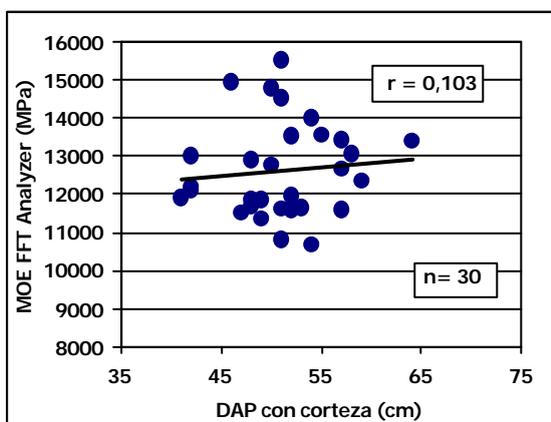
En estudios realizados anteriormente tanto en pinos como en eucaliptos se constató una diferencia de aproximadamente un 10% entre los valores de MOE de las trozas con y sin corteza, siendo mayor el valor de las trozas sin corteza. La correlación entre las dos determinaciones fue alta con  $r = 0,904$ . Se observó también que a medida que aumenta la altura aumenta el valor promedio de MOE y el valor de MOE de las trozas sin corteza fue superior. En el estudio realizado para el Informe N° 4, los valores promedio para las primeras trozas fue un 9,0 % superior, en las segundas trozas un 9,1 % y las terceras trozas un 7,9 %. En el estudio que nos ocupa no se determinó el MOE con corteza ya que conocemos la diferencia que existe entre los dos métodos. La existencia de correlación entre los dos valores de MOE es un hecho positivo ya que no sería necesario descortezar las trozas para estimar el MOE tanto en el trabajo de investigación, en la caracterización y clasificación en el proceso industrial (clasificación de trozas basándose en su resistencia mecánica). También en estudios realizados anteriormente tanto en *Pinus taeda* y *elliottii* como en *Eucalyptus grandis* se pudo constatar que existe relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de la totalidad de las tablas obtenidas de dichas trozas.

En el gráfico N° 8 se observa la variación en la altura del módulo de elasticidad de las trozas estimado mediante el FFT Analyzer, donde los valores promedio del módulo de elasticidad aumentan a medida que aumenta la altura del fuste; en este trabajo existe una diferencia marcada entre los valores promedio de la primera troza con los de la segunda y con la tercera, la diferencia entre la segunda y la tercera no es tan importante.

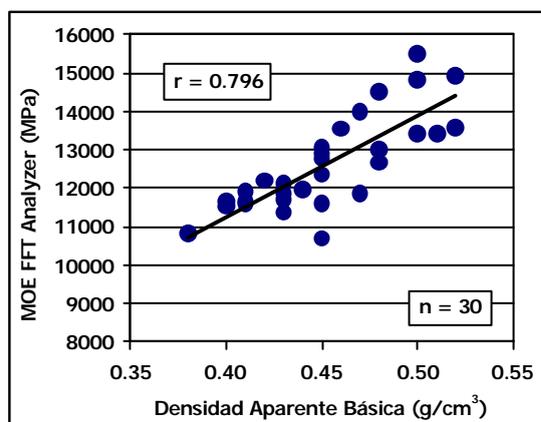


**Gráfico N° 8: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas sin corteza según la ubicación en altura**

En estudios realizados con anterioridad en *Pinus taeda* y *elliottii* y en *E. Grandis* M. dentro del Grupo técnico de Madera Aserrada, no se encontró relación entre el MOE de las trozas y la velocidad de crecimiento expresada como diámetro a altura de pecho (DAP) para *Pinus elliottii*,  $r = -0,382$ , *Pinus taeda*,  $r = -0,373$ , *E. grandis* 12 años  $r = -0,422$  y *E. grandis* 18 años,  $r = -0,394$ , este hecho nos permite decir que el MOE como parámetro para definir la calidad de la madera no está relacionado con la velocidad de crecimiento; en este estudio que nos ocupa esta relación es de  $r = 0,103$ . Debemos recordar que son árboles de 26 años de edad, que los diámetros a altura de pecho (DAP) van de 40 a 65 cm y prácticamente no fueron manejados (no se podaron y sólo se les realizó un raleo comercial a los 22 años). Cuando analizamos los resultados de *E. Grandis* de 12 a años en el informe N° 4, era de esperar que quizás (en el futuro) si los árboles alcanzan mayores edades y mayores diámetros esta relación (MOE y velocidad de crecimiento) podría mejorar, pero no se observó lo esperado en este estudio. En el caso que se utilizó el módulo de elasticidad como parámetro de calidad de madera, la decisión en el momento del turno final no dependerá del aumento en el tiempo de los valores de MOE si no de las mayor cantidad o volumen de madera que se pueda obtener. (Ver gráfico N° 9) Se observó correlación entre el MOE FFT Analyzer y la densidad aparente básica ( $r = 0,796$ ) relación que fue sensiblemente menor en estudios de *E. grandis* anteriores. (ver gráfico N° 10)



**Gráfico N° 9: Relación entre el MOE y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP)**



**Gráfico N° 10: Relación entre MOE FFT Analyzer y la Densidad Aparente Básica (Condición verde)**

Se estudio también la relación entre el DAP y la densidad aparente básica, se obtuvo un  $r = 0,329$ , resultando auspicioso ya que tampoco existiría relación entre la velocidad de crecimiento y la densidad de la madera de este muestreo de *E. grandis* de 26 años.

### 7.3 Estudios no destructivos realizados en tablas verdes (2"x 6")

Se estimó el módulo de elasticidad de 159 tablas en estado verde mediante el equipo no destructivo FFT Analyzer y sobre 18 de estas mismas tablas se estimó mediante los equipos no destructivos Fakopp y Sylvatest. Se presentarán los resultados de los ensayos en las 159 tablas y los realizados en las 18 tablas en el capítulo 7.5, resultados de los ensayos de árboles en pie, en tablas verdes y en tablas secas, con sus respectivas correlaciones.

#### 7.3.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas de 2"x 6" en estado verde

En el cuadro N° 11 se presentan el valor promedio del módulo de elasticidad determinado mediante el equipo no destructivo FFT Analyzer, sobre la totalidad de las tablas (2"x 6") en estado verde, obtenidas de las 18 trozas basales de los 18 árboles ensayados en pie, de una totalidad de 30 árboles muestreados.

**Cuadro N° 11 : Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer) de las tablas en estado verde 2"x 6"**

	MOE FFT Analyzer (MPa)
Número	159
<b>Promedio</b>	<b>11720</b>
Máximo	17227
Mínimo	7453
STD	2005
CV (%)	17,1

### 7.4 Estudios realizados en tablas secas (2"x 6")

Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) en tablas secas y dimensionadas (50 mm x 150 mm x 2.8 m) mediante dos ensayos mecánicos, el primero no destructivo por el método de la principal frecuencia de vibración longitudinal, utilizando el equipo FFT Analyzer y el segundo destructivo mediante ensayo de flexión estática en máquina universal donde se determinaron el MOE y el módulo de rotura (MOR).

Las tablas fueron secadas en horno de secado a escala piloto en el LATU, posteriormente fueron llevadas a las dimensiones finales de ensayo. El contenido de humedad promedio de las tablas luego del secado, en el momento de ser ensayadas fue de 11,7 %.

#### 7.4.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas secas de 2"x 6"

En el cuadro N° 12 se muestran los promedios de las propiedades estudiadas para todas las tablas obtenidas del aserrado de las trozas de todas las ubicaciones radiales ("BA", "B" y "C"). En estos promedios se incluyen las tablas "BA" (madera muy próxima a la médula) ya que éstas, a diferencia de las tablas ensayadas en las especies de pinos, no contienen médula, recordemos que en eucaliptos industrialmente se descarta, también en este trabajo fue descartada en el aserrado.

**Cuadro N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (BA, B y C)**

	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap.
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Corriente (g/cm <sup>3</sup> )
Número	260	260	257	258
<b>Promedio</b>	<b>14228</b>	<b>11588</b>	<b>46,0</b>	<b>0,504</b>
Máximo	21510	16413	97,7	0,803
Mínimo	9208	7675	16,0	0,375
STD	2320	1816	17,1	0,08
CV (%)	16,3	15,7	36,9	16,0

En el cuadro N° 12 se puede ver que el valor mínimo del MOR es bajo (MPa 16,0), luego de examinadas las tablas de valores bajos se pudo constatar la presencia de nudos de mediano tamaño cercanos a la zona que se sometió al esfuerzo de tensión, en algún caso la presencia de corazón quebradizo (Brittle heart) y también algo de pudrición. Fueron incluidos en este estudio debido a que son valores obtenidos y que muestran las características y la variabilidad de la madera ensayada.

De 257 tablas o vigas ensayadas sólo 22 (un 8,6 %) presentaron valores de MOR menores a 25 MPa y sólo 5 (un 2,5 %) de ellas menos de 20 MPa.

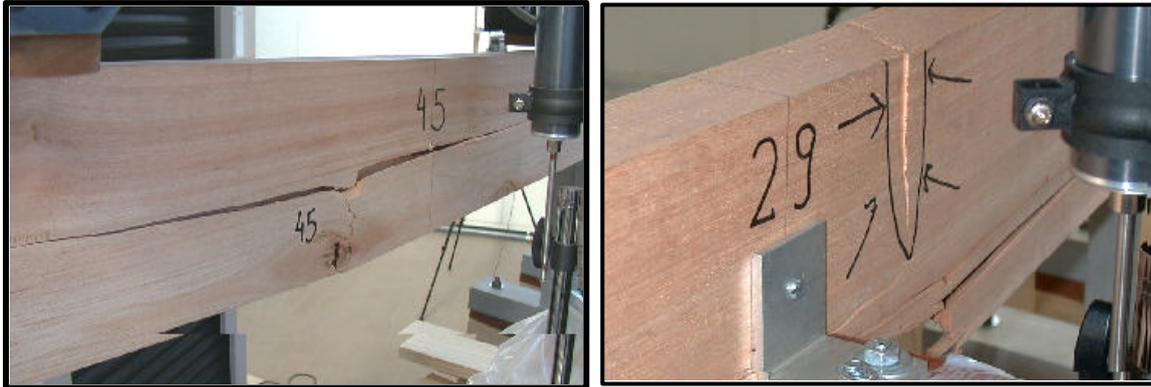
Más adelante en este informe veremos la gran influencia que tiene la presencia de nudos en el comportamiento de la madera en el ensayo de flexión, afectando los valores del MOE pero afectando más significativamente los valores del MOR.

En el cuadro N° 13 vemos el resumen de los valores promedio de las propiedades mecánicas de las tablas "B" y "C" provenientes de las primeras, segundas y terceras trozas

**Cuadro N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas "B" y "C" de la 1°, 2° y 3° troza**

	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap.
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Corriente (g/cm <sup>3</sup> )
Número	126	126	126	126
<b>Promedio</b>	<b>14403</b>	<b>11789</b>	<b>48,2</b>	<b>0,527</b>
Máximo	20382	16413	95,3	0,803
Mínimo	9922	7696	18,2	0,384
STD	2295	1786	15,1	0,086
CV (%)	15,9	15,1	31,4	16,3

De los valores promedio de las propiedades analizadas en los cuadros N° 12 y 13, se puede concluir que la influencia de las tablas "BA" de la totalidad de las tablas de las terceras trozas no es significativa en los resultados, lo que nos hace concluir que para la especie y edad analizada se podría hacer un uso integral de la madera producida en la totalidad (del ancho) del radio (excluyendo la médula) y en las tres alturas.



**Figuras N° 15 y 16: Tipo de rotura por tensión y compresión**

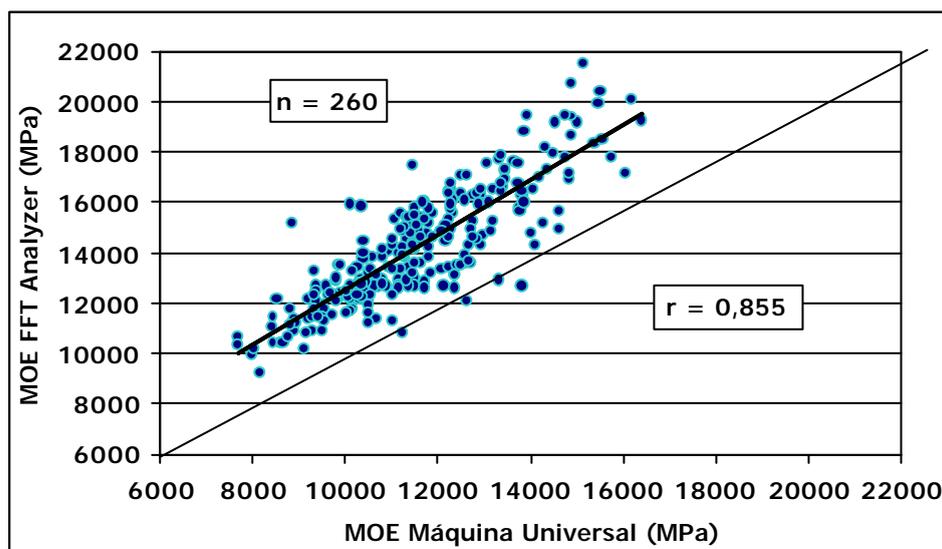
En las figuras N° 15 y 16 podemos observar a modo de ejemplo dos tablas que presentan diseños de rotura en la zona central y que se pueden considerar típicos en el ensayo de flexión estática, presentando valores de MOR dentro de los valores medios.

La tabla de la derecha presenta un diseño de rotura claramente influenciado por compresión en la zona central, la tabla de la izquierda muestra el diseño de rotura influenciado por la tensión.

#### **7.4.2 Relación entre los diferentes métodos para la determinación del Módulo de Elasticidad**

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 (Máquina Universal). Se observó una correlación de  $r = 0,855$  entre la estimación y la determinación; esto nos permite decir que el uso del FFT Analyzer es una buena herramienta para la estimación no destructiva del MOE. También debemos tener en cuenta que los valores promedio de MOE obtenidos mediante el uso del FFT Analyzer son, para este estudio un 22,8 % superiores a los obtenidos en ensayo de flexión estática en máquina universal (Gráfico N° 11). Más adelante veremos la importancia de esta diferencia en más del valor obtenido por el método no destructivo en el momento de evaluar la madera para uso estructural.

En trabajos anteriores observamos también la buena correlación que existe entre ambos métodos utilizados para la determinación del MOE y también los resultados obtenidos con otros equipos similares no destructivos como el Pundit, el Fakopp, y Sylvatest,



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

En las tablas no se encontró una alta correlación ( $r = 0,568$ ) 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 en la misma medida con el MOE, 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 MOE de 12000 (MPa) existe una variación de valores de MOR de 20 a 80 (MPa).

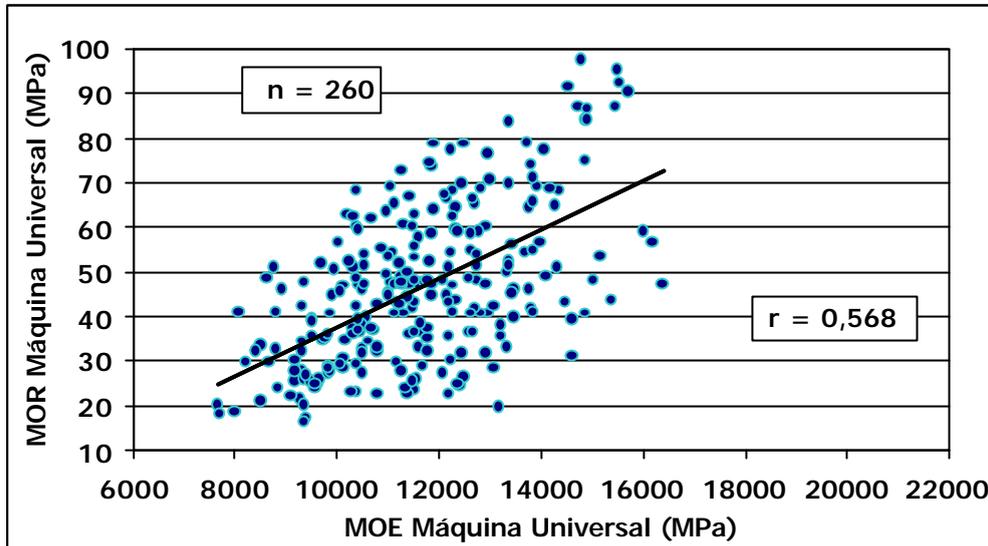


Gráfico N° 12: Relación entre el MOR y el MOE

#### 7.4.3 Relación entre la Densidad Aparente Corriente y las propiedades mecánicas

Se analizó la relación de las propiedades mecánicas, el MOE y el MOR de las tablas o vigas secas con la densidad aparente corriente; al igual que en estudios anteriores no se encontró una correlación en ninguno de los dos casos. En el caso del MOE para las tablas "BA" un  $r = 0,288$ , para las tablas "B" un  $r = 0,401$  y las "C" un  $r = 0,186$  como muestra el gráfico N° 13. Existe para un mismo valor de densidad una amplia dispersión de los valores en ambas propiedades mecánicas. Tampoco mejoró la correlación cuando se analizaron todas las tablas agrupadas.

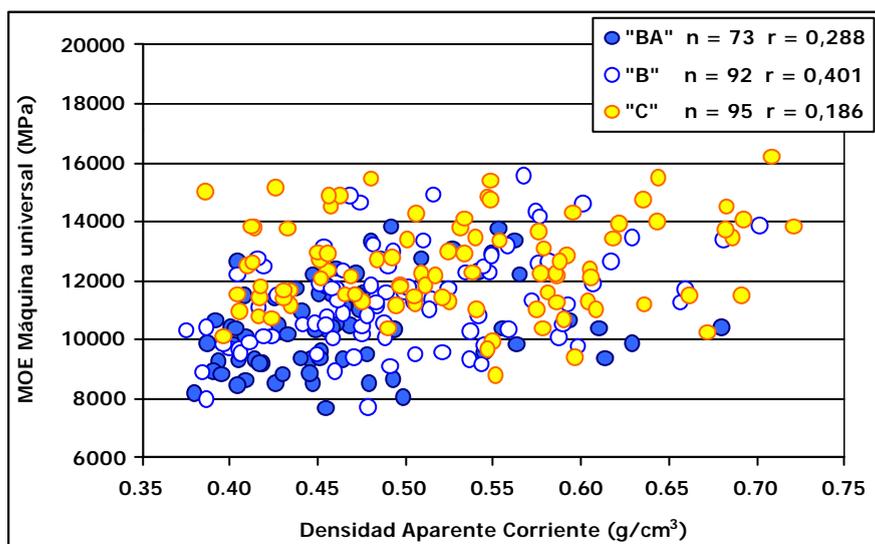


Gráfico N° 13: Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el Módulo Elástico (Máquina Universal)

La relación entre la densidad aparente corriente y el módulo de rotura mostró valores de r aún menores que los obtenidos con el módulo de elasticidad. Para este estudio no existe tampoco relación entre la densidad aparente básica y el módulo de rotura. (Gráfico N° 14)

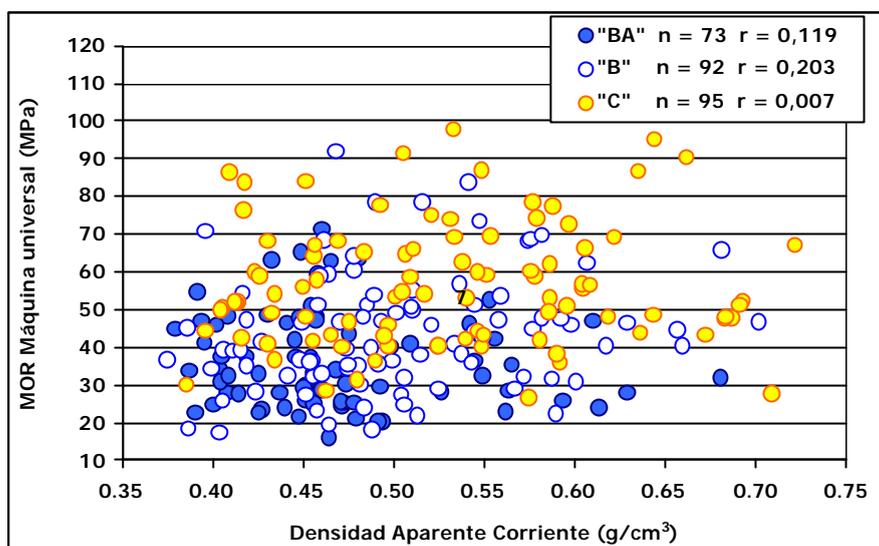


Gráfico N° 14: Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el Módulo de Rotura (Máquina Universal)

#### 7.4.4 Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio

En el análisis de la variación del módulo de elasticidad en el radio tanto en el ensayo no destructivo (FFT Analyzer) como en el ensayo en máquina universal, se observa en forma clara que a medida que las tablas se alejan de la médula y se acercan a la corteza (pasando por madera juvenil madera, de transición y madera adulta) aumenta el valor del MOE. La misma tendencia se observa en los valores promedio del módulo de rotura y en los valores promedio de la densidad aparente corriente. (Cuadro N° 14 y gráfico 15)

Cuadro N° 14: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio

Ubicación de la tabla	Número de Tablas	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap. Corriente (g/cm³)
		MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	
BA	73	12588	10354	36,8	0,466
B	92	14032	11443	44,1	0,502
C	95	15527	12564	56,5	0,534

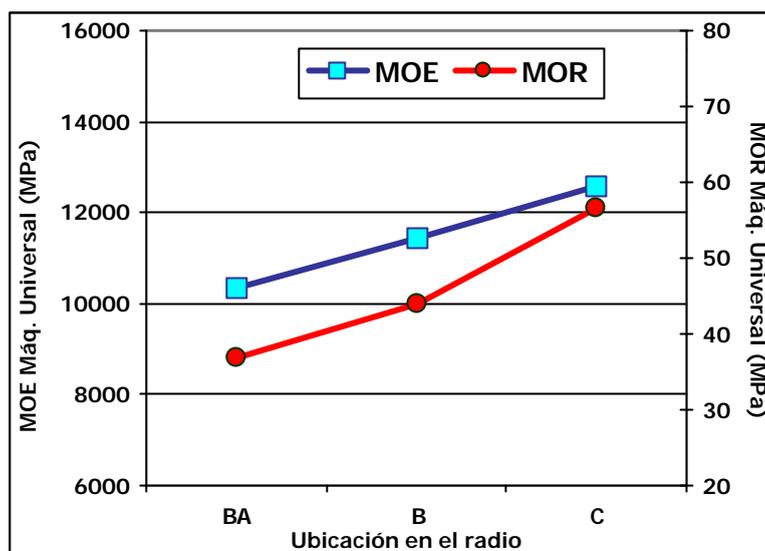


Gráfico N° 15: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio

#### 7.4.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura

De analizar la variación en el radio de las propiedades para las distintas alturas por separado, se observa que el comportamiento para todas las alturas es similar al observado en los valores promedio por ubicación, salvo para las tablas provenientes de la primer troza y en especial para la ubicación "C" en donde los valores promedio son sensiblemente menores. En el análisis de los valores promedio de las tres alturas y de las tres ubicaciones en el radio, observamos que las tablas "BA" provenientes de las tres alturas presentan los valores más bajos, intermedios los de las tablas "B" y superiores los de las tablas "C". (Gráfico N° 16)

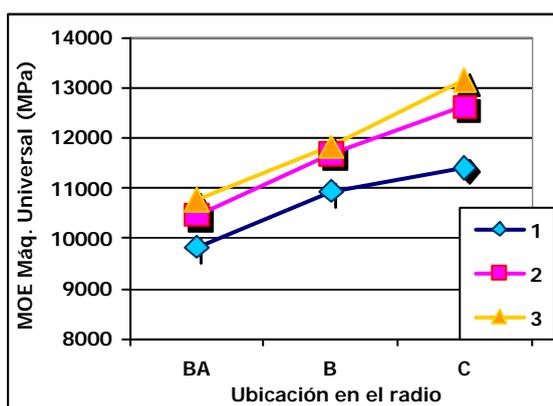


Gráfico N° 16: MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

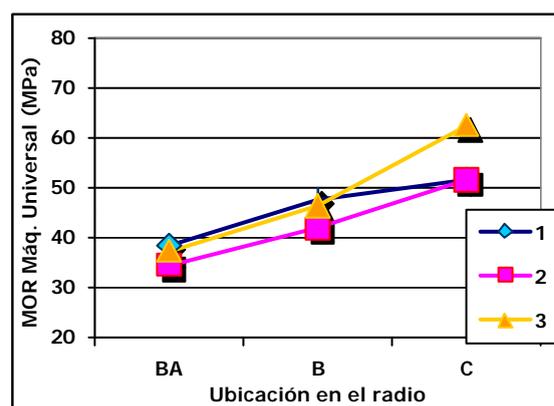


Gráfico N° 17: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

En cuanto a los valores de MOR vemos en el gráfico N° 17 que las tablas provenientes de las tres ubicaciones en el radio no presentan diferencias significativas en las tres alturas, salvo las tablas "C" de la tercer troza. En otros estudios realizados con anterioridad observamos que el comportamiento del MOE es muy similar al del MOR en el radio según la ubicación en la altura.

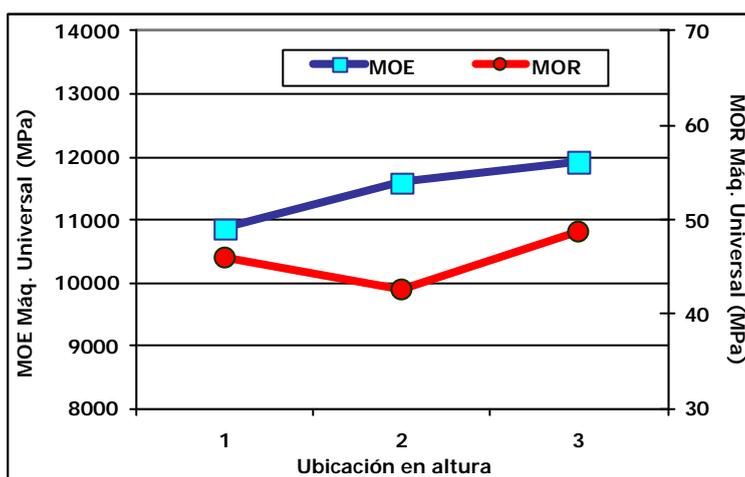
#### 7.4.5 Análisis del Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura según ubicación en la altura

Los valores promedio de MOE aumentan a medida que aumenta la altura del fuste siendo superiores en la tercer troza, en cambio en el MOR los valores promedio más altos se encuentran en la tercer troza, siendo menores en la segunda troza (Ver Cuadro N° 15). Esta tendencia no se presentó de esta forma en los estudios realizados en *E. grandis* informes N° 4 y 5 del Grupo Técnico de Madera Aserrada” de 12 y 18 años de edad respectivamente.

**Cuadro N° 15: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en altura**

Altura	Número de tablas	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap.
		MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Corriente (g/cm <sup>3</sup> )
1	72	13153	10862	45,9	0,524
2	97	14196	11588	42,7	0,488
3	91	14797	11911	48,8	0,490

En cuanto a la densidad aparente corriente los valores promedio son similares en todas las alturas, siendo levemente superiores en la primera troza, e iguales en la segunda y tercer troza.



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

##### 7.4.5.1 Análisis por ubicación en el radio según altura

Analizando la variación del módulo de elasticidad promedio de las alturas del fuste para cada ubicación en el radio, observamos que todas las alturas presentan una tendencia muy similar, variando los valores promedio según la ubicación en el radio, hecho que ya hemos constatado cuando analizamos la variación en altura. El módulo de rotura presenta un comportamiento similar, pero los valores promedio son superiores en las primeras y terceras trozas y también aumenta el valor promedio según la ubicación en el radio (Gráficos N° 19 y 20).

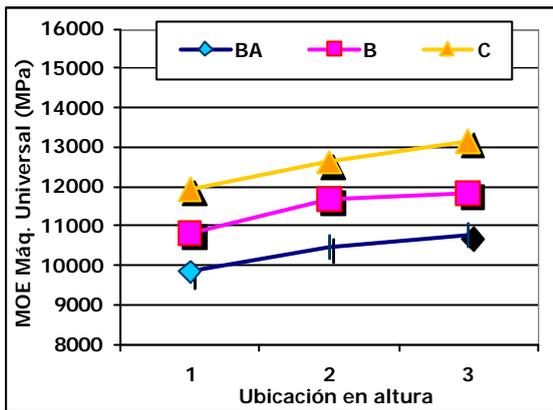


Gráfico N° 19: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

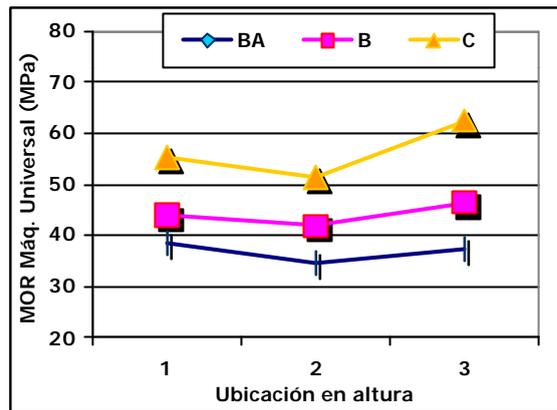


Gráfico N° 20: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

#### 7.4.6 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 valor promedio obtenido en ensayo de flexión estática (Máquina Universal) de las tablas aserradas de cada una de las trozas.

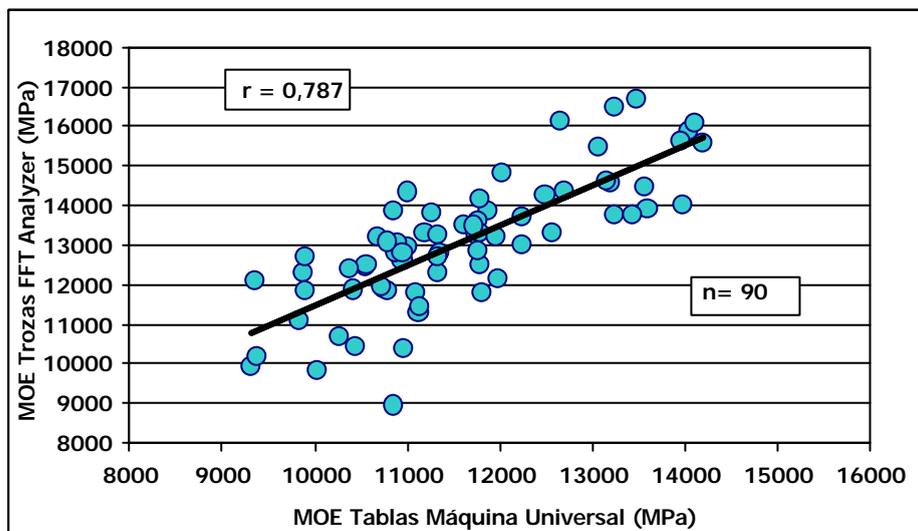


Gráfico N° 21: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas

Se encontró cierta relación entre los dos métodos ( $r = 0,787$ ); en otros estudios anteriores observamos que este coeficiente de correlación es superior y en otros como los observados en los informes N° 4 y 5, son menores ( $r = 0,552$  y  $0,621$  respectivamente). El mayor volumen de madera obtenido, que redundó en mayor cantidad de tablas ensayadas y el hecho de que fueron árboles de 26 años, fueron elementos que hicieron que la relación entre los dos métodos fuera superior en el estudio que nos ocupa. La importancia de que exista una buena correlación entre estos métodos radica en que el FFT Analyzer pueda ser apto en la estimación del MOE en forma práctica, rápida y no destructiva y permita una adecuada clasificación por resistencia mecánica en la industria, tanto en el monte como en el patio de trozas, facilitando en el aserrado la producción de madera para uso estructural. Hemos visto en capítulos anteriores que existen y se

utilizan otros equipos no destructivos que evalúan también el módulo de elasticidad tanto en árboles en pie como en trozas, tablas, etc.

#### 7.4.7 Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural

Desde que comenzamos la serie de publicaciones del Grupo Técnico de Madera Aserrada, con los resultados de las investigaciones realizadas tanto en coníferas como en latifoliadas tomamos como referencia la norma JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de uso estructural y en este informe aplicaremos el mismo criterio para la clasificación de la madera para 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.

Se observa que existe una correlación relativamente alta para todas las ubicaciones de las tablas. Este hecho nos permite utilizar, para la estimación del MOE de las tablas, el método no destructivo FFT Analyzer. Se utiliza la palabra estimación por que se obtiene un valor aproximado al valor de referencia o valor real del módulo de elasticidad que es el obtenido mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal.

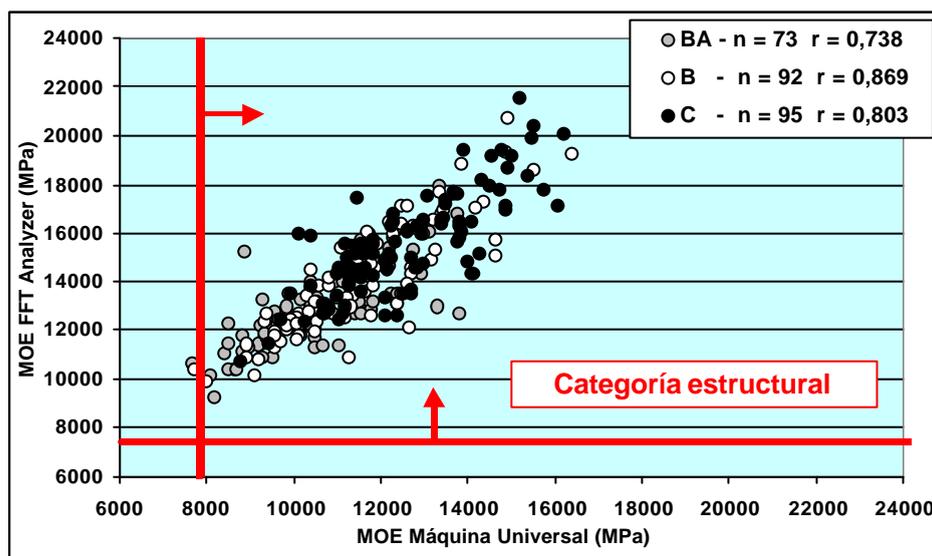


Gráfico N° 22: Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "BA", "B" y "C"

En el gráfico N° 22 se puede observar que solo dos tablas una "BA" y una "B" se encuentran por debajo del límite de 7850 MPa que según la norma JAS no las calificaría como madera para uso estructural. También vemos que existe una tendencia a agruparse estas tablas "BA" en la zona de menor valor, seguramente debido a la influencia de la mayor proporción de madera juvenil. Para las tablas "B" la distribución es más homogénea a lo largo del rango de valores y las tablas "C" tienden a extenderse por la zona de mayor valor. Estas distribuciones las podemos ver presentadas de otra forma en el gráfico N° 24.

#### 7.4.8 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS

En los cuadros N° 17 y 18 se presenta la clasificación de las tablas según la norma 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.

Para el caso de las coníferas cuyos resultados fueron estudiados y publicados en los informes Nros. 1, 2 y 3 el porcentaje de vigas aptas para el uso estructural no superaba el 50 % y en cuanto a las latifoliadas, cuyos resultados se publicaron en los informes Nros. 4 y 5 del Grupo Técnico de Madera Aserrada, el porcentaje de madera apta aumento significativamente, en *E. grandis* de 12 años (informe N° 4) un 99,5 % de las tablas serían aptas y en el caso de *E. grandis* de 18 años (informe N° 5) un 98 %. Además es importante destacar que en ambos muestreos de *E. grandis* se encuentra aproximadamente un 70 % de las tablas entre las categorías E 110 y E 130, lo que significa que es madera que no sólo es apta si no que además califica con holgura como madera para uso estructural.

Es importante decir 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 y en otros realizados en pinos y eucaliptos que existe una diferencia en el MOE promedio obtenido mediante el FFT Analyzer de aproximadamente un 10 % superior a los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo de referencia en máquina universal. De lo anterior concluimos que para realizar la misma clasificación o evaluación de la madera para uso estructural basada en el MOE FFT Analyzer u otros equipos no destructivos debemos tener en cuenta estas diferencias en más en las estimaciones.

En el cuadro N° 16 y en el gráfico N° 23 se observa la distribución de los valores de MOE de las tablas, donde observamos que entre los rangos E 90 y E 130 se concentra un 84,6 % de las tablas ensayadas. A partir de la categoría E 90 inclusive la madera es apta para uso estructural y entre las categorías E 110 y E 130 se concentra el 68,1 % de las tablas.

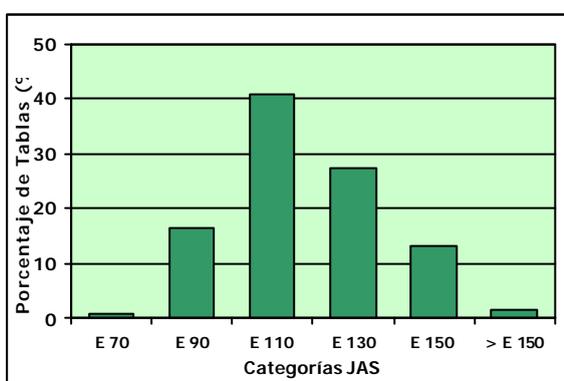
**Cuadro N° 16: Porcentaje de tablas según categoría JAS**

Categoría JAS	MOE 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	MOE Máquina Universal ( MPa )	Promedio Tablas	
			Cantidad (260)	Porcentaje (%)
< E 50		< 3920	0	0
E 50	40 – 60	3920 – 5880	0	0
E 70	60 – 80	5880 – 7850	2	0,8
E 90	80 – 100	7850 – 9810	43	16,5
<b>E 110</b>	100 – 120	9810 – 11770	<b>106</b>	<b>40,8</b>
<b>E 130</b>	120 – 140	11770 – 13730	<b>71</b>	<b>27,3</b>
E 150	140 – 160	13730 – 15690	34	13,1
> E 150	> 160	> 15690	4	1,5

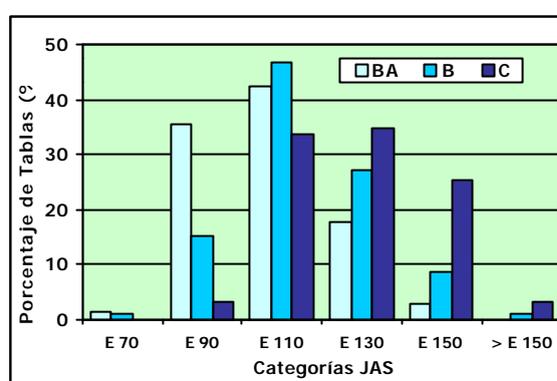
En el cuadro N° 17 y en el gráfico N° 24 se observa esta misma distribución pero discriminada por tipo de tabla según su ubicación en el radio (BA-B-C), donde la totalidad de las tablas "C" presentan valores iguales o mayores a la categoría E 90; de las tablas "BA" y "B" solo una se encuentra en la categoría E 70 y no calificaría como madera estructural. En las categorías E 110 y E 130 se concentran un 60,3 % de las tablas "BA", un 73,9 % de las tablas "B" y un 68,4 % de las tablas "C"; también se puede destacar que de estas últimas tablas "C" un 28,5 % tienen valores superiores a la categoría E 130. Como conclusión podemos decir que las tablas "C" que son las en este estudio las provenientes de la periferia del árbol hasta una altura de 12 m del fuste cumplen holgadamente con las exigencias de la norma JAS.

**Cuadro N° 17: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS**

Categoría	MOE	MOE	Tablas BA		Tablas B		Tablas C	
JAS	10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	( MPa )	Cant.	(%)	Cant	(%)	Cant	(%)
< E 50	< 40	< 3920	---	---	---	---	---	---
E 50	40 – 60	3920-5880	---	---	---	---	---	---
E 70	60 – 80	5880-7850	1	1,4	1	1,1	---	---
E 90	80 – 100	7850-9810	26	35,6	14	15,2	3	3,2
E 110	100 – 120	9810-11770	31	42,5	43	46,7	32	33,7
E 130	120 – 140	11770-13730	13	17,8	25	27,2	33	34,7
E 150	140 – 160	13730-15690	2	2,7	8	8,7	24	25,3
> E 150	> 160	> 15690	---	---	1	1,1	3	3,2
<b>Porcentaje de tablas de categoría estructural</b>				<b>98,6</b>		<b>98,9</b>		<b>100</b>



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



**Gráfico N° 24: Porcentaje de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS**

Se analizó el porcentaje de tablas BA-B-C que según la norma JAS calificarían como madera para uso estructural, discriminándolas también por la altura del fuste (primer, segunda y tercer troza). Recordemos que a partir de la categoría E 90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa) la madera sería apta para uso estructural. Vemos en el cuadro N° 18 que el mayor porcentaje de las tablas se concentra en las categorías E 110 y E 130 y que la mayoría de las tablas con valores altos se encuentran en las segundas y terceras trozas.

**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	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
BA	12	6	50,0	5	41,7	1	8,3	0	0,0	0	0,0
B	29	7	24,1	15	51,7	6	20,7	1	3,4	0	0,0
C	30	2	6,7	15	50,0	7	23,3	4	13,3	2	6,7
<b>Total</b>	<b>71</b>	<b>15</b>		<b>35</b>		<b>14</b>		<b>5</b>		<b>2</b>	

Troza 2		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
BA	31	13	41,9	11	35,5	7	22,6	0	0,0	0	0,0
B	32	4	12,5	14	43,8	10	31,3	3	9,4	1	3,1
C	34	1	2,9	12	35,3	11	32,4	9	26,5	1	2,9
<b>Total</b>	<b>97</b>	<b>18</b>		<b>37</b>		<b>28</b>		<b>12</b>		<b>2</b>	

Troza 3		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
BA	29	7	24,1	15	51,7	5	17,2	2	6,9	0	0,0
B	30	3	10,0	14	46,7	9	30,0	4	13,3	0	0,0
C	31	0	0,0	5	16,1	15	48,4	11	35,5	0	0,0
<b>Total</b>	<b>90</b>	<b>10</b>		<b>34</b>		<b>29</b>		<b>17</b>		<b>0</b>	

## 7.5 Ensayos en tablas obtenidas de la zona ensayada en los árboles en pie

Se estimó el módulo de elasticidad de 18 árboles en pie, mediante dos equipos no destructivos y de principio de funcionamiento similar, el Fakopp y el Sylvatest. En el aserrado de las trozas basales correspondientes a los 18 árboles ensayados en pie, se tuvo especial precaución para la obtención de tablas representativas de la madera ensayada en el árbol en pie. Estas tablas posteriormente fueron ensayadas en estado verde (recién aserradas) y en estado seco (secas en horno de secado). Se analizaron los resultados y las distintas relaciones entre equipos, estados y condiciones de la madera. En el cuadro N° 5 se presentaron los resultados (MOE) de los ensayos en árboles en pie.

### 7.5.1 **Módulo de Elasticidad de tablas obtenidas de la zona ensayada en los árboles en pie.**

Se presentan en este estudio los resultados de los ensayos en tablas en estado verde. Para la estimación del módulo de elasticidad mediante métodos no destructivos fueron utilizados los equipos FFT Analyzer, Fakopp y Sylvatest.

En el cuadro N° 19 se presentan los valores promedio del módulo de elasticidad de 18 tablas (2"x 6") en estado verde provenientes de las 18 trozas basales y obtenidas de la zona periférica, lugar donde se realizó el ensayo en el árbol en pie.

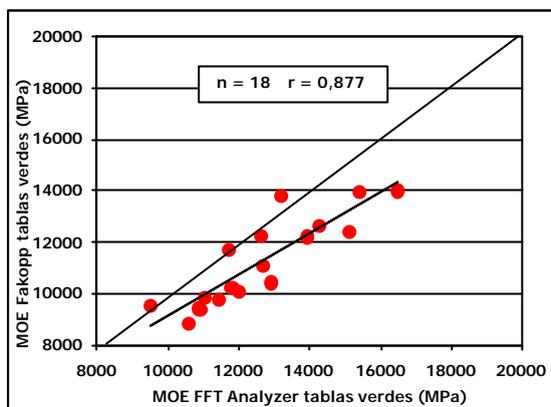
**Cuadro N° 19: Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer, Fakopp, Sylvatest) de tablas verdes 2"x 6"**

	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Fakopp (MPa)	MOE Sylvatest (MPa)
Número	18	18	18
<b>Promedio</b>	<b>12593</b>	<b>11185</b>	<b>14969</b>
Máximo	16502	13982	18961
Mínimo	9500	8800	11678
STD	1870	1706	2469
CV (%)	14,8	15,3	16,5

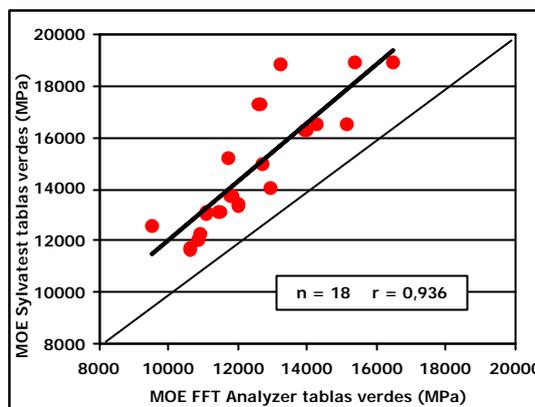
### 7.5.2 **Relación entre el Módulo de Elasticidad de árboles en pie y el Módulo de Elasticidad de tablas verdes en ensayo de flexión en Máquina Universal**

En los gráficos N° 25 y 26 podemos observar la relación que existe entre los valores de módulo de elasticidad estimados mediante los tres equipos no destructivos de 18 tablas en condición verde. El FFT Analyzer es el equipo no destructivo cuyos resultados correlacionan mejor con los valores obtenidos en el ensayo destructivo de flexión estática en máquina universal (método que utilizamos como de referencia) para la determinación del módulo de elasticidad. Por esta razón es que lo utilizamos para correlacionar con el Fakopp y el Sylvatest; estos últimos son muy prácticos, portátiles y se pueden utilizar en árboles en pie, en tablas y en trozas también. Generalmente los valores promedio de MOE estimados por el Fakopp y el Sylvatest son superiores a los valores promedio obtenidos con el FFT Analyzer y con el ensayo de flexión en máquina universal; esta diferencia que hemos observado en varios estudios es del orden de un

10 y un 20 % respectivamente. En el gráfico N° 25 no se cumple con lo dicho anteriormente, mientras que si se cumple en el caso del gráfico N° 26 en que los valores promedio del MOE Sylvatest son sensiblemente superiores.

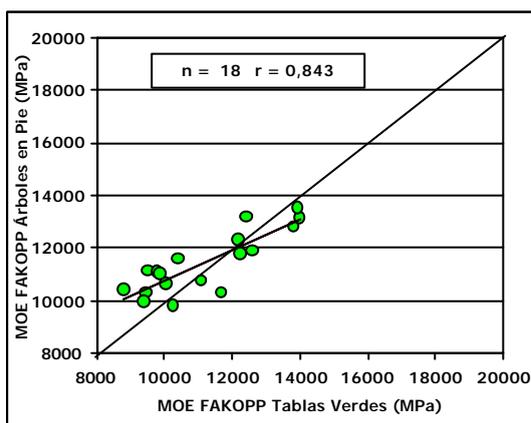


**Gráfico N° 25: Relación entre el MOE FFT Analyzer y MOE Fakopp (tablas verdes)**

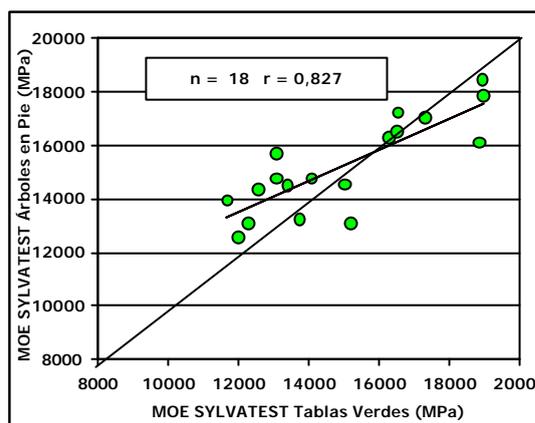


**Gráfico N° 26: Relación entre el MOE FFT Analyzer y MOE Sylvatest (tablas verdes)**

En los gráficos N° 27 y 28 podemos ver que existe relación entre las estimaciones del MOE mediante los equipos Fakopp y Sylvatest, entre árboles en pie y de las tablas verdes ( $r = 0,843$  y  $r = 0,827$  respectivamente).

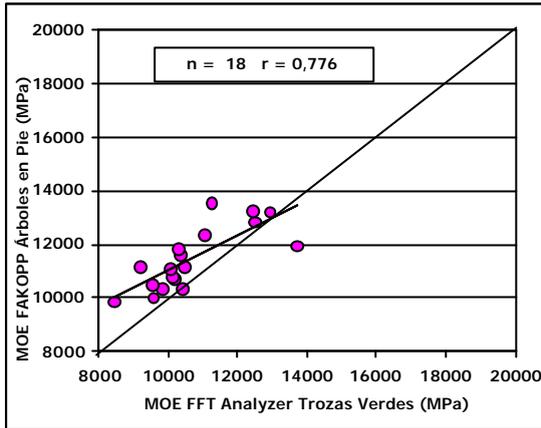


**Gráfico N° 27: Relación entre el MOE Fakopp del árbol en pie y el de las tablas verdes**

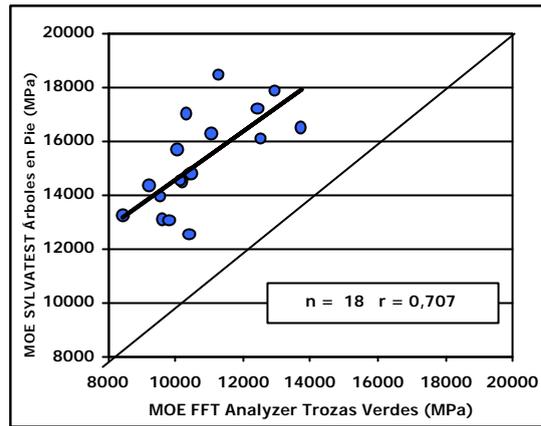


**Gráfico N° 28: Relación entre el MOE Sylvatest del árbol en pie y el de las tablas verdes**

En los gráficos N° 29 y 30 se puede ver la relación que existe entre el MOE estimado de árboles en pie mediante los equipos Fakopp y Sylvatest y el obtenido mediante el FFT Analyzer en trozas verdes recién apeadas.



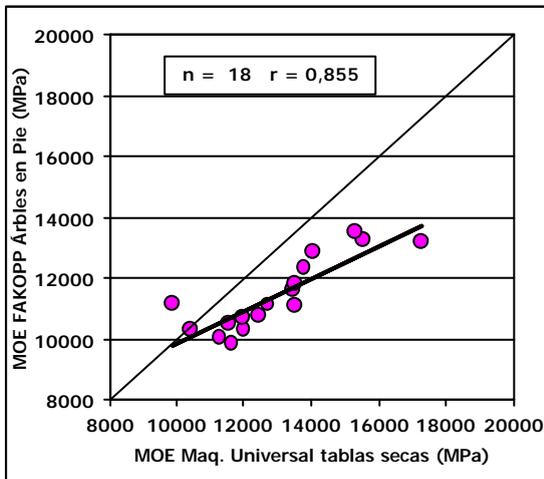
**Gráfico N° 29: Relación entre el MOE Fakopp de árbol en pie y MOE FFT Analyzer de trozas verdes**



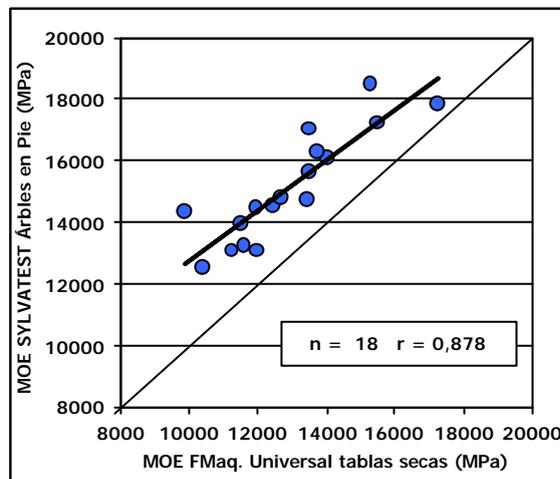
**Gráfico N° 30: Relación entre el MOE Sylvatest de árbol en pie y MOE FFT Analyzer de trozas verdes**

### 7.5.3 Relación entre el Módulo de Elasticidad de árboles en pie y el Módulo de Elasticidad de tablas secas en Máquina Universal

En este trabajo también se estudió la relación entre el módulo de elasticidad de árboles en pie y el obtenido mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal en tablas secas. Al igual que en el análisis de la relación entre el MOE no destructivo de árboles en pie (Fakopp y Sylvatest) y tablas verdes (recién aserradas) ensayadas por el método no destructivo FFT Analyzer, existe relación entre el MOE (Fakopp y Sylvatest) de árboles en pie y la determinación del MOE (Máq. Universal) en tablas secas. (Gráficos N° 31 y 32)

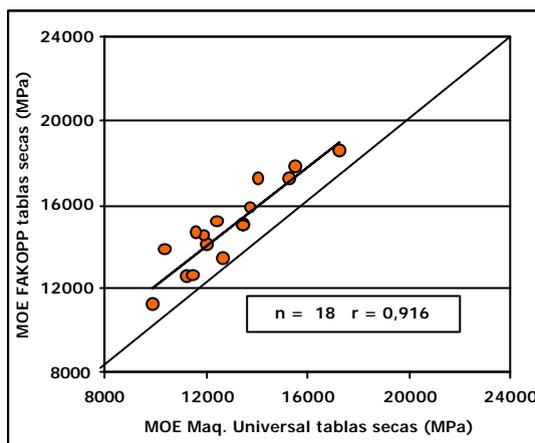


**Gráfico N° 31: Relación entre el MOE Fakopp de árbol en pie y el MOE Máq. Universal de tablas secas**

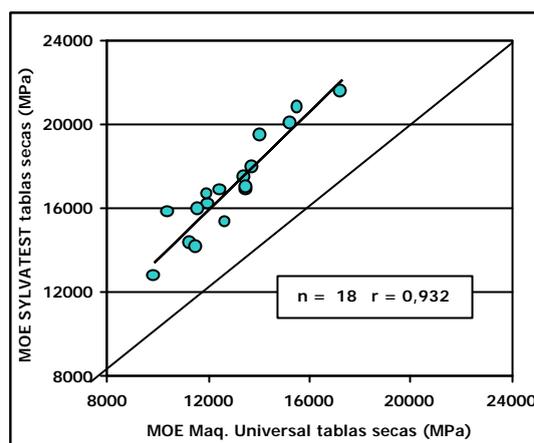


**Gráfico N° 32: Relación entre el MOE Sylvatest de árbol en pie y MOE Máq. Universal de tablas secas**

También se observa que existe relación entre los MOE Fakopp y Sylvatest de tablas secas y el MOE de las mismas tablas en ensayo de flexión en máquina universal  $r = 0,916$  y  $r = 0,932$  respectivamente.



**Gráfico N° 33: Relación entre el MOE Fakopp de tablas secas y el MOE Máq. Universal de tablas secas**



**Gráfico N° 34: Relación entre el MOE Sylvastest de tablas secas y el MOE Máq. Universal de tablas secas**

## 7.6 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos

A partir de los sobrantes sanos de las tablas de 2,8 m x 150 mm x 50 mm (2"x 6") ensayadas anteriormente se confeccionaron pequeñas probetas libres de defectos, para realizar los ensayos mecánicos destructivos de flexión estática para determinar el módulo de elasticidad y el módulo de rotura, de flexión dinámica o resistencia al impacto y la dureza Janka.

Las probetas fueron acondicionadas en una cámara climatizada (en condiciones de 20° C de temperatura y 65 % de humedad relativa) para lograr un contenido de humedad cercano a 12%; se determinó el equilibrio de humedad en la madera mediante pesadas consecutivas hasta llegar a peso constante. El contenido de humedad promedio de las probetas en el momento del ensayo fue de 11,6%.

### 7.6.1 Resumen de las propiedades mecánicas

Los cuadros Nros. 20 y 21 que siguen a continuación muestran los promedios de las propiedades estudiadas para las pequeñas probetas libres de defectos provenientes de las tablas de todas las ubicaciones en radio "BA", "B" y "C", como también de todas las alturas.

**Cuadro N° 20: Resumen de las propiedades mecánicas MOE y MOR de pequeñas probetas libres de defectos**

	FLEXIÓN ESTÁTICA			
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Dens. Ap. Corr. (g/cm <sup>3</sup> )	Cont. de Humedad (%)
Número	259	259	259	259
<b>MEDIA</b>	<b>13214</b>	<b>85,4</b>	<b>0,496</b>	<b>12,0</b>
Máximo	23078	135,0	0,694	13,1
Mínimo	7529	26,7	0,328	10,8
Desvío std.	3042	21,7	0,076	0,5
<b>CV (%)</b>	<b>23,0</b>	<b>25,4</b>	<b>15,3</b>	<b>3,9</b>

**Cuadro N° 21: Resumen de las propiedades mecánicas Flexión Dinámica y Dureza Janka de pequeñas probetas libres de defectos**

	FLEXIÓN DINÁMICA		DUREZA JANKA		
	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )	Radial (MPa)	Tangencial (MPa)	Transversal (MPa)	
Número	251	259	259	259	
<b>MEDIA</b>	<b>3,92</b>	<b>32,0</b>	<b>38,8</b>	<b>54,1</b>	
Máximo	9,80	66,8	95,2	104,7	
Mínimo	1,04	11,5	17,0	29,3	
Desvío std	1,87	11,1	14,7	12,2	
<b>CV (%)</b>	<b>47,7</b>	<b>34,8</b>	<b>37,9</b>	<b>22,5</b>	

En los valores promedio de dureza se observa la tendencia esperable, la dureza transversal es mayor que la tangencial y ésta 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 la dureza radial y tangencial son altos.

### 7.6.2 Variación de las propiedades mecánicas según su ubicación en el radio

El comportamiento mecánico y de la densidad aparente corriente de las pequeñas probetas libres de defectos acompaña lo observado para las tablas de tamaño estructural, aumentando a medida que la probeta se aleja de la médula.

Recordemos las características particulares de la madera de eucalipto (porosidad difusa, largo de fibra, etc.) que hacen que las propiedades no tengan grandes variaciones entre la madera ubicada cerca de la médula, madera intermedia y madera cercana a la corteza, que a diferencia de la madera de los pinos, con características anatómicas, estructurales diferentes y la gran influencia de la presencia de madera juvenil, todo lo expuesto hace que existan variaciones importantes de las propiedades de acuerdo a la ubicación en el radio (Ver Cuadros Nros. 22, 23 y 24)

**Cuadro N° 22: Propiedades mecánicas MOE y MOR según su ubicación en el radio**

Probeta	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dens. Ap. Corr.(g/cm <sup>3</sup> )	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
BA	73	12250	18,5	71,4	23,2	0,445	11,8
B	91	13022	25,0	83,2	25,5	0,489	14,1
C	95	14137	22,0	98,3	18,5	0,543	12,9

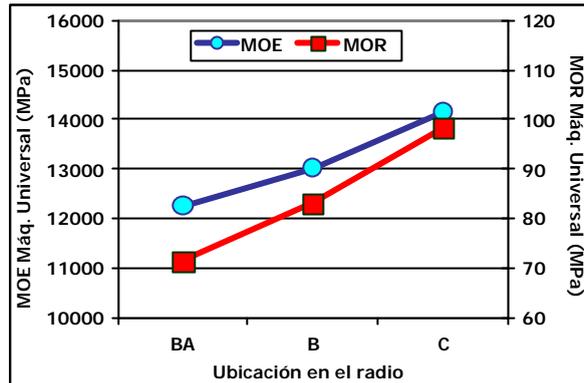
**Cuadro N° 23: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka Radial según su ubicación en el radio**

Probeta	N°	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )		Dureza Janka radial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)
BA	74	2,7	54,6	27,4	28,5
B	91	3,8	46,9	30,7	37,6
C	95	4,9	33,0	37,0	30,1

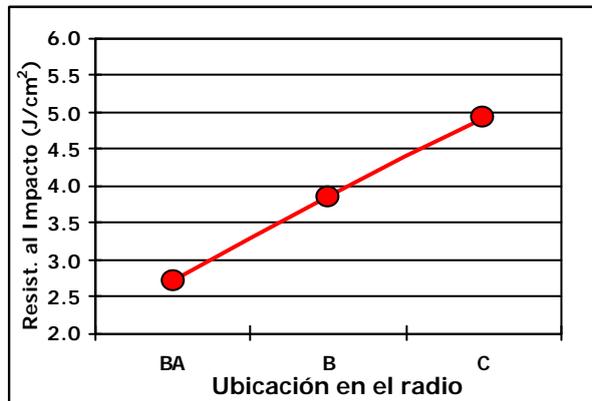
**Cuadro N° 24: Dureza Janka Tangencial y transversal según su ubicación en el radio**

Probeta	N°	Dureza Janka tangencial (MPa)		Dureza Janka transversal (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)
BA	74	33,1	34,4	50,3	16,9
B	91	36,5	32,9	52,6	22,9
C	95	46,5	34,5	59,1	22,0

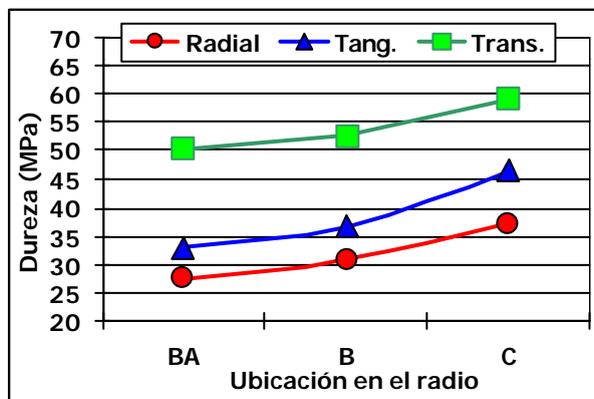
En los gráficos N° 35, 36 y 37 se puede ver claramente lo anteriormente mencionado, donde se ilustra la tendencia de las propiedades físicas y mecánicas en función de la ubicación en el radio.



**Gráfico N° 35: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio**



**Gráfico N° 36: Resistencia al Impacto según ubicación en el radio**



**Gráfico N° 37: Dureza radial, tangencial y transversal promedio según ubicación en el radio**

### 7.6.3 Variación de las propiedades mecánicas en la altura

Analizando la variación de las propiedades físicas y mecánicas en altura, se observó que el valor medio del módulo de elasticidad aumenta con la altura, comportamiento similar al observado en tablas de tamaño real; en cuanto al módulo de rotura el comportamiento es diferente el valor medio es superior en las primeras trozas y muy parecido en las segundas y terceras trozas. Los valores medios de la densidad aparente corriente se comportan igual que el MOR superior en las primeras trozas y menores e iguales en las segundas y terceras trozas (Ver Cuadro N° 25 y Gráfico N° 38)

**Cuadro N° 25: Propiedades mecánicas MOE y MOR según su ubicación en altura**

Troza	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dens. Ap. Corr.(g/cm <sup>3</sup> )	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	71	12860	23,9	88,0	24,9	0,523	15,7
2	97	13266	24,5	84,0	27,2	0,486	15,2
3	91	13434	20,7	84,9	24,0	0,487	14,2

El resto de las propiedades estudiadas presentan el mismo comportamiento que el de la densidad aparente corriente y el MOR, mayor valor medio en las primeras trozas y muy similar o igual en las segundas y terceras trozas. La resistencia al impacto o flexión dinámica presento el mayor valor medio en las segundas trozas y muy similar en las primeras y terceras trozas. (ver Cuadros Nros 26 y 27 y gráficos Nros. 39 y 40)

**Cuadro N° 26: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka Radial según su ubicación en altura**

Probeta	N°	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )		Dureza Janka radial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	71	4,0	49,5	34,9	36,5
2	97	3,6	45,8	31,0	34,2
3	92	4,2	47,3	31,0	32,5

**Cuadro N° 27: Dureza Janka Tangencial y Transversal según su ubicación en altura**

Probeta	N°	Dureza Janka tangencial (MPa)		Dureza Janka transversal (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	71	42,5	43,3	57,4	25,0
2	97	36,8	34,6	53,1	21,4
3	92	37,9	33,9	52,6	20,2

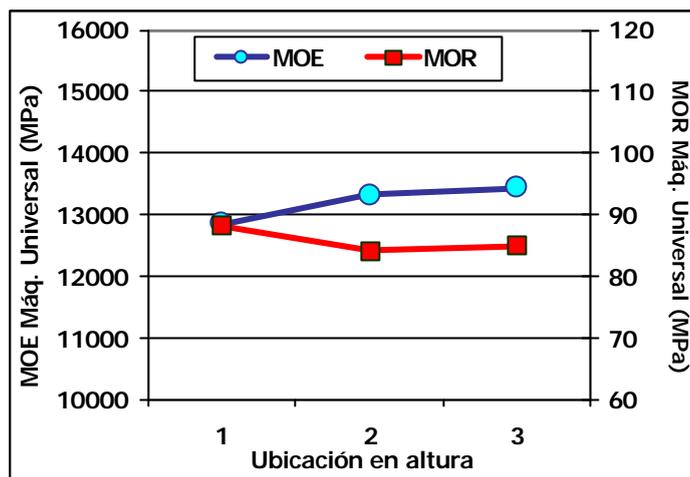


Gráfico N° 38: MOE y MOR promedio según ubicación en altura

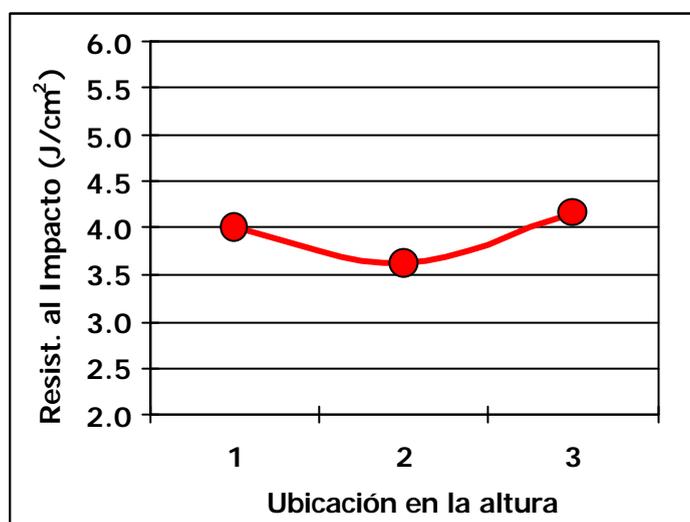


Gráfico N° 39: Resistencia al Impacto según ubicación en altura

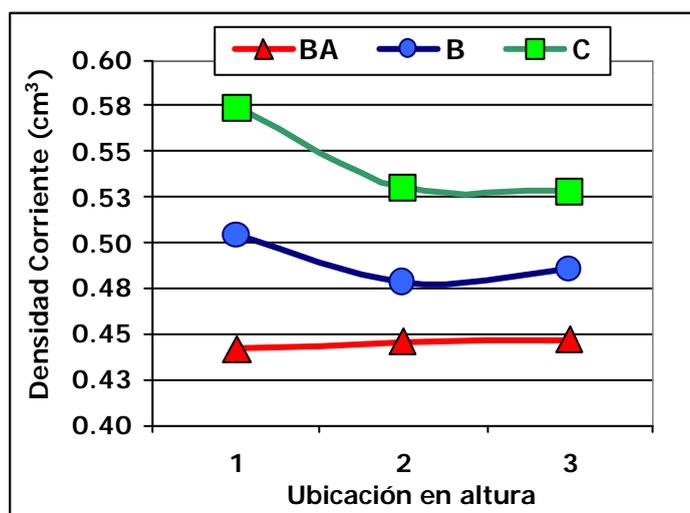


Gráfico N° 40: Dureza radial, tangencial y transversal promedio según ubicación en altura

### 7.6.4 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.

El comportamiento de los valores medios de MOE radial en las tres alturas fue similar, pero en las ubicaciones "BA" y "B" de la primer troza los valores son menores y sensiblemente menores en la ubicación "B". (Gráfico N° 41)

El comportamiento de los valores medios de MOR radial en las tres alturas es muy similar en las tres alturas (Gráfico N° 42) salvo en la ubicación "BA" de la tercer troza que es levemente superior a las dos otras ubicaciones.

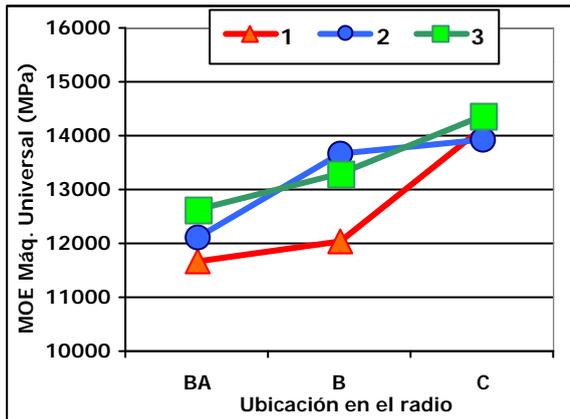


Gráfico N° 41: MOE promedio por altura según ubicación en el radio

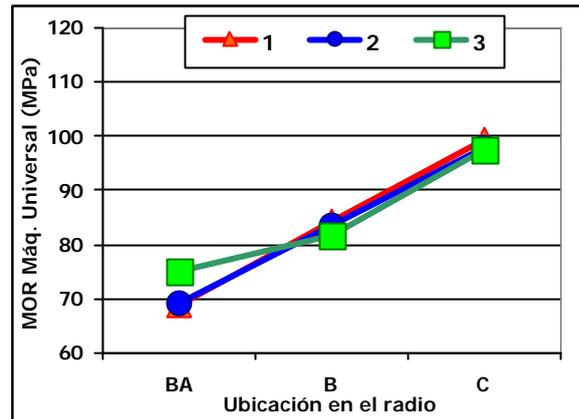


Gráfico N° 42: MOR promedio por altura según ubicación en el radio

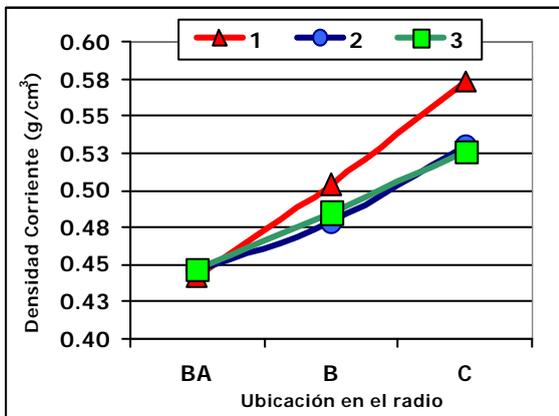


Gráfico N° 43: Densidad Ap. Corr. por altura según ubicación en el radio

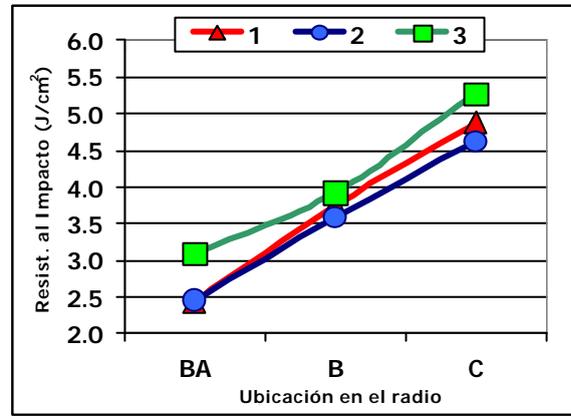


Gráfico N° 44: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio

El comportamiento de los valores medios de la densidad aparente corriente es similar en la segunda y tercer troza con valores promedio prácticamente iguales, es diferente el comportamiento de las primeras trozas cuyos valores promedio aumentan en las ubicaciones "B" y "C"; dicho comportamiento seguramente es debido a la edad de los árboles y la influencia que esta tiene en la primer troza. (gráfico N° 43)

En cuanto al comportamiento de la resistencia al impacto (el comportamiento) es similar en las tres alturas salvo en las ubicaciones "BA" y "C" de las terceras trozas donde los valores promedio fueron superiores, además esta propiedad por las características del ensayo (flexión dinámica), en general presenta coeficientes de variación altos. (gráfico N° 44)

Las durezas Janka radiales, tangenciales y transversales presentan el mismo comportamiento, aumentando los valores medios a medida que nos aproximamos a la corteza. Las segundas y terceras trozas se comportan de forma similar, las primeras trozas presentan valores más bajos en la ubicación "BA" y más altos en la ubicación "C", hecho que se observó también en la densidad aparente corriente. (Gráficos Nros. 45, 46 y 47)

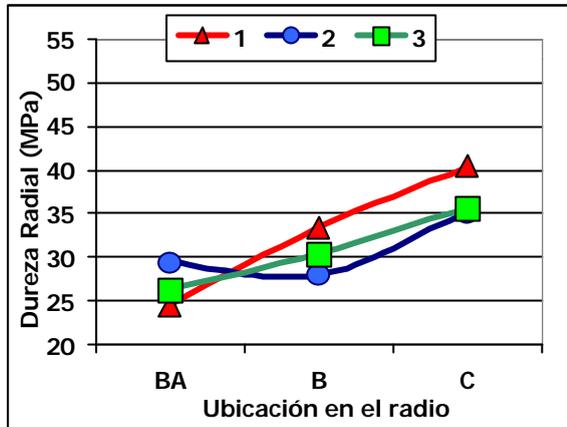


Gráfico N° 45: Dureza radial por altura según ubicación en el radio

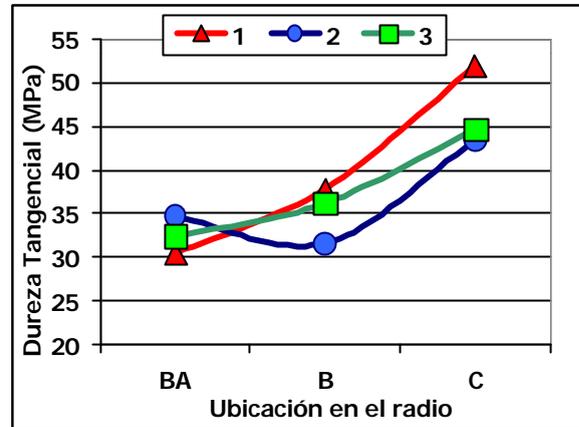


Gráfico N° 46: Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio

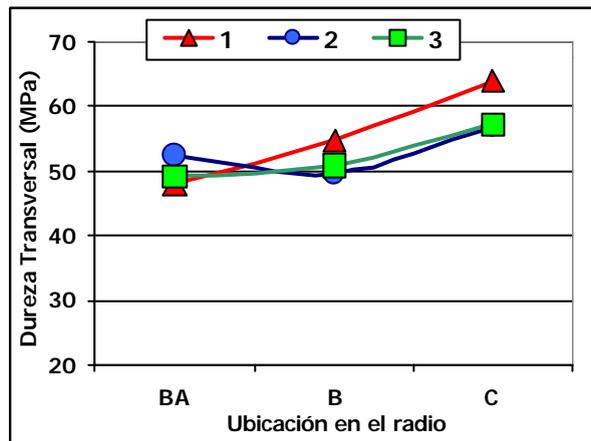


Gráfico N° 47: Dureza transversal por altura según ubicación en el radio

### 7.6.5 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.

En todas las propiedades estudiadas se observaron diferencias importantes entre los valores promedio de cada ubicación en el radio y no variando en general según la ubicación en la altura del fuste. (ver gráficos Nros. 48 al 54)

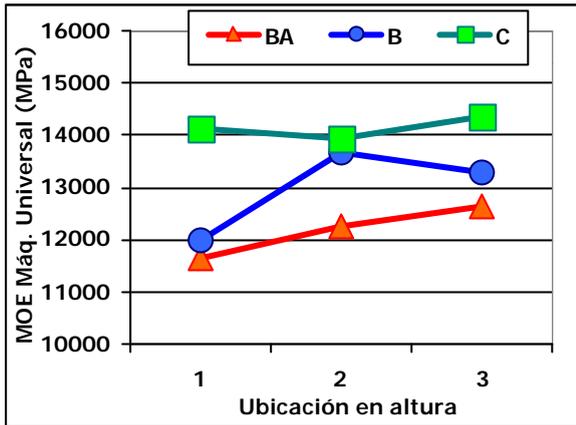


Gráfico N° 48: MOE promedio por ubicación en el radio según altura

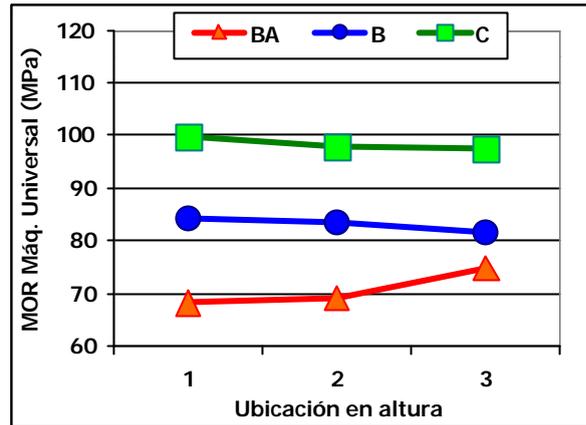


Gráfico N° 49: MOR promedio por ubicación en el radio según altura

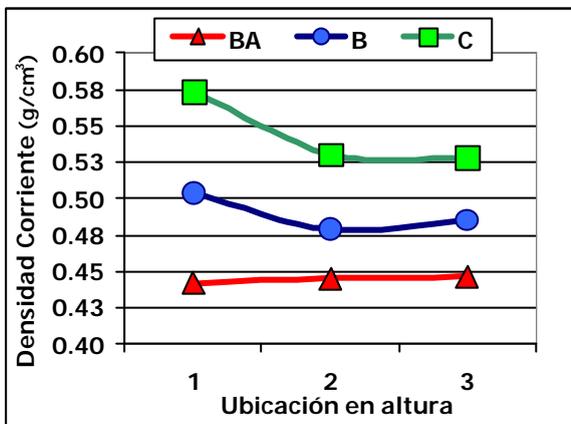


Gráfico N° 50: Dens. Ap. Corr. por ubicación en el radio según altura

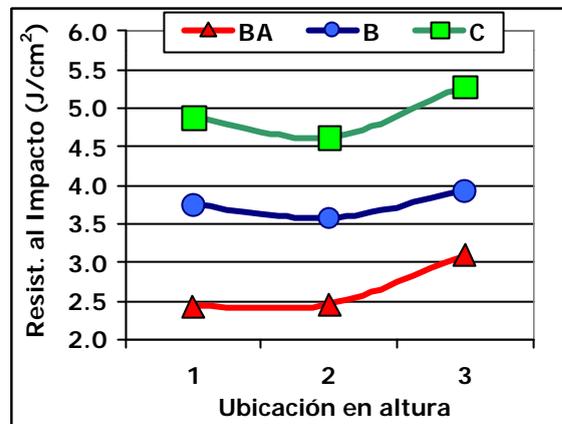


Gráfico N° 51: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura

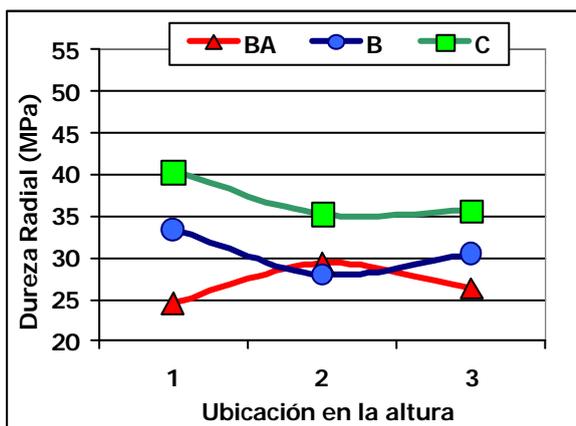


Gráfico N° 52: Dureza radial por ubicación en el radio según altura

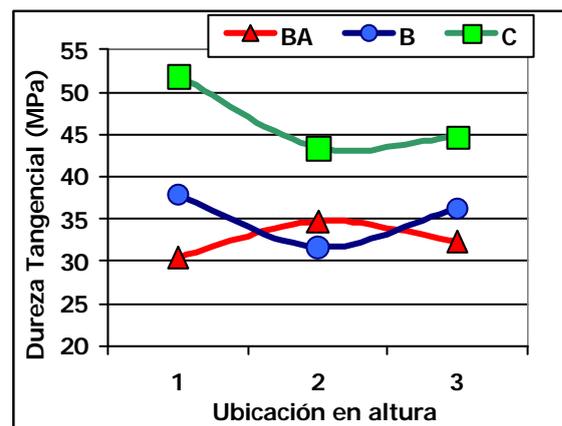


Gráfico N° 53: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura

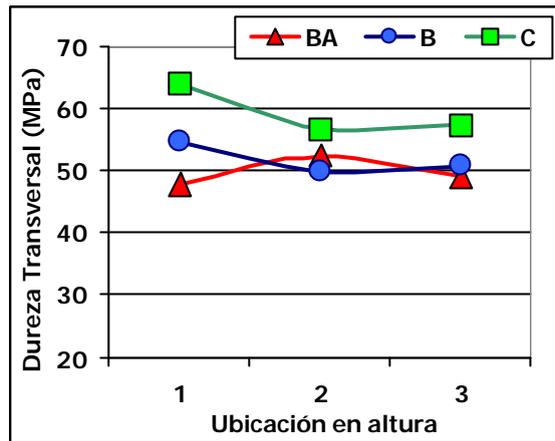


Gráfico N° 54: Dureza transversal por ubicación en el radio según altura

### 7.7 Relación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas

Se buscaron analizar las correlaciones de las distintas propiedades mecánicas entre ellas y también con la densidad corriente. A continuación se muestran los coeficientes de correlación  $r$  entre las distintas propiedades.

En las gráficas N° 55 y 56 vemos la relación que existe entre los valores obtenidos de 259 ensayos de flexión estática, del MOE con el MOR en pequeñas probetas libres de defectos ( $r = 0,603$ ) y el MOE con la densidad aparente corriente ( $r = 0,599$ ). En estudios anteriores del Grupo Técnico de Madera Aserrada sobre *E. grandis* se observaron relaciones muy similares a las del presente trabajo.

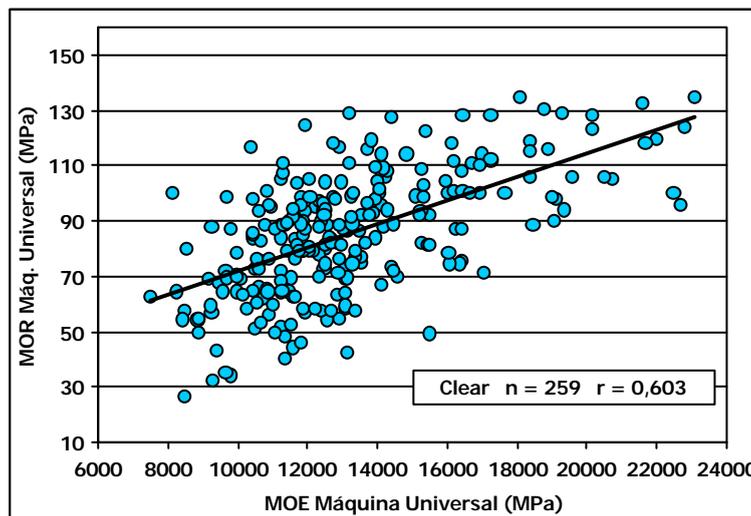
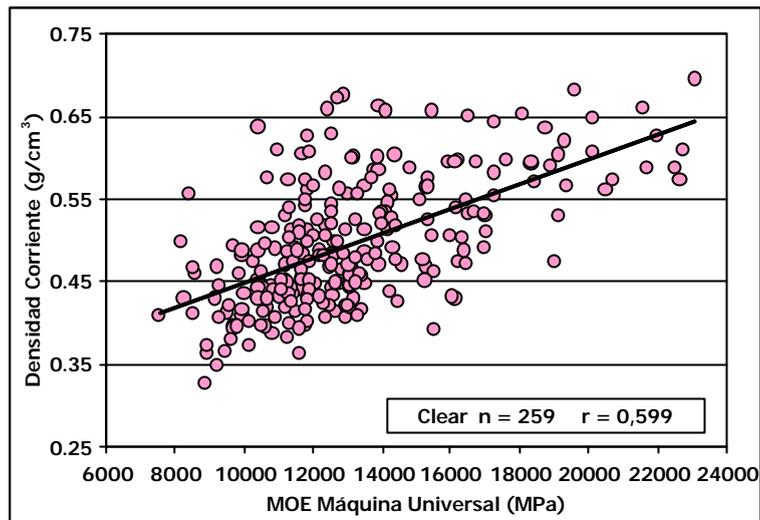
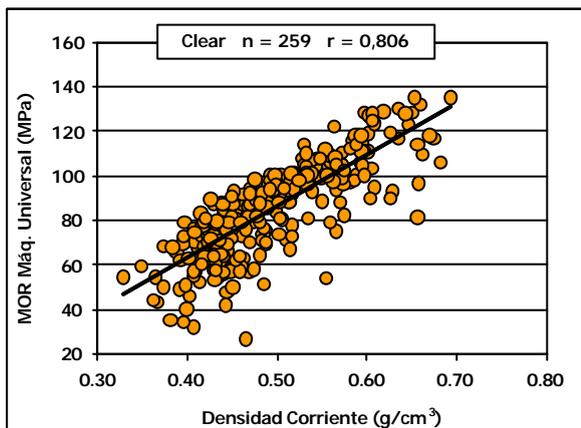


Gráfico N° 55: Relación entre el MOE y el MOR en probetas clear

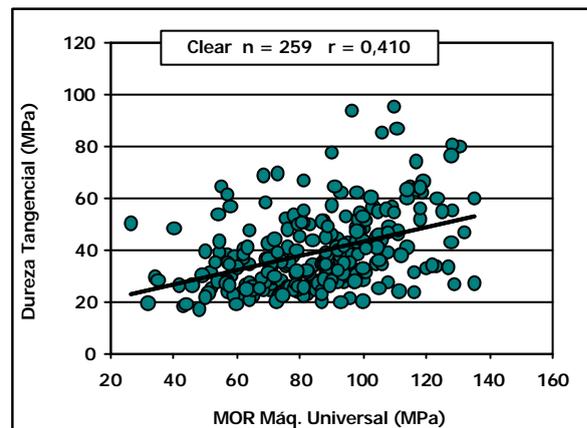


**Gráfico N° 56: Relación entre la Dens. Ap. Corr. y el MOE en probetas clear**

En cuanto a la relación entre la densidad aparente corriente y el MOR, está es mayor que en las propiedades anteriores, posiblemente por que evaluamos una sección entera de la probeta previamente ensayada y esta propiedad está directamente relacionada con la densidad. (Gráfico N° 57). Aunque sería esperable que ocurriera lo mismo para la dureza (Gráficos N° 58, 59, 60 y 61) no ocurre así y la relación es significativamente menor.



**Gráfico N° 57: Relación entre la Densidad Corriente y el MOR en probetas clear**



**Gráfico N° 58: Relación entre la Dureza Tangencial y el MOR en probetas clear**

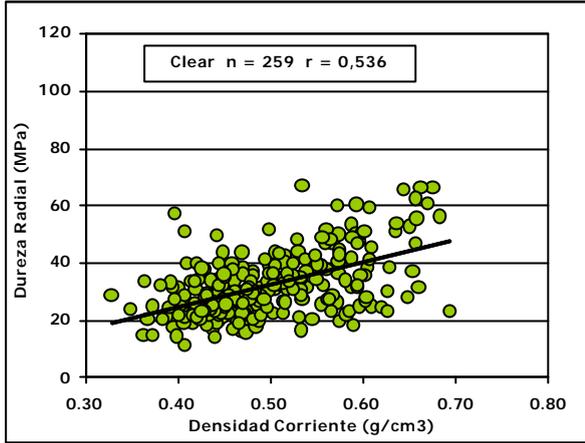


Gráfico N° 59: Relación entre la Dureza Radial y la Dens. Ap. Corr. en probetas clear

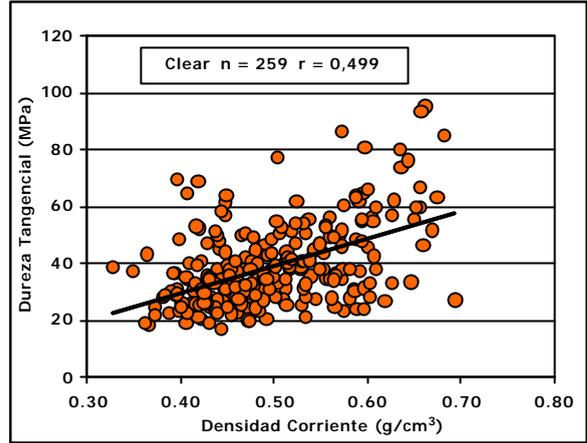


Gráfico N° 60: Relación entre la Dureza Tangencial y la Dens. Ap. Corr. en probetas clear

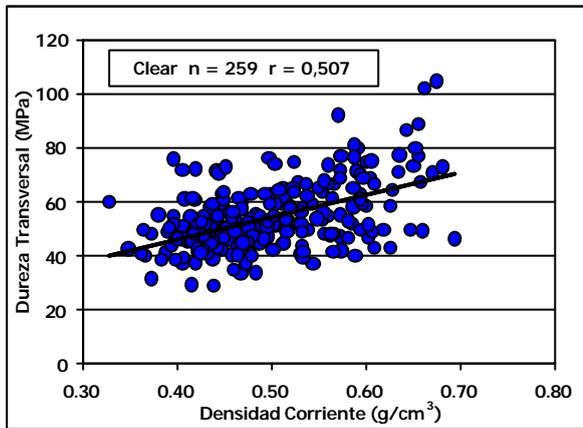


Gráfico N° 61: Relación entre la Dureza Transversal y la Densidad Apa. Corriente en probetas clear

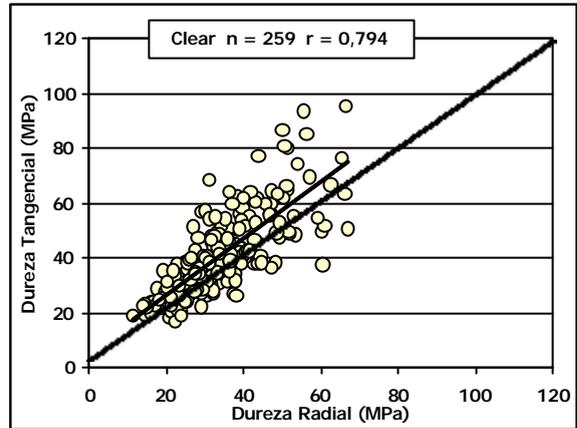


Gráfico N° 62: Relación entre la Dureza Tangencial y la Radial en probetas clear

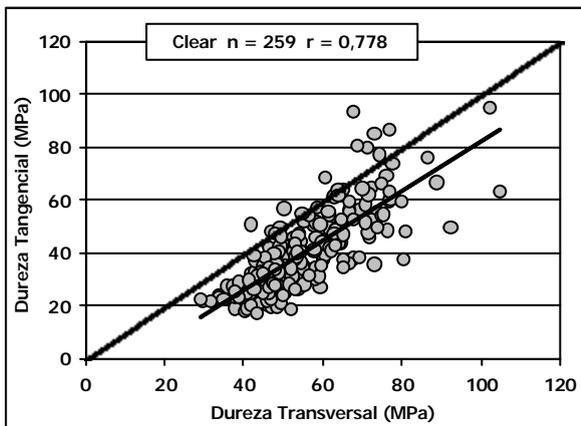


Gráfico N° 63: Relación entre la Dureza Tangencial y la Transversal en probetas clear

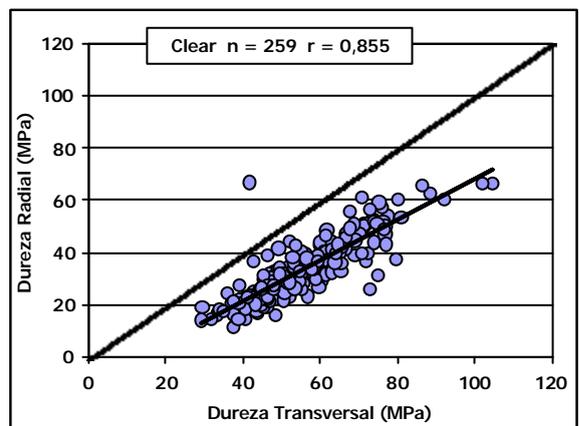


Gráfico N° 64: Relación entre la Dureza Radial y la Transversal en probetas clear

En el cuadro N° 28 representamos la relación que existe entre las diferentes propiedades mecánicas y físicas. Vemos destacados aquellos valores de r que tienen alguna significación, y los de mayor correlación son la dureza radial y transversal  $r= 0,855$ , la densidad aparente corriente con el módulo de rotura  $r= 0,806$ , la dureza radial con la dureza tangencial  $r= 0,794$ , la dureza tangencial con la transversal  $r= 0,778$ . En trabajos anteriores hemos observado que las correlaciones son similares a las de este estudio.

**Cuadro N° 28: Relaciones entre las distintas propiedades**

N = 259	MOE	MOR	Resist. al Impacto	Dureza Radial	Dureza Tangen.	Dureza Transv.	Dens. Ap. Corr.
MOE	1	0,603	0,152	0,245	0,195	0,238	0,599
MOR		1	0,336	0,415	0,410	0,190	0,806
Resist. al Impacto			1	0,427	0,294	0,245	0,311
Dureza Radial				1	0,794	0,855	0,536
Dureza Tangencial					1	0,778	0,499
Dureza Transversal						1	0,507
Dens. Ap. Corriente							1

### **7.8 Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos**

Se analizó la relación entre los valores obtenidos de las probetas clear y de las tablas para todas las ubicaciones en el radio "BA", "B" y "C" y en la altura hasta 12 metros; se eliminó en el aserrado las tablas con médula y por consiguiente su influencia negativa en los valores de resistencia.

**Cuadro N° 29: Relación entre las propiedades mecánicas de tablas y las pequeñas probetas libres de defectos "BA", "B" y "C"**

	Probetas libres de defectos		Tablas	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Número	259	259	260	257
<b>Media</b>	<b>13214</b>	<b>85,4</b>	<b>11588</b>	<b>46,0</b>
Máximo	23078	135,0	16413	97,7
Mínimo	7529	26,7	7675	16,0
Desvío std	3042	21,7	1816	17,1
<b>CV (%)</b>	23,0	25,4	15,7	36,9

La correlación entre el MOE de las tablas y el MOE de las probetas clear fue de  $r = 0,518$ , la que podemos considerar de media a baja (Gráfica N° 65). Si se tiene en cuenta esto se puede decir que el MOE en este caso es una propiedad que es influenciada negativamente por las características de la madera de tamaño estructural, siendo el valor promedio de MOE de las probetas libres de defectos un 14 % superior al promedio de las tablas o vigas. Esta diferencia en los valores promedio se ve acentuada en el MOR, esta propiedad es altamente influenciada por las características típicas de la madera como también por la presencia de defectos, siendo superiores los valores de las probetas libres de defectos en un 85,6 %. La relación de los valores de MOR entre tablas con los de las probetas libres de defectos fue muy similar a la del MOE  $r= 0,563$ .(Gráfico N° 66)

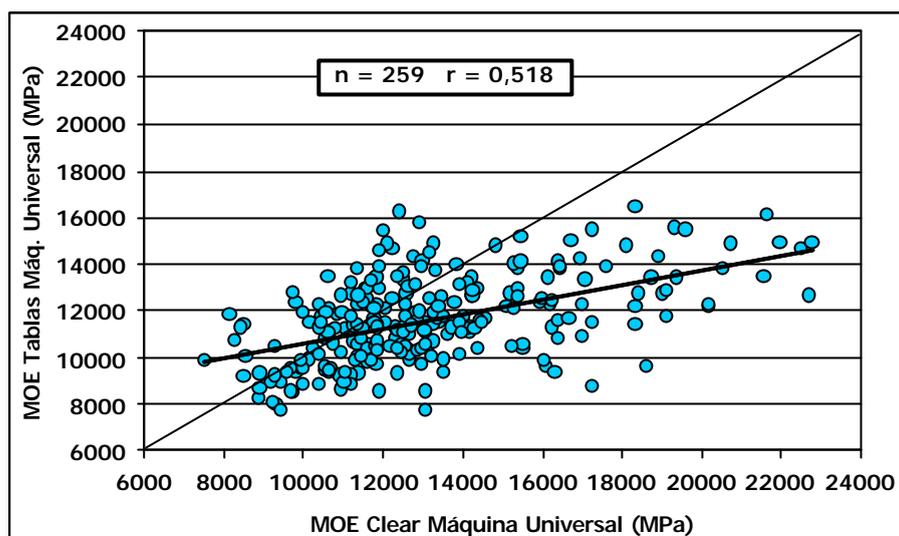


Gráfico N° 65: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

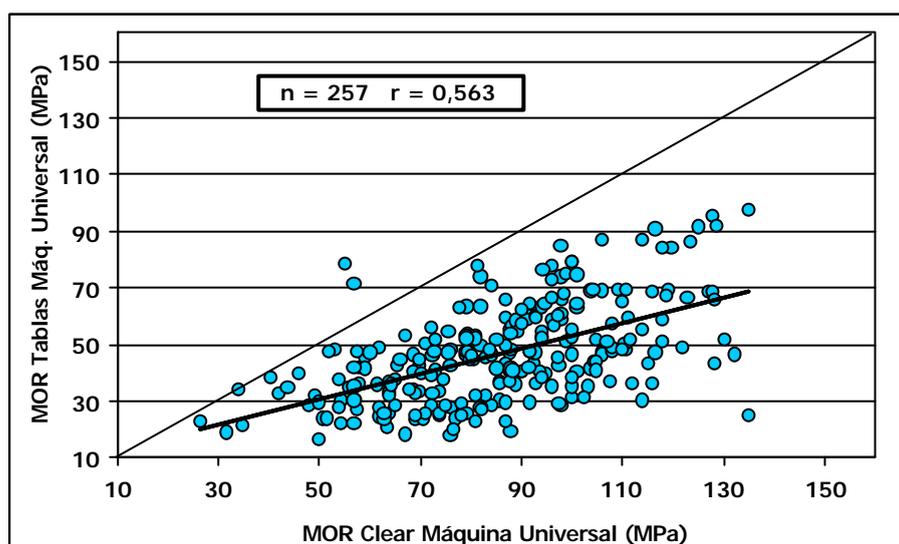


Gráfico N° 66: Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

En las gráficas presentadas a continuación (Nros. 67 y 68) vemos la relación entre el MOR y el MOE de las tablas 2"x 6" ( $r = 0,566$ ) y la relación entre el MOR y el MOE de las probetas clear ( $r = 0,603$ ) 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 también la dispersión de los valores y en qué zona se agrupan para las dos propiedades.

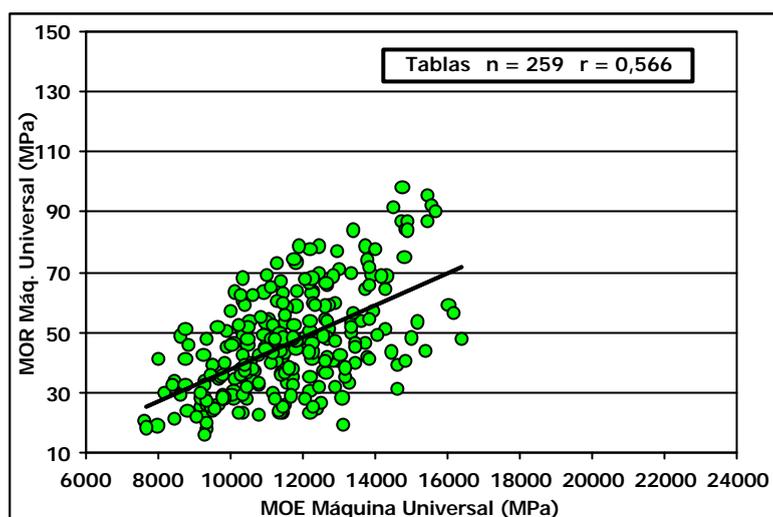


Gráfico N° 67: Relación entre el MOR y el MOE en tablas de 2"x 6"

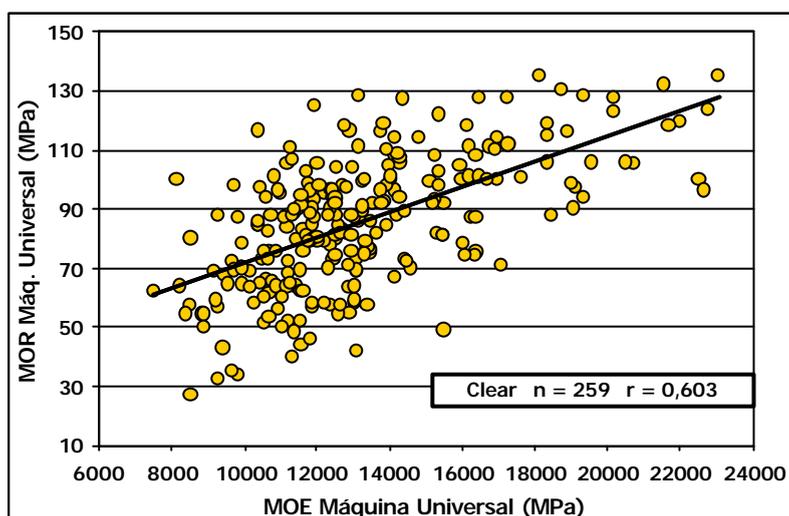


Gráfico N° 68: Relación entre el MOR y el MOE en probetas clear

**7.9 Coefficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas de tamaño real y pequeñas probetas libres de defectos**

Presentamos en este capítulo los coeficientes de variación de las distintas propiedades físicas y mecánicas de los ensayos realizados en árboles en pie, trozas, tablas de tamaño real y en pequeñas probetas libres de defectos y los valores promedio de estos coeficientes para cada una de las propiedades ensayadas (Cuadros Nros. 30, 31, 32 y 33).

**Cuadro N° 30: Coeficientes de variación de las propiedades mecánicas de árboles en pie**

Propiedad	Tipo de ensayo	Coefficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad Fakopp	No destructivo	10,2
Módulo de Elasticidad Sylvatest	No destructivo	11,6

**Cuadro N° 31: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas en condición verde**

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad	No destructivo	9,6
Contenido de Humedad	Destructivo	16,0
Densidad Aparente Básica	Destructivo	13,2

**Cuadro N° 32: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a 11,7 % CH. promedio**

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad	No destructivo	16,3
Módulo de Elasticidad	Destructivo	15,7
Módulo de Rotura	Destructivo	36,9
Contenido de Humedad	Destructivo	5,3
Densidad Aparente Corriente	Destructivo	16,0

**Cuadro N° 33: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas libres de defectos a 11,6 % CH. promedio**

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad	Destructivo	23,0
Módulo de Rotura	Destructivo	25,4
Resistencia al Impacto	Destructivo	47,7
Dureza Radial	Destructivo	34,8
Dureza Tangencial	Destructivo	37,9
Dureza Transversal	Destructivo	22,5
Contenido de Humedad	Destructivo	3,9
Densidad Aparente Corriente	Destructivo	15,3

## 8 **BIBLIOGRAFÍA**

TUSET, R.; DURÁN, F./ Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización, Editorial Hemisferio Sur, 1986.

CORONEL, E./ Fundamento de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994.

OHTA, S.; WATANABE, H./ Mechanical Properties of juvenile wood in the stem of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), Japan Wood Research Society, 1968. 14 (5).

NAGAO, H.; NAKAI, T.; TANAKA, T./ Non destructive evaluation of bending and tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber, *Eighth International Nondestructive Testing of Wood Symposium, Proceedings*, Washington State Univ, and USDA Forest Products Lab., 1991.

PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S./ Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos, Informe de investigación N° 1, LATU-JICA, 2000.

O'NEILL, H./ Propiedades mecánicas de *Pinus taeda*, Métodos destructivos y no destructivos, Expoforesta, Pág. 15 a 24, 2000.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"./ Propiedades Mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay, Informe N° 1, Octubre 2002.

OLASO MARI, E.; "Estudio de la variación en las Propiedades Físicas y Mecánicas de E. Grandis (HILL) ex Maiden del Uruguay" 2002. Tesis Facultad de Agronomía.

PÉREZ DEL CASTILLO, A.; VENTURINO CAMAROTA, A.; "Resumen de Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* de Distintas Zonas del Uruguay" Informe de investigación N° 14, LATU-JICA, Setiembre 2003.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"./ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Litoral de Uruguay, Informe N° 2, Junio 2003.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"./ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Norte de Uruguay, Informe N° 3, Junio 2004.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Eucalipto "GT2"./ Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del Norte de Uruguay, Informe N° 4, Agosto 2004.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Eucalipto "GT2"./ Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* Maiden. del Norte de Uruguay, Informe N° 5, Junio 2005.

OHTA, S.; O'NEILL, H.; TARIGO, F.; "Evaluation of Mechanical Properties in Standing Trees and Sawing Boards on Fast Growth Plantation *Eucalyptus grandis* in Uruguay" IUFRO Working Party 5.01.04 Wood Quality Modelling, 27 and 28 November 2005, Waiheke Island Resort, New Zealand.

## FICHA TÉCNICA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Especie : *Eucalyptus grandis* Maiden

Ensayos realizados en 30 árboles de 26 años de edad  
Localidad de origen: Blanquillo, Durazno.

### Propiedades Físicas

Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Densidad Aparente Básica	ASTM D 2395 Method B-III	g/cm <sup>3</sup>	0,451
Densidad Aparente Corriente	ASTM D 2395 Method A	g/cm <sup>3</sup>	0,504

### Propiedades Mecánicas

No destructiva en trozas verdes sin corteza de 4 m de longitud (valores promedio de 1<sup>ras</sup>, 2<sup>das</sup> y 3<sup>ras</sup> trozas)

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	12633	Kgf/cm <sup>2</sup>	128821

En tablas dimensionadas (2.80 m x 150 mm x 50 mm) – CH = 11,7 %  
(203 Tablas BA, B y C de las 1<sup>ras</sup>, 2<sup>das</sup> y 3<sup>ras</sup> trozas)

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	14228	Kgf/cm <sup>2</sup>	145086
Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	11588	Kgf/cm <sup>2</sup>	118165
Módulo de Rotura (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	46,0	Kgf/cm <sup>2</sup>	469

En pequeñas probetas libres de defectos – CH = 11,6 %

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	13214	Kgf/cm <sup>2</sup>	134746
Módulo de Rotura (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	85,4	Kgf/cm <sup>2</sup>	870
Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)	JIS Z 2116 - 94	J/cm <sup>2</sup>	3,92	Kgf.m/cm <sup>2</sup>	0,40
Dureza Janka Radial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	32,0	Kgf	314
Dureza Janka Tangencial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	38,8	Kgf	380
Dureza Janka Transversal	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	54,1	Kgf	530

### TABLA DE CONVERSIÓN DE UNIDADES

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

### Sólo para Dureza Janka

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

## Índice de Figuras, Cuadros y Gráficos

Figuras	Página
N° 1: Muestreo y distribución de las trozas _____	2
N° 2 y 3: Estimación del módulo de elasticidad en árboles en pie , equipos Fakopp y Sylvatest _____	3
N° 4: Orden de realización de los trabajos en las trozas _____	4
N° 5: Esquema de preparación e identificación de las probetas _____	5
N° 6: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie ____	6
N° 7: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer_____	7
N° 8: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones BA- B-C en las trozas	8
N° 9: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6")_____	8
N° 10: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer _____	10
N° 11: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal_____	10
N° 12: Esquema y ensayo de Flexión Estática en 3 puntos en máquina universal_____	12
N° 13: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica) _____	13
N° 14 Ensayo de Dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio _____	14
N° 15 y 16 Tipo de rotura por tensión y compresión _____	23

Cuadros	Página
N° 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados _____	2
N° 2: Datos técnicos del rodal_____	3
N° 3: Raleos realizadas _____	3
N° 4: Grados de clasificación de las trozas _____	4
N° 5: Módulo de Elasticidad de árboles en pie _____	14
N° 6: Porcentaje de trozas según el grado a la que pertenecen _____	15
N° 7: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica_____	15
N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio _____	16
N° 9: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en altura _____	17
N° 10: MOE sin corteza (FFT Analyzer) según troza _____	19
N° 11: Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer) de las tablas en estado verde 2"x 6" _____	21
N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas en tablas secas (BA, B y C) _____	22
N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1°, 2° y 3° troza _____	22
N° 14: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio_____	25
N° 15: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en la altura _____	27
N° 16: Porcentaje de tablas según categoría JAS _____	30
N° 17: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS _____	31
N° 18: Porcentaje de tablas por ubicación en la altura y en el radio aptas para uso estructural según norma JAS _____	31
N° 19: Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer, Fakopp, Sylvatest) de tablas verdes 2"x 6" _____	32
N° 20: Resumen de las propiedades mecánicas del MOE y el MOR de pequeñas probetas libres de defectos_____	35
N° 21: Resumen de las propiedades mecánicas Flexión Dinámica y Dureza Janka de pequeñas probetas libres de defectos _____	36
N° 22: Propiedades mecánicas MOE y MOR según ubicación en el radio _____	36
N° 23: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka Radial según ubicación en el radio _____	36
N° 24: Dureza Janka Tangencial y Transversal según su ubicación en el radio _____	37
N° 25: Propiedades mecánicas MOE y MOR según su ubicación en altura _____	38
N° 26: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka Radial según su ubicación en la altura _____	38

N° 27:	Dureza Janka Tangencial y Transversal según su ubicación en la altura _____	38
N° 28:	Relación entre las distintas propiedades _____	46
N° 29:	Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y las pequeñas probetas libres de defectos "BA", "B" y "C" _____	46
N° 30:	Coefficientes de variación de las propiedades mecánicas de árboles en pie _____	48
N° 31:	Coefficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas en condición verde _____	49
N° 32:	Coefficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a 11,7 % CH. promedio _____	49
N° 33:	Coefficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas libres de defectos a 11,6 % CH. promedio _____	49

Gráficos	Página
----------	--------

N° 1:	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación radial _____	16
N° 2:	Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio _____	17
N° 3:	Densidad Básica por altura según ubicación en el radio _____	17
N° 4:	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura _____	18
N° 5:	Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura _____	18
N° 6:	Densidad Básica por probeta según ubicación en altura _____	18
N° 7:	Variación de los valores de MOE entre árboles _____	19
N° 8:	Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas sin corteza según la ubicación en altura _____	20
N° 9:	Relación entre el MOE y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) _____	20
N° 10:	Relación entre el MOE FFT Analyzer y la Densidad Aparente Básica (Condición verde) _____	20
N° 11:	Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer) _____	23
N° 12:	Relación entre el MOR y el MOE _____	24
N° 13:	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal) _____	24
N° 14:	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el Módulo de Rotura (Máquina Universal) _____	25
N° 15:	Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio _____	26
N° 16:	MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	26
N° 17:	MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	26
N° 18:	MOE y MOR según ubicación en altura _____	27
N° 19:	MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	28
N° 20:	MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	28
N° 21:	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas _____	28
N° 22:	Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "BA", "B" y "C" _____	29
N° 23:	Porcentaje de tablas ensayadas según categoría JAS _____	31
N° 24:	Porcentaje de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS _____	31
N° 25:	Relación entre el MOE FFT Analyzer y MOE Fakopp (tablas verdes) _____	33
N° 26:	Relación entre el MOE FFT Analyzer y MOE Sylvatest (tablas verdes) _____	33
N° 27:	Relación entre el MOE Fakopp del árbol en pie y el de las tablas verdes _____	33
N° 28:	Relación entre el MOE Sylvatest del árbol en pie y el de las tablas verdes _____	33
N° 29:	Relación entre el MOE Fakopp de árbol en pie y el MOE FFT Analyzer de trozas verdes _____	34
N° 30:	Relación entre el MOE Sylvatest de árbol en pie y el MOE FFT Analyzer de trozas verdes _____	34
N° 31:	Relación entre el MOE Fakopp de árbol en pie y el MOE Máq. Universal de tablas secas _____	34
N° 32:	Relación entre el MOE Sylvatest de árbol en pie y el MOE Máq. Universal de tablas secas _____	34
N° 33:	Relación entre el MOE Fakopp de tablas secas y el MOE Máq. Universal de tablas secas _____	35
N° 34:	Relación entre el MOE Sylvatest de tablas secas y el MOE Máq. Universal de tablas secas _____	35
N° 35:	MOE y MOR promedio según ubicación en el radio _____	37
N° 36:	Resistencia al Impacto según ubicación en el radio _____	37
N° 37:	Dureza radial, tangencial y transversal promedio según ubicación en el radio _____	37
N° 38:	MOE y MOR promedio según ubicación en altura _____	39
N° 39:	Resistencia al Impacto según ubicación en altura _____	39
N° 40:	Dureza radial, tangencial y transversal promedio según ubicación en la altura _____	39
N° 41:	MOE promedio por altura según ubicación en el radio _____	40
N° 42:	MOR promedio por altura según ubicación en el radio _____	40

N° 43:	Densidad Ap. Corriente por altura según ubicación en el radio _____	40
N° 44:	Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio _____	40
N° 45:	Dureza radial por altura según ubicación en el radio _____	41
N° 46:	Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio _____	41
N° 47:	Dureza transversal por altura según ubicación en el radio _____	41
N° 48:	MOE promedio por ubicación en el radio según altura _____	42
N° 49:	MOR promedio por ubicación en el radio según altura _____	42
N° 50:	Densidad Ap. Corriente por ubicación en el radio según altura _____	42
N° 51:	Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura _____	42
N° 52:	Dureza radial por ubicación en el radio según altura _____	42
N° 53:	Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura _____	42
N° 54:	Dureza transversal por ubicación en el radio según altura _____	43
N° 55:	Relación entre el MOE y el MOR en probetas clear _____	43
N° 56:	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el MOE en probetas clear _____	44
N° 57:	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el MOR en probetas clear _____	44
N° 58:	Relación entre la Dureza Tangencial y el MOR en probetas clear _____	44
N° 59:	Relación entre la Dureza Radial y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear _____	45
N° 60:	Relación entre la Dureza Tangencial y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear _____	45
N° 61:	Relación entre la Dureza Transversal y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear _____	45
N° 62:	Relación entre la Dureza Tangencial y la Radial en probetas clear _____	45
N° 63:	Relación entre la Dureza Tangencial y la Transversal en probetas clear _____	45
N° 64:	Relación entre la Dureza Radial t la Transversal en probetas clear _____	45
N° 65:	Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas _____	47
N° 66:	Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas _____	47
N° 67:	Relación entre el MOR y el MOE en tablas de 2" x 6" _____	48
N° 68:	Relación entre el MOR y el MOE en probetas clear _____	48



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

<http://www.latu.org.uy>

e-mails: [honeill@latu.org.uy](mailto:honeill@latu.org.uy), [ftarigo@latu.org.uy](mailto:ftarigo@latu.org.uy)