

**Proyecto de
Tecnología de Ensayo
de Productos Forestales
LATU-JICA
(1998-2003)**

**Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura
en Tablas de Tamaño Real
de *Pinus elliottii* del Sur de Uruguay**

**Modulus of Elasticity and Strength of Dimension Lumber
in *Pinus elliottii* from Southern Uruguay**

Ing. Agr. OF Alvaro Pérez del Castillo

**Informe de Investigación N°7
Agosto 2001**



TABLA DE CONTENIDOS

	Página
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	4
2. <u>MATERIALES Y METODOS</u>	5
2.1. DIFERENTES TIPOS DE MADERA EN CONÍFERAS.....	5
2.1.1. <u>Madera juvenil y madera adulta</u>	5
2.1.2. <u>Madera de compresión</u>	5
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA UTILIZADA.....	7
2.3. PREPARACIÓN DE LAS TABLAS A ENSAYAR.....	7
2.4. CLASIFICACIÓN DE LAS TABLAS.....	8
2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.....	9
2.5.1. <u>Medición del contenido de humedad y la densidad</u>	9
2.5.2. <u>Cálculo del MOE en trozas basales verdes</u>	10
2.5.3. <u>Cálculo del MOE en tablas verdes y tablas secas</u>	11
2.5.4. <u>Ensayo destructivo para el cálculo del MOR en tablas de tamaño real</u>	11
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	13
3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD.....	13
3.2. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE TROZAS.....	13
3.3. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE TABLAS.....	15
3.3.1. <u>Comparación entre madera de compresión y madera opuesta</u>	15
3.3.2. <u>Variación del MOE con el contenido de humedad</u>	17
3.3.3. <u>Ensayos realizados sobre tablas en estado verde</u>	18
3.3.4. <u>Ensayos realizados sobre tablas a un contenido de humedad del 9,7%</u>	19
3.3.4.1. Correlación entre diferentes métodos para cálculo de MOE.....	19
3.3.4.2. Correlación entre MOE y MOR.....	21
3.3.4.3. Correlación entre densidad y MOE.....	22
3.3.4.4. Diferencia entre madera juvenil y madera adulta.....	23
3.3.4.5. Variación del MOE entre los 18 árboles muestreados.....	24
4. <u>CLASIFICACIÓN DE LAS TABLAS SEGÚN NORMAS JAS</u>	26
5. <u>COMPARACIÓN DE <i>PINUS ELLIOTTII</i> CON OTRAS ESPECIES</u>	27
6. <u>CONCLUSIONES</u>	28
7. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	29

PRÓLOGO

El presente trabajo es el séptimo de la serie: “Informes de Investigación”, que reunirá estudios realizados como parte del “Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales” entre el Sector Productos Forestales del LATU y JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) en Montevideo, Uruguay desde 1998 hasta 2003.

Con esta serie el LATU pretende la difusión tecnológica como una contribución al desarrollo de la industria forestal.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Sadaaki Ohta por su apoyo técnico invaluable y su permanente colaboración.

Al Ing. Quím. Raúl de Castro, Jefe del Sector Producto Forestales, por su supervisión.

A Industrias Forestales ARAZATÍ S.A. por el apoyo recibido en la realización de esta investigación.

Al Sr. Harushi Kobayashi por su apoyo constante.

Al equipo técnico del Sector Productos Forestales del LATU.

MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE ROTURA EN TABLAS DE TAMAÑO REAL DE *PINUS ELLIOTTII* DEL SUR DE URUGUAY

RESUMEN

En este estudio se analizó la aplicación de diferentes métodos no-destructivos para la estimación del módulo de elasticidad (MOE) en trozas basales verdes, tablas verdes y tablas secas de *Pinus elliottii* proveniente del departamento de San José, al sur del Uruguay.

Posteriormente a la realización de los ensayos no-destructivos, se calculó el módulo de rotura (MOR) mediante el ensayo de flexión estática.

Se estudió la variación de las propiedades mecánicas dentro de los árboles (variación de médula a corteza) y la variación entre los diferentes árboles. Se observó el efecto que la madera juvenil y la madera de compresión tienen sobre los valores de MOE y MOR de las tablas.

PALABRAS CLAVE: *Pinus elliottii*, módulo de elasticidad, módulo de rotura, madera juvenil, madera de compresión.

SUMMARY

In this report, the possibility of application of six non-destructive methods for estimating the modulus of elasticity (MOE) in first logs, green boards and dry boards of *Pinus elliottii* from southern Uruguay, San José department, was analyzed.

After performing the non-destructive tests, the modulus of rupture (MOR) was calculated.

The variation of the mechanical properties within trees (variation from pith to bark) and the variation between trees was analyzed. The effect of juvenile wood and compression wood on MOE and MOR values was also studied.

KEY WORDS: *Pinus elliottii*, modulus of elasticity, modulus of rupture, juvenile wood, compression wood.

1. INTRODUCCIÓN.

El inicio de los programas de forestación en Uruguay data de más de 100 años. No obstante, la forestación de los bosques comerciales a plena escala recién comenzaron después de iniciarse las acciones de fomento en el marco de la nueva Ley Forestal (Ley 15939) promulgada en 1987. La superficie real forestada en los últimos años exceden las 60 mil hectáreas al año, y la superficie nacional de los bosques artificiales de las especies de crecimiento rápido de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus* han superado las 400 mil hectáreas en 1999.

Por su parte, el género *Pinus* representa alrededor del 17,6% del total forestado al año 1998, abarcando un área total de 76894 hectáreas. La superficie forestada con *Pinus elliottii* al año

1998 era de 29614 hectáreas, representando un 6,8% del total del área forestada en el territorio nacional.

La madera de *Pinus elliottii* ha sido utilizada durante muchos años para diversos usos finales, siendo la madera para construcción uno de los usos principales. No obstante, son pocos los estudios realizados sobre propiedades mecánicas de trozas y tablas de *Pinus elliottii*, y su variación entre y dentro de árboles. Es por eso que uno de los objetivos de este trabajo es conocer y categorizar la madera de *Pinus elliottii* por su resistencia mecánica. A su vez, se estudiará la variación entre madera juvenil y madera adulta, así como el efecto de la madera de compresión en la variación de la resistencia de la madera.

En este estudio, se estimó el módulo de elasticidad (MOE) de las trozas y las tablas en estado verde (por encima del punto de saturación de las fibras) por medio del método de frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer); se analizaron ocho métodos para la estimación del MOE en tablas secas (contenido de humedad promedio del 9,7%); y se midió el módulo de rotura (MOR) de dichas tablas.

Algunos de los métodos utilizados, son aptos para estimar el MOE en aserraderos o depósitos de madera. Esto sería aplicable para el caso que se desee realizar clasificación mecánica de diferentes productos de madera (trozas, vigas, tablas, etc.).

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. DIFERENTES TIPOS DE MADERA EN CONÍFERAS.

2.1.1. Madera juvenil y madera adulta.

La madera juvenil y la madera adulta se forman tanto en coníferas como en latifoliadas. En coníferas, la diferencia entre estos dos tipos de madera se presenta con mayor claridad.

La madera juvenil se define como la porción de xilema que rodea la médula en una columna cilíndrica cuyas células no han madurado totalmente (Ramsay, W.;1986).

La madera juvenil presenta importantes diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas con respecto a la madera adulta. Por más información acerca de la madera juvenil y la madera adulta, ver Perez, A; 2000.

2.1.2. Madera de compresión.

El patrón normal de crecimiento de los árboles forestales produce fustes erectos y verticales. Cuando los árboles son forzados fuera de este patrón, debido al viento o a fuerzas gravitacionales, se inclinan o se curvan formando en ciertas partes del fuste, tejido anormal. A esta madera se le denomina madera de reacción (Kollmann, F. y Coté, W.; 1968).

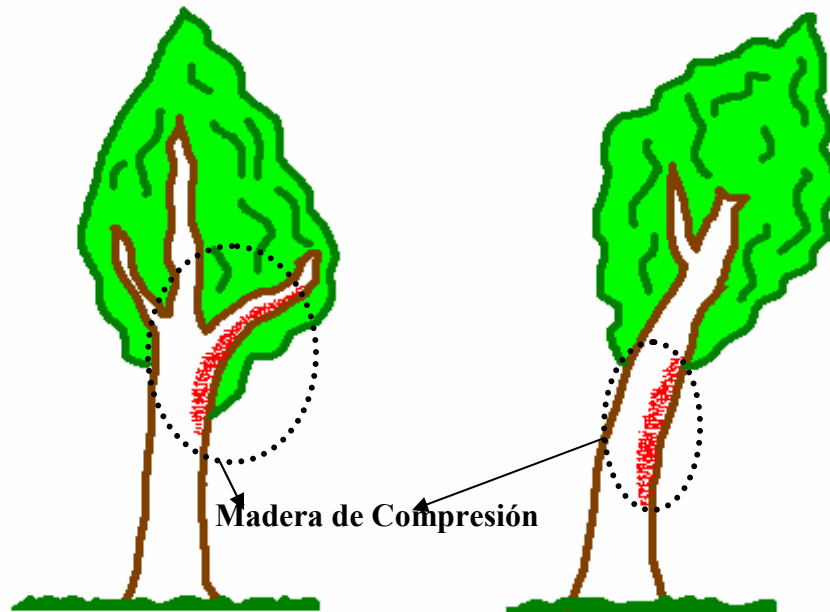


Figura N°1: Zonas donde se forma madera de compresión.

La madera de compresión, es el tipo de madera de reacción que ocurre en las coníferas (en latifoliadas se produce madera de tensión). La madera de compresión se presenta en la zona interna (comprimida) de árboles inclinados, o en la zona inferior de una rama gruesa (Ver Figura N°1). Sus características son:

- color diferente (más rojizo) que el de la madera normal;
- mayor proporción de leño tardío y, por lo tanto, un peso específico mayor;
- menor proporción de celulosa y mayor de lignina (inadecuada para la elaboración de pulpa de papel);
- menor longitud de traqueidas y mayor ángulo micro fibrilar (ángulo formado entre microfibrilla y eje axial de las traqueidas);
- contracción longitudinal de 10 a 20 veces mayor que la de la madera normal, por lo que este defecto hace a una pieza propensa a alabearse cuando pierde humedad. Mientras que la contracción longitudinal en madera normal es generalmente insignificante (0,1-0,2%), en madera de compresión puede llegar a 6 ó 7%;
- contracción tangencial y radial menores de lo normal;
- sus propiedades de resistencia mecánica son afectadas, sobre todo el módulo de elasticidad en flexión;
- resulta más difícil de trabajar que la madera normal.

La madera de compresión es más común en algunas especies que en otras. Muchas de las propiedades anatómicas, químicas, físicas y mecánicas de la madera de compresión difieren mucho de las propiedades de la madera normal. Quizás la variación más importante es la que se produce en la densidad. La densidad de la madera de compresión es comúnmente entre 30% y 40% mayor que la de la madera normal (Wood Handbook, USDA, 1999).

La madera de compresión, particularmente en condición verde, puede ser más resistente que la madera normal. No obstante, comparando con madera normal de igual densidad, la madera de compresión es definitivamente más débil (Wood Handbook, USDA, 1999).

Anatómicamente, en madera normal, las traqueidas de las coníferas generalmente aparecen como celdas cuadradas, rectangulares o poligonales en corte transversal; pero en madera de compresión, las traqueidas de algunas zonas del leño temprano presentan forma circular.

Como consecuencia, espacios intercelulares se forman en la conjunción de cuatro traqueidas (Kollmann, F. y Coté, W.; 1968).

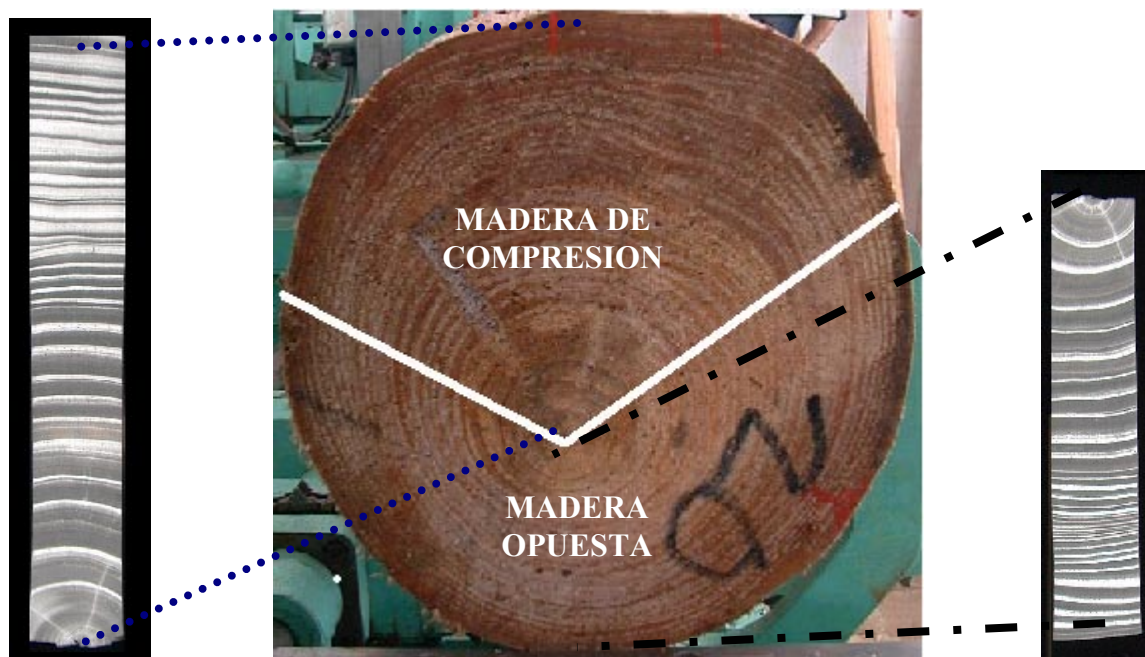


Foto N°1: Madera de compresión en corte transversal de troza. Detalles de radiografías de zonas de interés.

En las radiografías de la Foto N°1, las zonas mas claras representan las zonas de mayor densidad, o sea leño tardío y madera de compresión. Estas radiografías se obtuvieron de probetas de 5 mm de espesor.

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA UTILIZADA.

Se cortaron 18 árboles de *Pinus elliottii* de un monte del departamento de San José. De cada individuo se utilizó la troza basal (3,20 metros).

Características del monte:

- plantación en el año 1957, 43 años de edad a febrero de 2001.
- Origen de la semilla: estado de Georgia (USA).
- Densidad de plantación : Inicial 1860 árboles/há.
Final 406 árboles/há.
- No se realizaron podas.
- Se realizaron 2 raleos: en la década del 80 se bajó a 800 árboles/há. (se cortó el 57%)
a principios de los 90 a densidad final (se cortó el 78%)
- Altura comercial promedio a 14 cm de diámetro: 18 metros.
- DAP promedio del monte: 32 cm.

El diámetro a la altura del pecho (DAP), sin corteza, de los árboles seleccionados varió entre 30 y 43 centímetros. Las trozas basales se clasificaron en tres clases diamétricas. Los valores individuales de DAP de los 18 árboles seleccionados y las distintas clases diamétricas se pueden observar en la Tabla N°1.

Tabla N°1: DAP (sin corteza) de los árboles seleccionados.

CLASE DIAMÉTRICA 30-35 cm		CLASE DIAMÉTRICA 35-40 cm		CLASE DIAMÉTRICA > a 40 cm	
N° de Árbol	DAP (cm)	N° de Árbol	DAP (cm)	N° de Árbol	DAP (cm)
4	33	1	38	12	41
5	33	7	38	14	41
6	30	9	40	18	43
8	34	16	40	20	41
10	31	17	39		
11	30	19	38		
13	35				
15	34				
n	8	n	6	n	4
Promedio de la clase	33	Promedio de la clase	39	Promedio de la clase	42

2.3. PREPARACIÓN DE LAS TABLAS A ENSAYAR.

Las trozas basales de los 18 árboles seleccionados fueron descortezadas. Se calculó el volumen y el MOE de las trozas. Posteriormente, dichas trozas fueron aserradas en el LATU. Inicialmente se obtuvieron 88 tablas de corte tangencial, cuyas dimensiones aproximadas eran de 60 mm x 170 mm x 3200 mm. Durante el aserrado, se realizó un seguimiento individual de cada tabla, para así saber con precisión la ubicación de éstas dentro de las trozas. Inmediatamente después del aserrado se realizaron ensayos no-destructivos. Las tablas fueron secadas al aire hasta una humedad aproximada del 30%. Luego se continuó el secado en horno industrial hasta una humedad final promedio de 9,7%. Cuando llegaron a esta humedad, se llevaron a las dimensiones finales que fueron de 50 mm x 150 mm x 3000mm. Con éstas dimensiones se realizaron los ensayos no-destructivos y destructivos.

2.4. CLASIFICACIÓN DE LAS TABLAS.

Las tablas obtenidas de cada una de las trozas fueron clasificadas en tres categorías diferentes:

- Tablas “A” ⇔ Tablas que contienen médula, o sea constituidas en su totalidad por madera juvenil
- Tablas “B” ⇔ Tablas cercanas a la médula, o sea ubicadas en la “zona de transición” entre madera juvenil y madera adulta.
- Tablas “C” ⇔ Tablas alejadas de la médula (cercanas a la corteza), constituidas principalmente por madera adulta.

A modo de ejemplo, en la Foto N°2, se puede observar la clasificación realizada en la troza N°19. De dicha troza, se obtuvieron 5 tablas: una Tabla “A”, dos Tablas “B” y dos Tablas “C”.

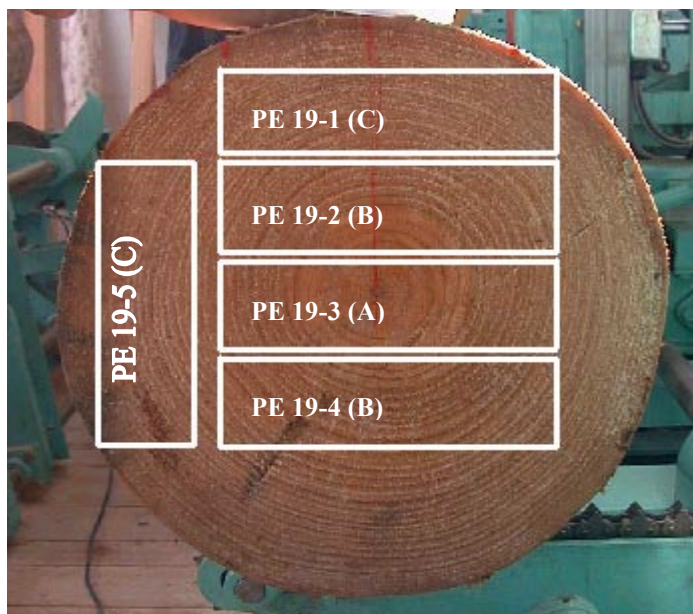


Foto N°2: Clasificación de tablas según ubicación dentro de la troza.

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.

Una vez que las 18 trozas fueron descortezadas, se procedió a la estimación del MOE de éstas por medio del método de frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer). En este momento se calculó el volumen y el peso para estimar la densidad. Por otra parte se realizó una clasificación visual de cada una de las trozas.

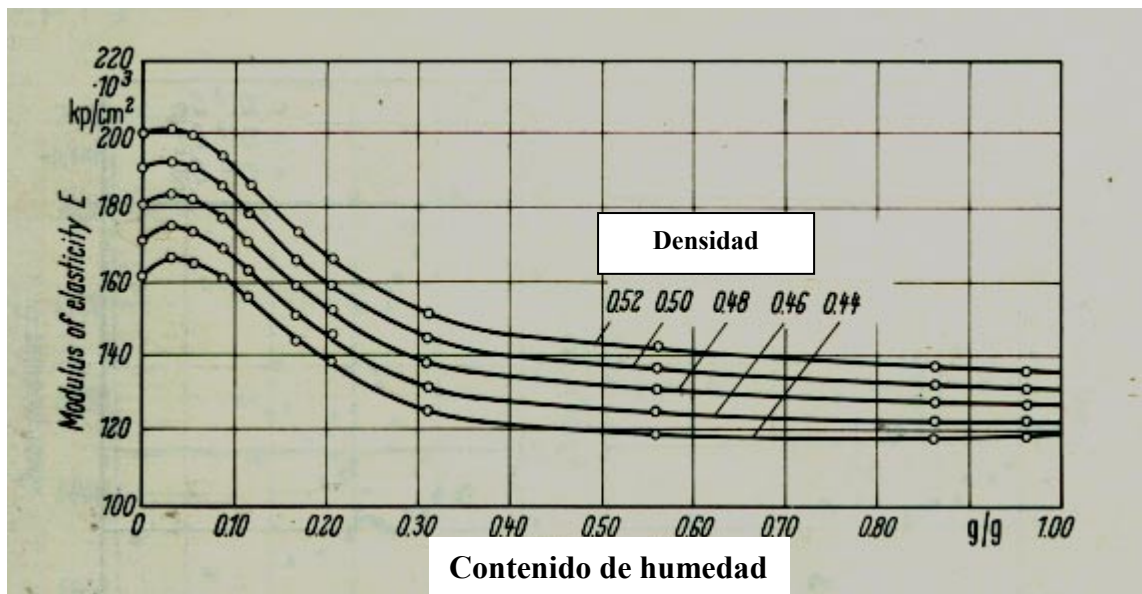
Una vez realizado el aserrado, se calculó el MOE (en estado verde) de las tablas obtenidas (por el método de vibración longitudinal). También se midió el volumen y el peso de cada una de las tablas, para así estimar la densidad.

Luego, con las tablas a un contenido de humedad promedio de 9,7%, se calculó nuevamente el volumen y el peso (para cálculo de la densidad), y se realizaron los ensayos no-destructivos (para estimación de MOE) y los destructivos (estimación de MOR).

2.5.1. Medición del contenido de humedad y la densidad.

Se determinó el contenido de humedad de las trozas en estado verde. Para eso, se cortó una rodaja de cada una de las trozas para así determinar la humedad de éstas, y su variación desde la médula a la corteza. No se determinó el contenido de humedad de las tablas en estado verde, pues se supuso que esta era muy similar al de las trozas, muy por encima del punto de saturación de las fibras.

Por encima del punto de saturación de las fibras, el agua libre que rellena los capilares gruesos de los vasos, las traqueidas y otros elementos de la madera, no afecta la resistencia y las propiedades elásticas de la madera. Por debajo del punto de saturación de las fibras, ocurre contracción e hinchamiento, que incrementan o reducen la cohesión y la rigidez (Kollmann, F. y Coté W.; 1968) (Ver Gráfica N°1).



Gráfica N°1: Efecto del contenido de humedad en el MOE en picea. (Kollmann y Krech, 1960).

Por otra parte, cuando se finalizaron los ensayos destructivos, se cortó una probeta de cada tabla y se calculó el contenido de humedad por el método de secado en estufa mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de Humedad(\%)} = ((\text{Peso Húmedo} - \text{Peso Seco}) / \text{Peso Seco}) \times 100$$

La densidad de las tablas se determinó mediante la siguiente fórmula: $d = m/v$.

- Dónde: ➤ $d =$ densidad (g/cm^3)
 ➤ $m =$ masa (g)
 ➤ $v =$ volumen (cm^3) (medido por dimensiones).

El contenido de humedad al cual se determinó la densidad fue el que presentaban las tablas al momento de ser ensayadas.

El volumen se calculó por dimensiones. La densidad se midió en las tablas de tamaño real en dos oportunidades (antes de realizar los ensayos no-destructivos y destructivos).

2.5.2. Cálculo del MOE en trozas basales verdes.

Para el cálculo del MOE en trozas basales, se utilizó el método de frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer). Para esto se apoyaron los trozas sobre las uñas de un elevador (las uñas fueron forradas con espuma de poliuretano para facilitar la vibración). En un extremo se colocó el micrófono y en el otro se realizó un golpe fuerte y seco con un martillo común. Mediante el FFT Analyzer, se obtiene la frecuencia de vibración principal producida por el impacto del martillo al atravesar la troza (Ver Figura N°2).

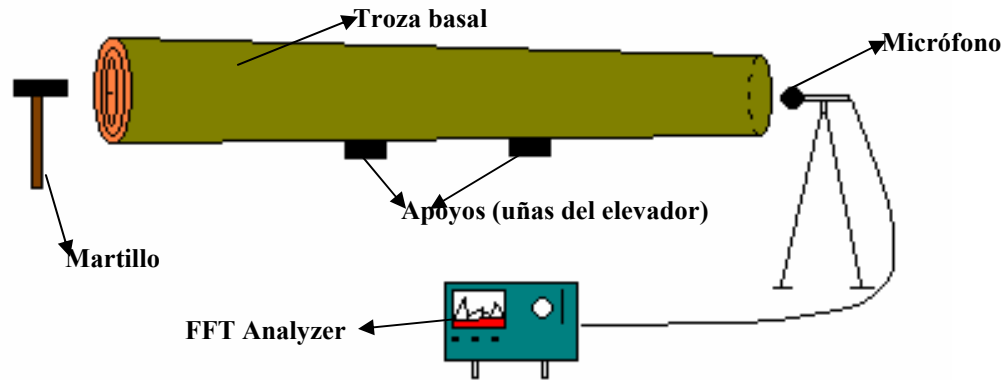


Figura N°2: Esquema del método de estimación del MOE en trozas por frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer).

2.5.3. Cálculo del MOE en tablas verdes y tablas secas.

En las tablas en estado verde (contenido de humedad superior al punto de saturación de las fibras), solamente se estimó el MOE por el método de frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer).

Sobre las tablas secas (a un contenido de humedad promedio del 9,7%), se utilizaron los siguientes métodos:

- ⇒ Flexión estática con pesas (carga muerta).
- ⇒ Frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer).
- ⇒ Frecuencia de vibración transversal (FFT Analyzer).
- ⇒ Tiempo de propagación de onda de ultrasonido (Pundit y Sylvatest).
- ⇒ Flexión estática con Máquina Universal de ensayos (distancia entre apoyos (span) 2520 milímetros). Carga aplicada sobre cara de la tabla. Tres puntos de apoyo.
- ⇒ Flexión estática con Máquina Universal de ensayos (span 2520 milímetros). Carga aplicada sobre canto de la tabla. Se utilizaron dos extensómetros para medir deformación, uno sobre línea neutra (EXT 1) y otro sobre canto superior (Yoke). Cuatro puntos de apoyo.

Para obtener más información acerca de estos métodos ver Perez Favaro, A.; 2000; y Perez del Castillo. A.; 2001.

2.5.4. Ensayo destructivo para el cálculo del MOR en tablas de tamaño real.

El ensayo se realizó según la norma ASTM D198. Las condiciones de ensayo para el cálculo del MOR fueron las siguientes:

- Dos puntos de aplicación de carga a 840 mm.
- Aplicación de carga sobre el canto de la tabla.
- Velocidad de ensayo constante de 20 mm/min.
- Celda de carga de 250 kN.

- Distancia entre apoyos de 2520 mm (span).
- Se utilizaron 2 extensómetros para medir el desplazamiento (cálculo del MOE):
 - ⇒ uno sobre canto superior (Yoke).
 - ⇒ uno en línea neutra (EXT 1).

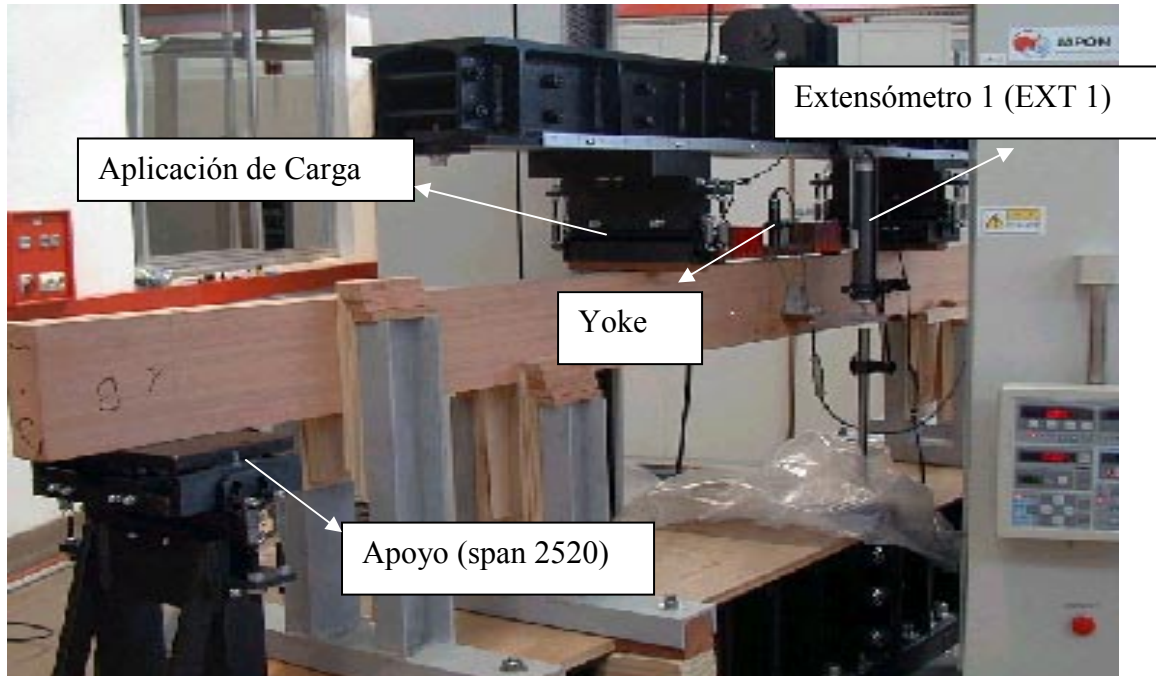


Foto N°3: Máquina Universal de Ensayos. Flexión estática de tablas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD.

En la Tabla N°2, se observan los resultados de contenido de humedad y densidad obtenidos en las trozas, las tablas en estado verde y las tablas secas en horno.

Tabla N°2: Contenido de humedad y densidad de tablas y trozas.

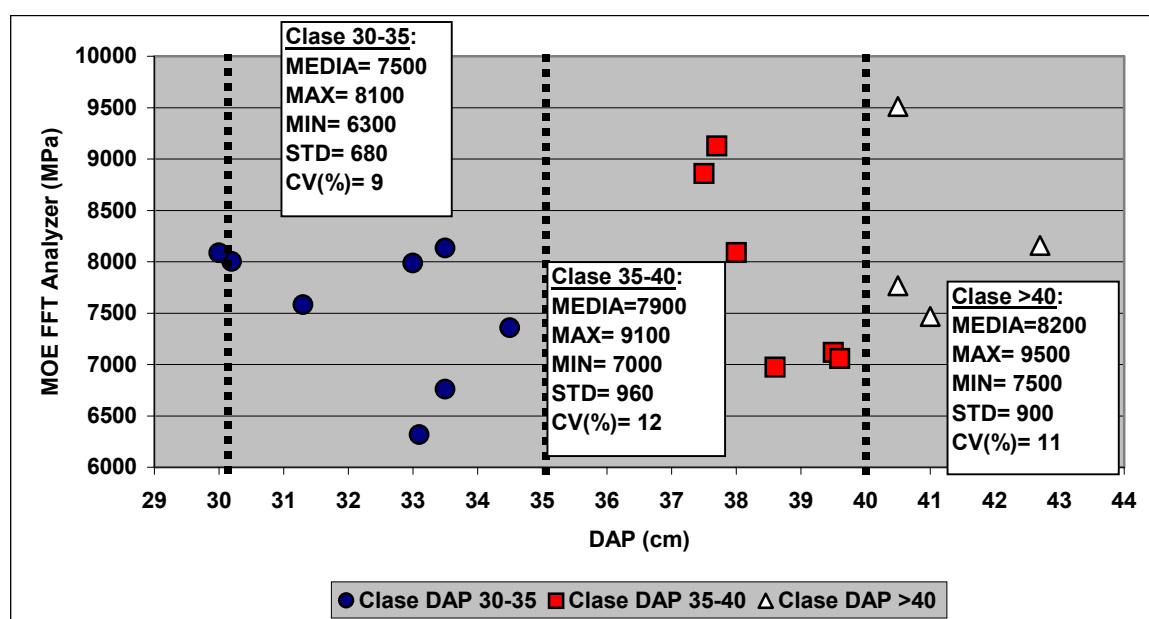
	Densidad (g/cm ³)			Contenido de Humedad (%)	
	Trozás	Tablas Verdes	Tablas Secas	Trozás	Tablas Secas
n	18	80	80	18	80
MEDIA	0,882	0,902	0,487	110	9,73
MAX	0,968	1,043	0,695	139	11,85
MIN	0,816	0,630	0,399	82	8,82
STD	0,040	0,102	0,041	17	0,64
CV (%)	5	11	8	15	7

3.2. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE TROZAS.

En la Tabla N°3, se observan las medidas realizadas sobre cada una de las 18 trozas estudiadas.

Tabla N°3: Medidas realizadas sobre las 18 trozas basales.

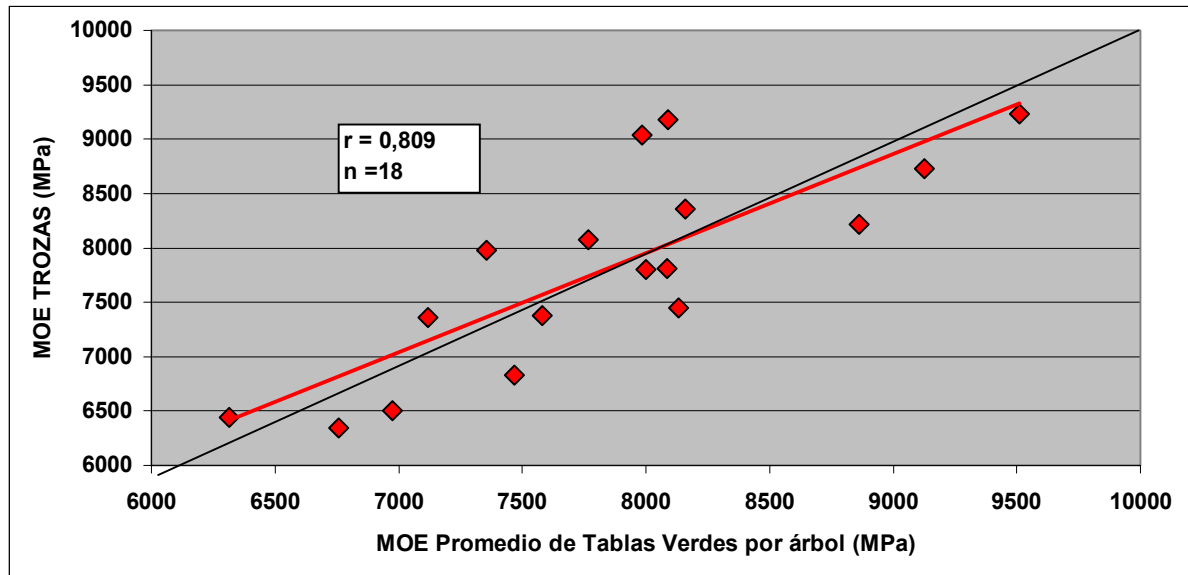
	DAP (cm)	Peso (kg)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Densidad (g/cm ³)	MOE (MPa)
MEDIA	36,4	323	3,19	0,366	0,882	7800
MAX	42,7	448	3,24	0,505	0,968	9500
MIN	30,0	220	3,13	0,249	0,816	6300
STD	4,01	71,3	0,03	0,08	0,04	830
CV(%)	11	22	1	22	5	11



Gráfica N°2: Relación entre el DAP y el MOE para las trozas en estado verde.

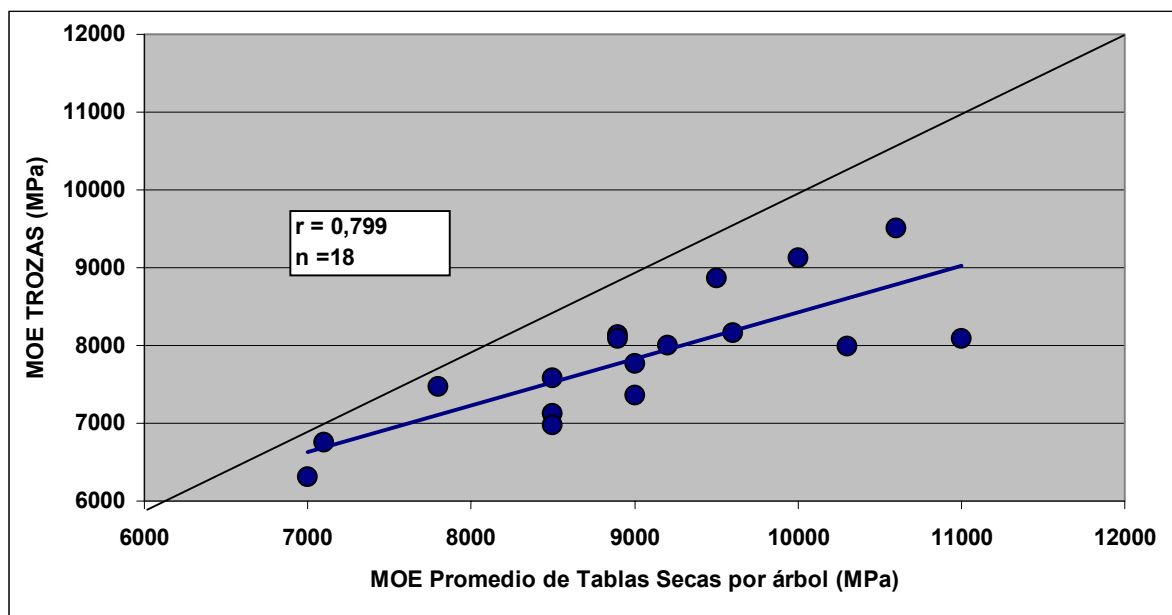
En la Gráfica N°2, se puede observar la relación encontrada entre el DAP (cm) y el MOE de las trozas. Mediante la Prueba t para dos muestras (con un 95% de confianza), no se encontraron diferencias significativas entre los valores de MOE obtenidos para cada una de las clases diamétricas.

Por otra parte, se encontró una correlación alta entre el MOE promedio por árbol de las tablas en estado verde y el MOE de las trozas (Ver Gráfica N°3).



Gráfica N°3: Relación entre el MOE promedio por árbol de tablas verdes y el MOE de las trozas.

En la Gráfica N°4, se observa la relación entre el MOE promedio por árbol de tablas secas y el MOE de las trozas verdes. El índice de correlación encontrado es similar al de la Gráfica N°3, pero en este caso los resultados de las tablas secas fueron promedialmente un 14 % mayores.



Gráfica N°4: Relación entre el MOE promedio por árbol de tablas secas y el MOE de las trozas.

3.3. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE TABLAS.

3.3.1. Comparación entre madera de compresión y madera opuesta.

Llamamos madera opuesta a la madera que se forma en la zona radialmente opuesta a la madera de compresión. Dicha madera presenta características similares a la madera normal. Se confeccionaron probetas como las que se observan en la Foto N°4. El largo de dichas probetas dependía del diámetro del árbol, mientras que el espesor fue de 1,5 milímetros. Dichas probetas se colocaron sobre un proyector de luz, y se observaron generalmente cuatro zonas bien diferenciadas según la característica de la troza:

- ⇒ Madera normal.
- ⇒ Madera de compresión: se observa, en zonas alejadas a la médula, madera más oscura debido a la alta densidad que presenta.
- ⇒ Madera con alto contenido de extractivos (ej: resina): madera que rodea la médula.
- ⇒ Madera opuesta.



Foto N°4: Ubicación de diferentes tipos de madera mediante la utilización de un proyector luminoso.

Por otra parte, en la Tabla N°4, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos sobre una tabla de tamaño real con un alto contenido de madera de compresión (Tabla 65, Árbol N°20), y una tabla constituida con madera opuesta (Tabla 64, Árbol N°20) (obtenida de la zona radialmente opuesta a la tabla 65). Es importante observar las diferencias encontradas entre los valores de MOE de las tablas (tanto en tablas verdes como en tablas secas), así como la diferencia entre los valores de densidad en tablas secas.

Por otra parte, mediante el cociente entre el MOE y la densidad se obtuvo el índice "MOE/Den". Este índice nos permite detectar con mayor claridad las tablas que presentan madera de compresión. La madera de compresión presenta bajo MOE y alta densidad, por lo que el índice da un valor numérico bajo comparando con lo que da en una tabla normal o de madera opuesta (alto MOE y baja densidad).

Tabla N°4: Comparación de diferentes propiedades entre madera de compresión y madera opuesta.

N° de Tabla	Tipo de Madera	Tablas Verdes		Tablas Secas				
		Densidad (g/cm ³)	MOE (FFT) (MPa)	Densidad (g/cm ³)	MOE (Pesas) (MPa)	MOE / Den.	MOR (MPa)	MOR / Den.
64	Opuesta	0,936	8200	0,433	9100	21000	44	102
65	Compresión	0,945	6100	0,695	7400	10600	77	111

Con respecto al valor de MOR obtenido en las dos tablas, se puede decir que estuvo influenciado por el hecho que la Tabla 64 presentaba nudos que afectaron dicho valor. La Tabla 65, era una tabla sin ningún defecto (clear). Esto se observa en la Foto N°5.

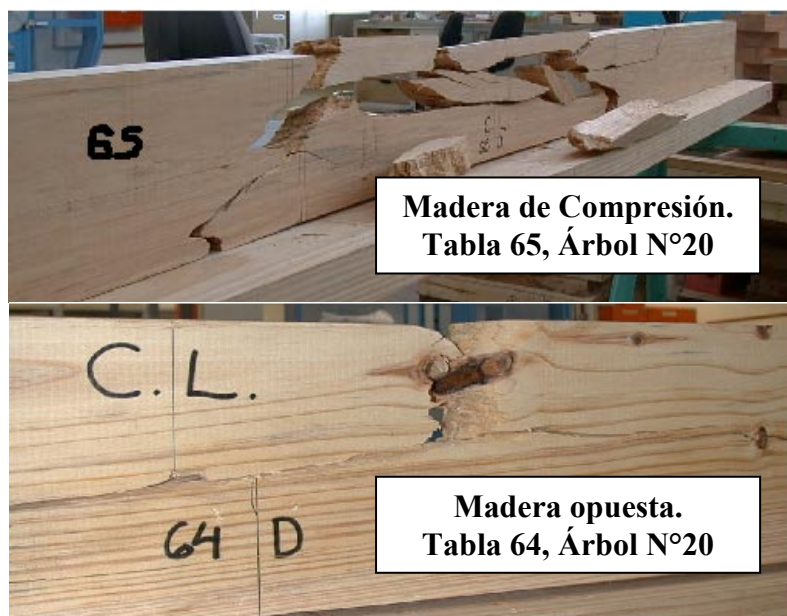


Foto N°5: Condición de las tablas luego del ensayo de flexión (cálculo de MOR)

En las Fotos N°6 y N°7, se puede observar las diferencias entre madera de compresión y madera normal (similar a la opuesta). Se observan imágenes a través de proyector de luz (A) y por medio de una radiografía (B). En las radiografías, al ser negativos, las zonas de mayor densidad se observan de color más claro.

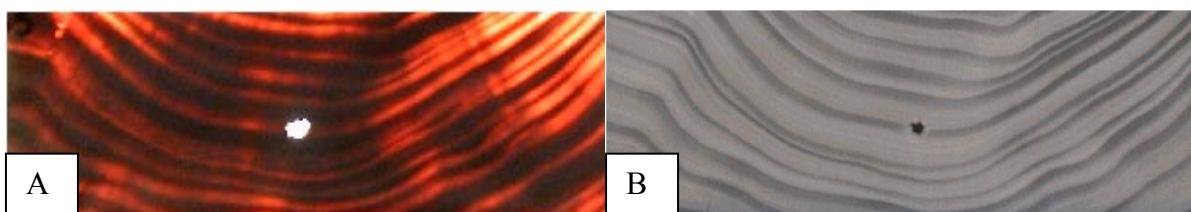


Foto N°6: Observación de madera de compresión (Tabla 65). (A):mediante la utilización de un proyector luminoso y (B) mediante una radiografía.

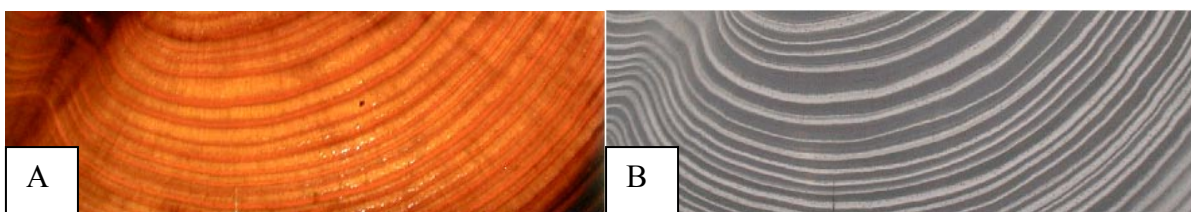


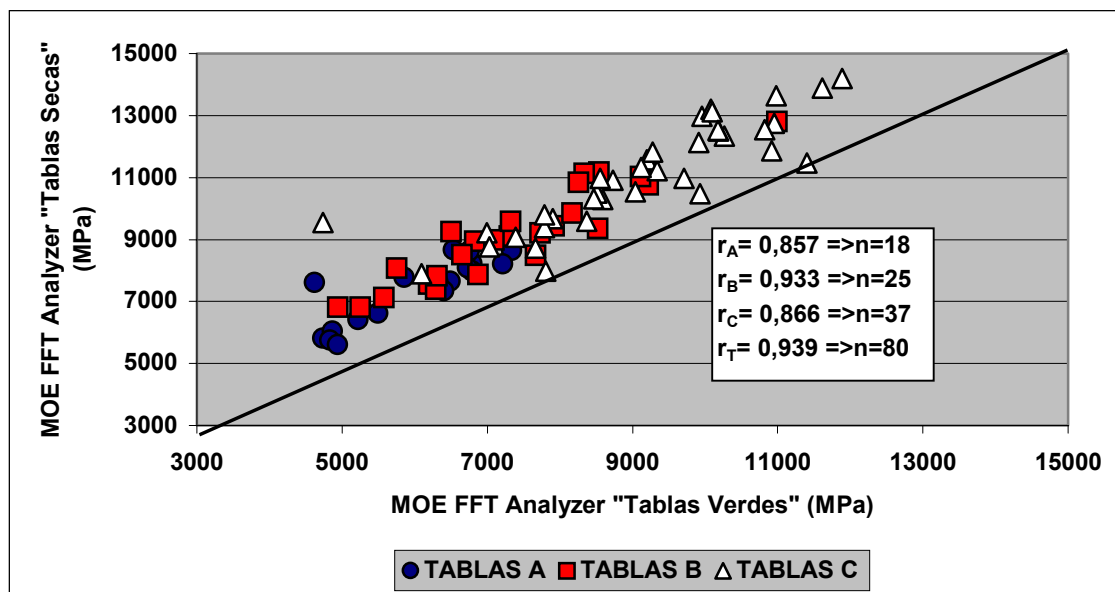
Foto N°7: Observación de madera normal. (A):mediante la utilización de un proyector luminoso y (B) mediante una radiografía.

Se debe tener en cuenta, cuando se habla de la madera de compresión, la ubicación geográfica de dónde procede la madera. Al ser una zona cercana al mar, los vientos fuertes allí existentes pueden ser uno de los principales causantes de la formación de la madera de compresión.

3.3.2. Variación del MOE con el contenido de humedad.

Como se dijo anteriormente, la variación del contenido de humedad de las tablas, afecta el módulo de elasticidad de éstas. En la Gráfica N°5, se observa dicha diferencia. Todos los valores obtenidos para un contenido de humedad del 9,7% resultaron superiores al MOE de las tablas en estado verde (por encima del punto de saturación de las fibras).

Por otra parte, en la Tabla N°5, se observan los valores obtenidos de MOE para los dos contenidos de humedad. El promedio de dichos valores difieren en un 18%, resultando ser una diferencia significativa con un 95% de confianza.



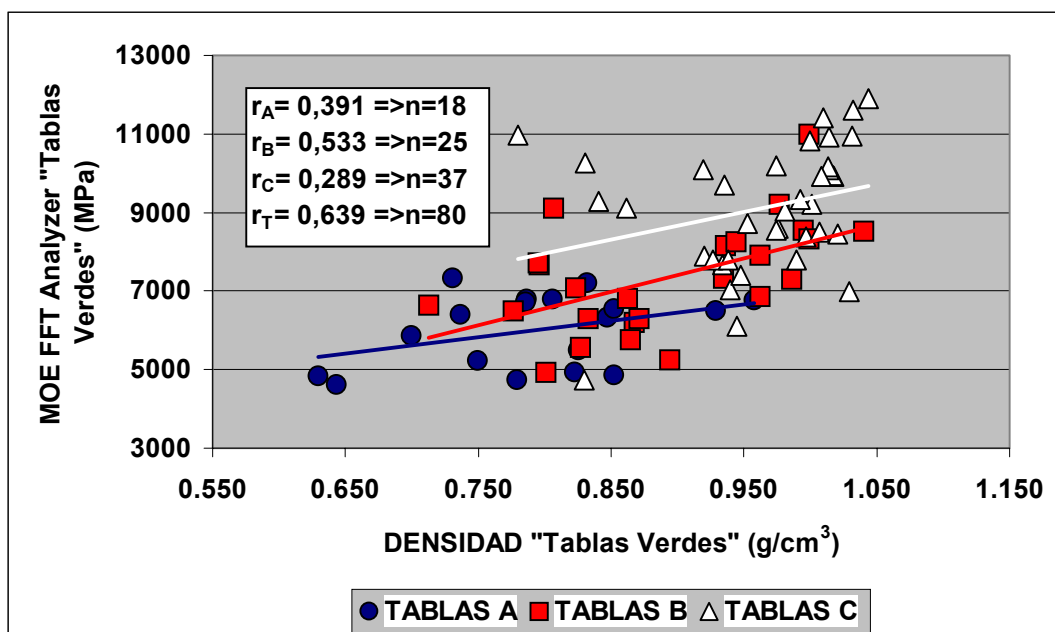
Gráfica N°5: Influencia del contenido de humedad en los valores de MOE obtenidos mediante el método de frecuencia de vibración longitudinal.

Tabla N°5: Valores de MOE para los distintos contenidos de humedad.

	FFT Long		Diferencia porcentual
	MOE (MPa)		
	Tablas Secas	Tablas Verdes	
n	80	80	
MEDIA	9600	7900	17,7
MAX	14200	11900	16,2
MIN	5600	4600	17,9
STD	2100	1900	9,5
CV (%)	22	24	-8,3

3.3.3. Ensayos realizados sobre tablas en estado verde.

Como se dijo anteriormente, sobre las tablas verdes (contenido de humedad superior al punto de saturación de las fibras), se estimó el MOE sólo a través del método de vibración longitudinal (FFT Analyzer). En la Gráfica N°6, se observa la correlación encontrada entre la densidad y el MOE. El índice de correlación encontrado para todo el conjunto de medidas (r_T), nos permite decir que existe una relación lineal entre la densidad (de tablas verdes) y el MOE.



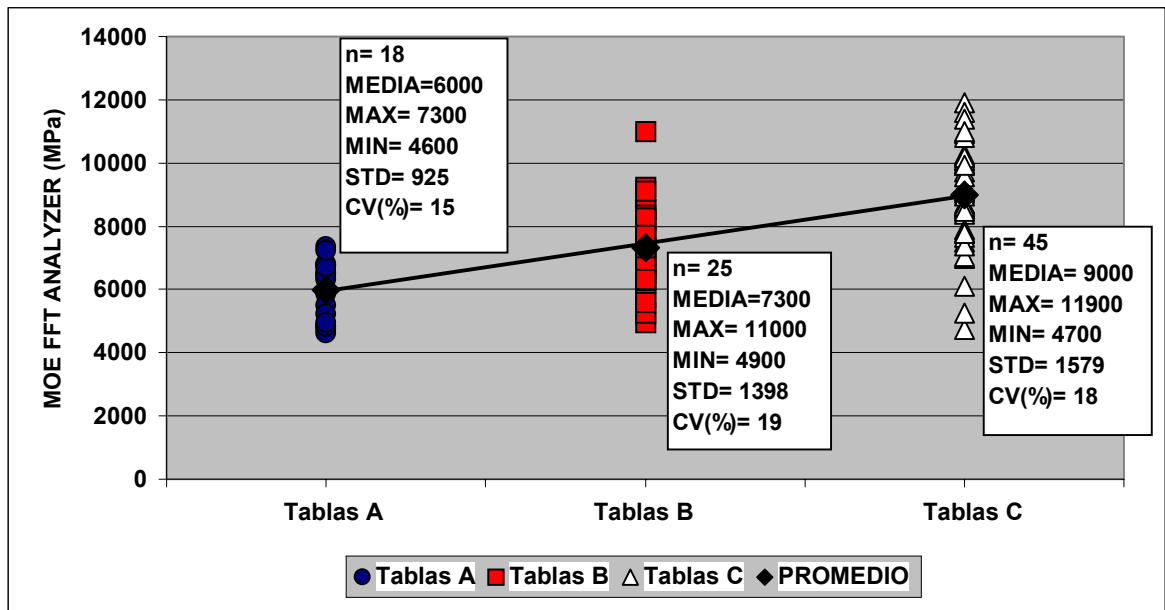
Gráfica N°6: Relación entre la densidad y el MOE estimado por el método de vibración longitudinal para tablas en estado verde.

Observando la Tabla N°6, se puede decir que la tendencia encontrada de los valores de densidad en las tablas verdes es como se esperaba, ya que se observa un aumento desde la médula a la corteza. O sea las tablas constituidas por madera juvenil, presentan valores menores de densidad que las constituidas por madera adulta. Estos valores son significativamente diferentes con un 95% de confianza.

Tabla N°6: Densidad de tablas en estado verde.

	Densidad (g/cm ³)		
	TABLAS "A"	TABLAS "B"	TABLAS "C"
n	18	25	37
MEDIA	0,793	0,891	0,963
MAX	0,958	1,040	1,043
MIN	0,630	0,712	0,780
STD	0,086	0,087	0,065
CV (%)	11	10	7

Con respecto a la variación del MOE estimado entre las tablas según ubicación en la troza, como se observa en la Gráfica N°7, se encontraron importantes diferencias entre las tres categorías de tablas. Existen diferencias significativas (con un 95% de confianza) entre las tres categorías.



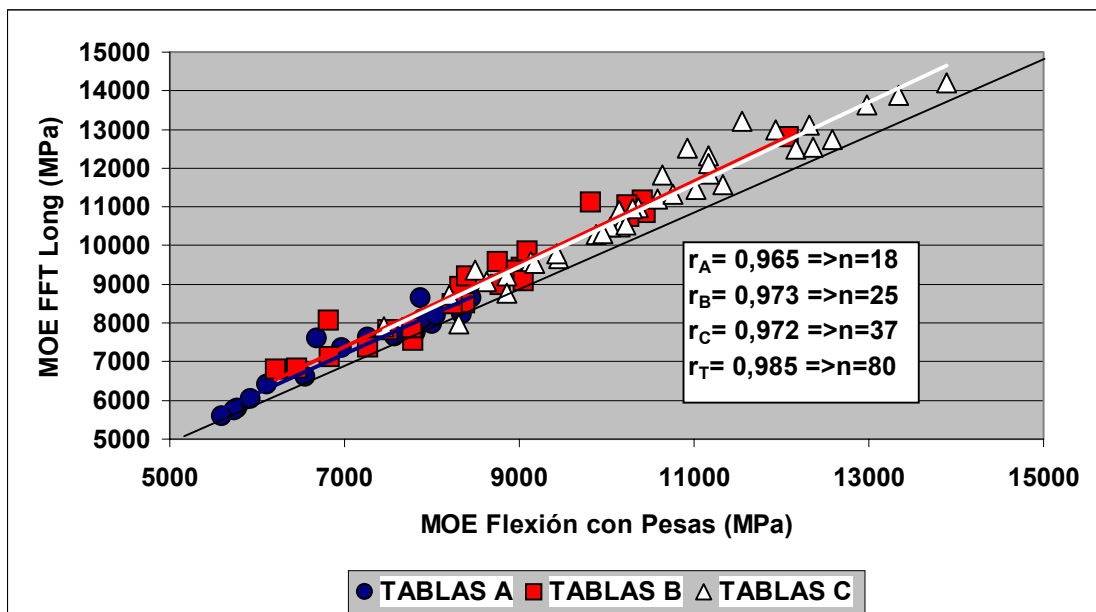
Gráfica N°7: MOE (Tablas verdes) según clasificación por ubicación en troza.

3.3.4. Ensayos realizados sobre tablas a un contenido de humedad del 9,7%.

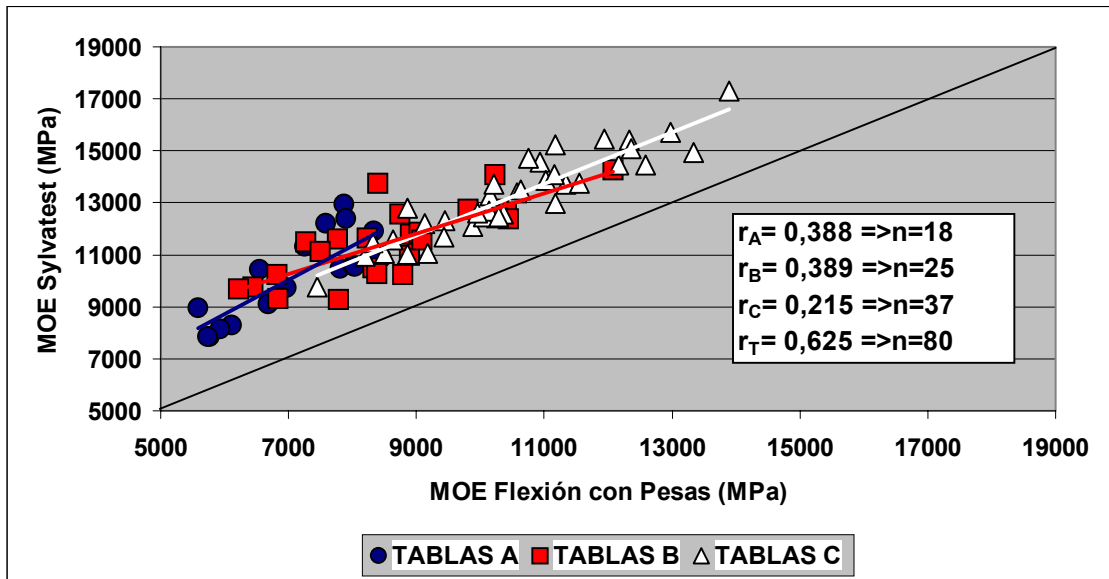
3.3.4.1. Correlación entre diferentes métodos para cálculo de MOE.

Las tablas se secaron en horno industrial hasta un contenido de humedad promedio del 9,7%. Se realizaron los ensayos no-destructivos para el cálculo del MOE. Todos los métodos utilizados, presentaron altos coeficientes de correlación cuándo se correlacionaron con el método de flexión estática con pesas.

A modo de ejemplo, en las Gráficas N°8 y N°9, se observa cómo se correlacionan con el método de las pesas, dos de los métodos utilizados.



Gráfica N°8: Correlación entre el MOE obtenido por el método de flexión (pesas) y el obtenido con el método de frecuencia de vibración longitudinal.



Gráfica N°9: Correlación entre el MOE obtenido por el método de flexión (pesas) y el obtenido con el método de propagación de onda de ultrasonido(Sylvatest).

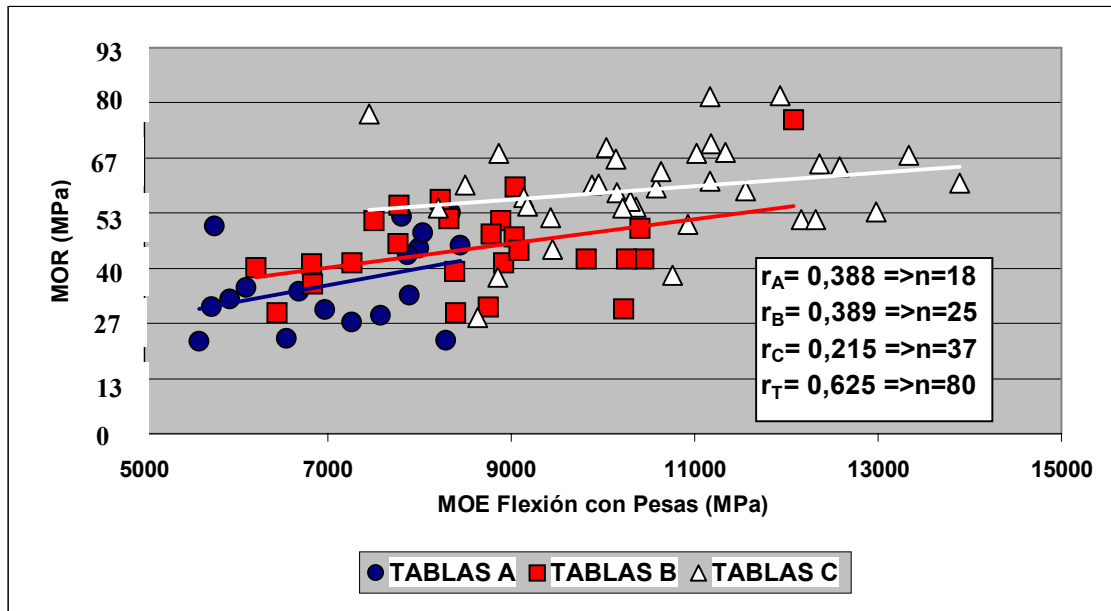
Por otra parte, en la Tabla N°7, se observan los coeficientes de correlación encontrados entre todos los métodos utilizados. Si comparamos todos los equipos con el método de flexión con pesas, los que presentan mejor correlación son los métodos de frecuencia de vibración longitudinal y transversal, o sea el equipo FFT Analyzer. Este equipo se ha comportado como el más apropiado para la estimación del MOE en tablas de tamaño real tanto en *Pinus elliottii*, como en *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis* (Ver Pérez, 2000 y Perez del Castillo 2001). Por otra parte, este método es bueno desde el punto de vista práctico, ya que tiene alta reproducibilidad, es simple y no requiere poner en contacto con la madera ni clavos ni sensores.

Tabla N°7: Coeficientes de correlación encontrados entre los diferentes métodos de medida del MOE, y entre éstos y el MOR.

	Pesas	Pundit	Sylvatest	FFT long	FFT trans	Span2520	EXT 1	Yoke	MOR
Pesas	1								
Pundit	0,946	1							
Sylvatest	0,914	0,985	1						
FFT long	0,985	0,942	0,910	1					
FFT trans	0,994	0,942	0,913	0,985	1				
Span2520	0,995	0,936	0,902	0,983	0,992	1			
EXT 1	0,948	0,908	0,885	0,952	0,950	0,947	1		
Yoke	0,821	0,771	0,752	0,814	0,823	0,811	0,839	1	
MOR	0,625	0,532	0,474	0,615	0,625	0,631	0,628	0,622	1

3.3.4.2. Correlación entre MOE y MOR.

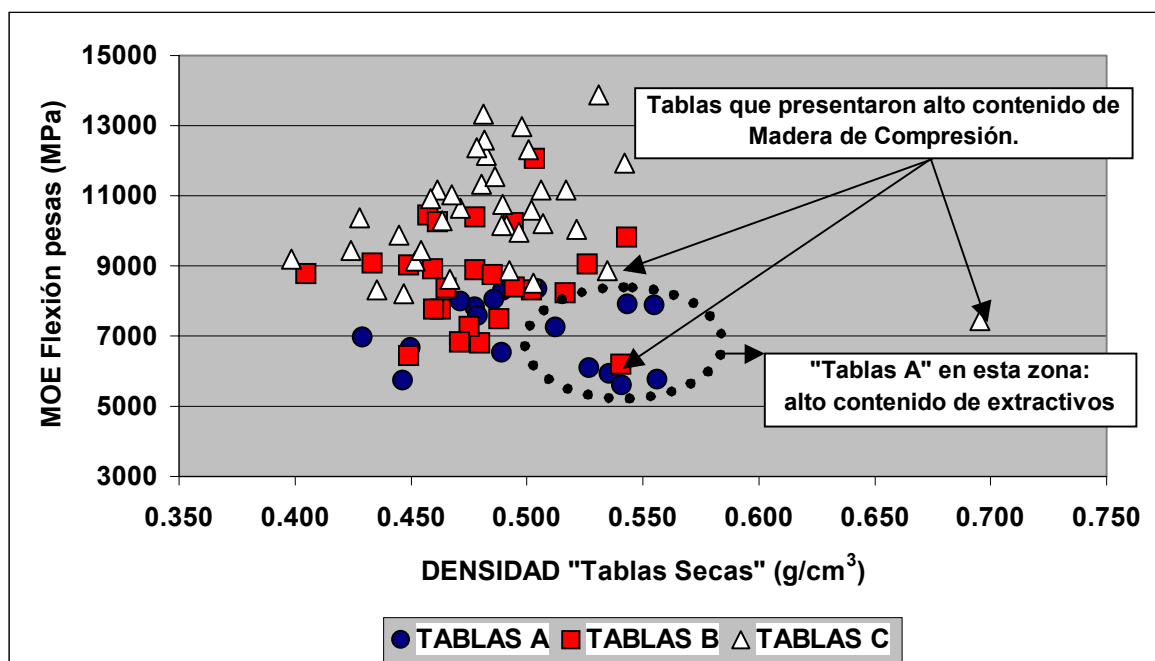
En la Gráfica N°10, se observa la correlación encontrada entre el MOE y el MOR. El coeficiente de correlación encontrado no es muy alto debido a que los defectos que presentan las tablas (nudos, rajaduras, etc.) afectan principalmente al MOR. También se debe tener en cuenta el efecto de la madera de compresión.



Gráfica N°10: Correlación entre el MOE obtenido por el método de flexión (pesas) y el MOR.

3.3.4.3. Correlación entre densidad y MOE.

En la Gráfica N°11, se observa la correlación encontrada entre la densidad y el MOE en tablas secas. El coeficiente de correlación encontrado para *Pinus elliottii*, fue muy inferior al encontrado por ejemplo en estudios similares realizados sobre *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis* (Ver Tabla N°8). Esto se debe seguramente a la existencia en estos especímenes de *Pinus elliottii* de madera de compresión (principalmente en zonas alejadas de la médula) y de madera con alto contenido de resina (madera rodeando la médula) (Ver Foto N°8). Esto provoca un aumento de la densidad que no va acompañada con un aumento del MOE, lo que implica una mayor dispersión de los puntos.



Gráfica N°11: Correlación entre la densidad y el MOE obtenido por el método de flexión (pesas).

Tabla N°8: Coeficientes de correlación entre densidad y MOE en diferentes especies.

	MOE		
	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>
Densidad	-0,0767	0,837	0,673

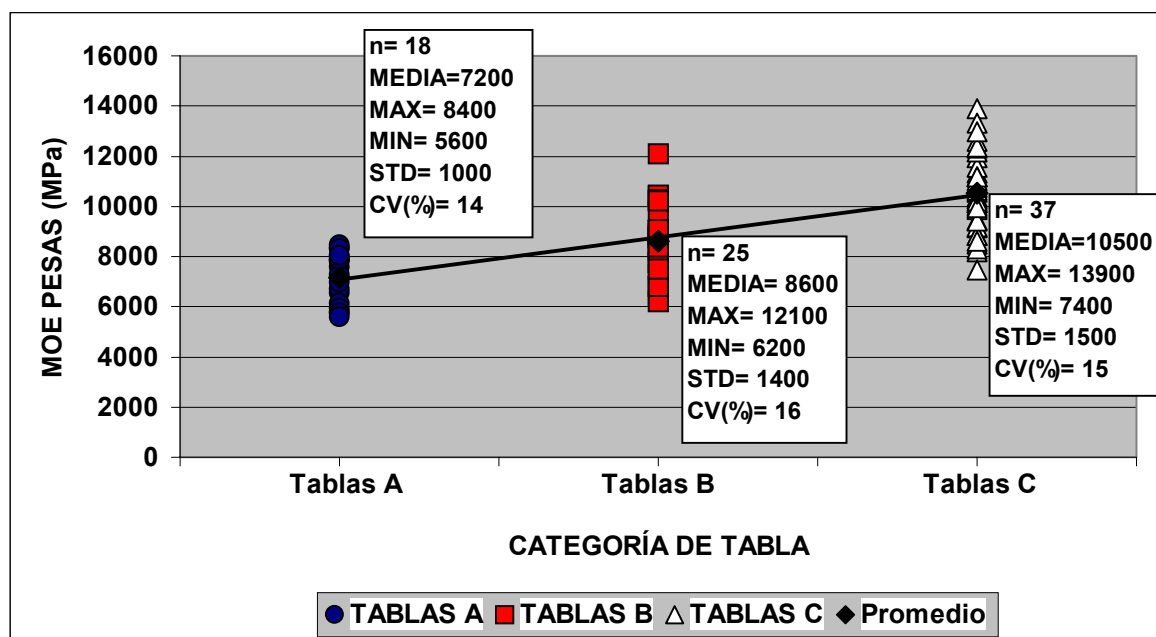


Foto N°8: Detección de zona con alto contenido de extractivos mediante utilización de proyector luminoso.

3.3.4.4. Diferencia entre madera juvenil y madera adulta.

Como se dijo anteriormente, la madera juvenil presenta importantes diferencias en sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y anatómicas con respecto a la madera adulta. Debido a estas diferencias, es que en este estudio se realizó la categorización de tablas según ubicación dentro de las trozas.

En la Gráfica N°12, se observa la variación del MOE según ubicación dentro de la troza. Como era de esperar, las tablas que contenían médula (madera juvenil), presentaron valores de MOE menores que las otras dos categorías de tablas. Las diferencias encontradas entre las tres categorías son significativas con un 95% de confianza.



Gráfica N°12: MOE (tablas secas) según clasificación por ubicación en troza.

Es importante aclarar, que la recta “Promedio” observada en la Gráfica N°12, muestra una tendencia creciente del MOE al aumentar la distancia a la médula. Pero en realidad, luego que se empieza a formar madera adulta, las propiedades mecánicas (en este caso el MOE) no continúan aumentando a medida que nos alejamos de la médula.

3.3.4.5. Variación del MOE entre los 18 árboles muestreados.

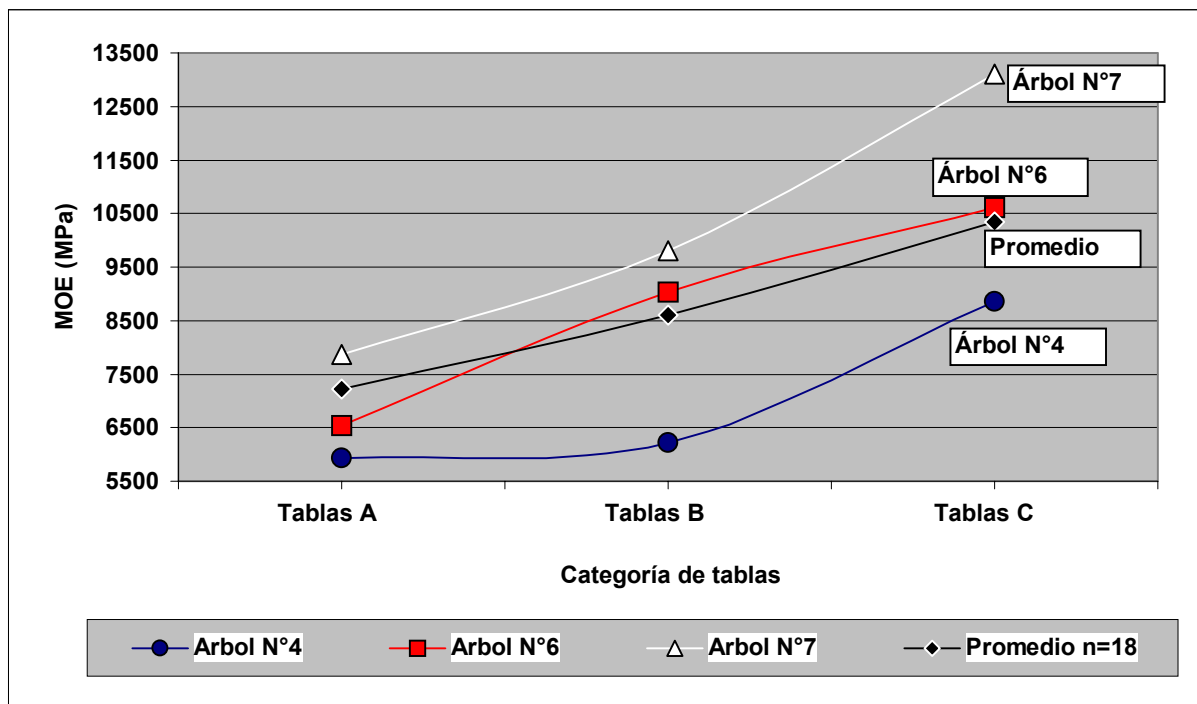
En la Tabla N°9, se puede observar la variación del MOE entre todos los árboles muestreados. No hay diferencias significativas entre los promedios de MOE de los diferentes árboles. Ni siquiera entre los árboles N°7 y N°4, que son los que presentaron valores promedio de MOE más diferenciados.

En dicha tabla, los árboles se agruparon según clase diamétrica. No se encontró ninguna relación entre el MOE y la clase diamétrica.

Tabla N°9: Diferenciación por árbol de los resultados obtenidos de MOE (MPa).

MOE PROMEDIO POR ÁRBOL (MPa)								
Clase DAP 30-35 cm								
N° Árbol	4	5	6	8	10	11	13	15
MEDIA	7000	10300	8700	8900	8500	8900	8800	7100
MAX	8900	12100	10600	10200	10200	11200	9700	8300
MIN	5900	8300	6500	7800	7300	7500	7600	5600
MOE PROMEDIO DE CLASE= 8500								
Clase DAP 35-40 cm								
N° Árbol	1	7	9	16	17	19		
MEDIA	8400	10300	7700	9900	8000	9700		
MAX	11100	13100	9300	11000	9700	11900		
MIN	5700	7900	6100	8300	6700	7900		
MOE PROMEDIO DE CLASE= 9000								
Clase DAP >40 cm								
N° Árbol	12	14	18	20				
MEDIA	9400	8500	8900	7700				
MAX	11500	11000	10700	8000				
MIN	8200	5800	7300	7000				
MOE PROMEDIO DE CLASE= 8600								

Como se dijo anteriormente, mediante la Prueba t para dos muestras (con un 95% de confianza), no se encontraron diferencias significativas entre los promedios de MOE de los árboles estudiados. El resultado del estudio estadístico se puede deber al poco número de muestras por árbol (entre 3 y 7 tablas por árbol) ó a la gran variación que existe dentro de árboles (variación entre madera juvenil y madera adulta). Si uno observa la Gráfica N°13, dónde se representan 3 de los 18 árboles del estudio, es claro que además de que existen diferencias importantes dentro de árboles, existen diferencias entre ellos. Por ejemplo, entre los árboles N°4 (árbol con menor MOE promedio) y N°7 (árbol de mayor MOE promedio), se encontró una diferencia del orden del 25% para las tablas A, del 37% para las tablas B y del 32% para las tablas C.



Gráfica N°13: Variación del MOE (tablas secas) entre 3 árboles y promedio de los 18 árboles. Diferenciación según categorías de tablas.

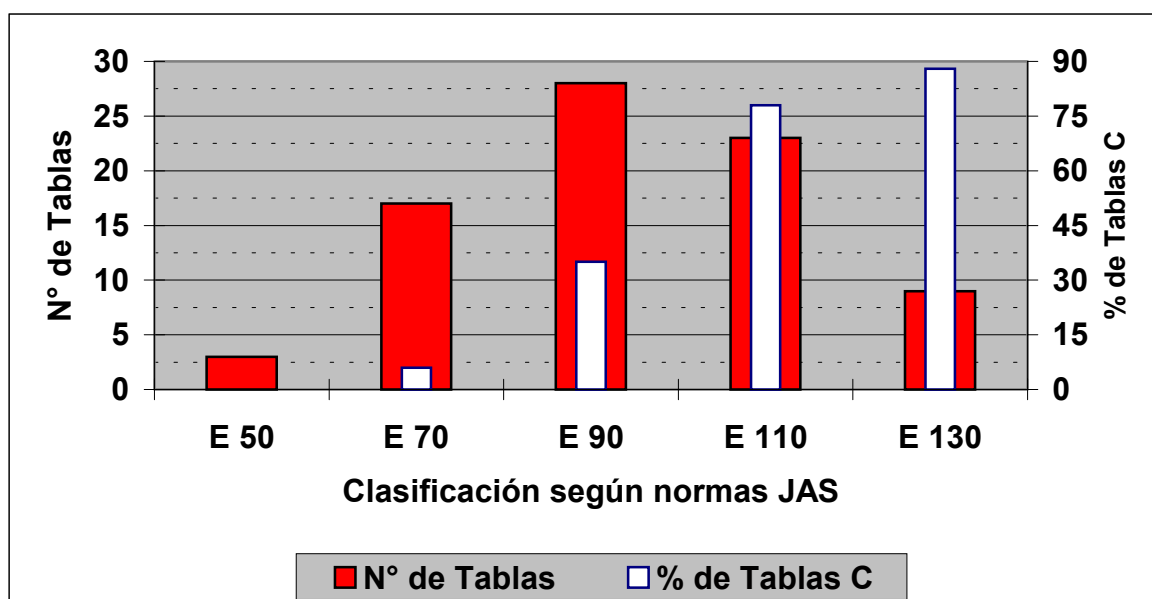
4. CLASIFICACIÓN DE LAS TABLAS SEGÚN NORMAS JAS.

Con las tablas ensayadas, se calculó el MOE promedio de cada árbol y estos se clasificaron según normas JAS (Japan Agricultural Standard) para madera estructural de coníferas. Como se dijo anteriormente, se encontró una importante variación dentro de árboles, lo que provoca que las distintas tablas de un mismo árbol pertenezcan a distintas categorías. Es por eso que también se clasificaron, a modo de ejemplo, algunas tablas individualmente (Ver Tabla N°10).

Tabla N°10: Clasificación de las tablas según normas JAS.

Clasificación por JAS	MOE (10 ³ kgf/cm ²)	MOE (MPa)	N° Árbol (MOE promedio de todas las tablas)	N° de Árbol y categoría de tabla
E 50	40-60	3920-5880	--	15(A), 1(A), 14(A)
E 70	60-80	5880-7850	2, 4, 15, 20	20(A,B,C), otras
E 90	80-100	7850-9810	1, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19	Casi todos los árboles presentaron tablas en estas categorías
E 110	100-120	9810-11770	5, 7, 16	
E 130	120-140	11770-13730	--	12(C), 7(C), 5(B), otras

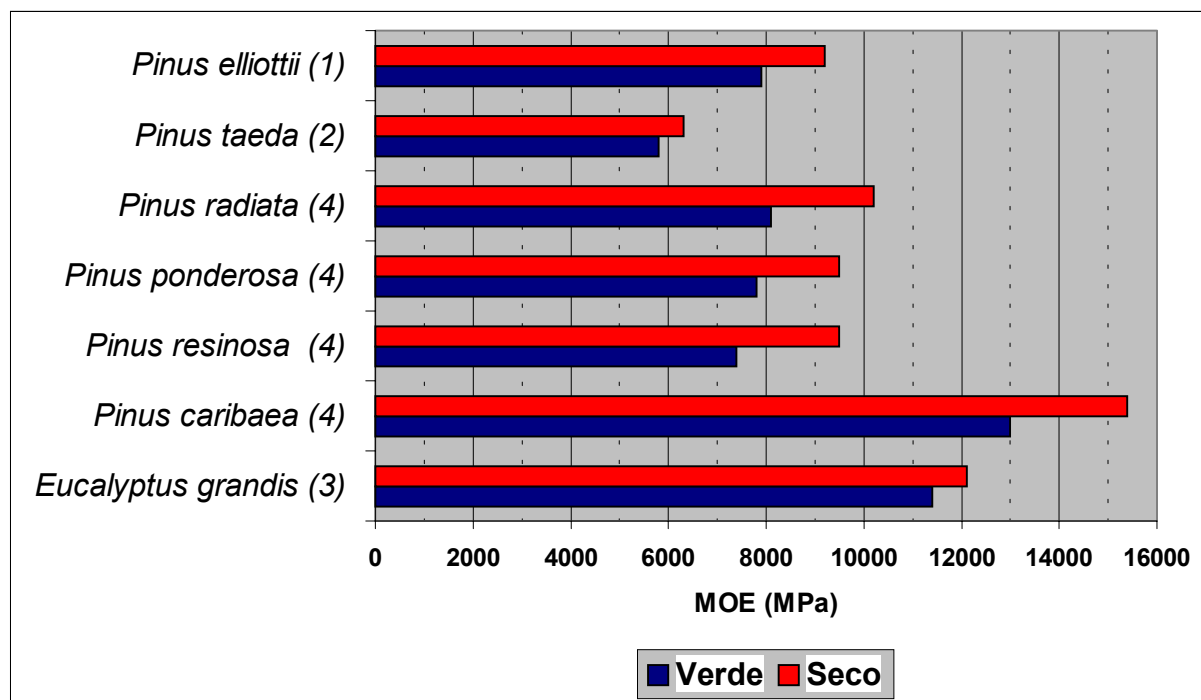
Por otra parte, en la Gráfica N°14, se observa un histograma donde se representa el número de tablas por categoría JAS (eje abscisas primario), y el porcentaje de tablas C en cada una de las categorías (eje abscisas secundario). Las tablas obtenidas de *Pinus elliottii* de San José se clasificaron en 5 categorías, ubicándose mayor cantidad de tablas en la categoría E 90. Como era de esperar, en las categorías más altas (E 110 y E 130), se encontró un alto porcentaje de tablas C. Según las normas JAS citadas, a partir de la categoría E 90 inclusive, la madera puede ser utilizada para la construcción. En el caso del *Pinus elliottii* de San José, 60 de las 80 tablas estudiadas se encontraron en la categoría E 90 ó mayor, o sea un 75% de las tablas.



Gráfica N°14: Número de tablas según categorías de normas JAS. Porcentaje de Tablas C por categoría.

5. COMPARACIÓN DE *PINUS ELLIOTTII* CON OTRAS ESPECIES.

En este capítulo, se comparan los resultados de MOE obtenidos en las tablas de *Pinus elliottii* de San José, con otras especies conocidas en los mercados internacionales. Esta comparación se observa en la Gráfica N°15.



Gráfica N°15: Comparación del MOE obtenido en *Pinus elliottii* de San José, con el MOE de otras especies.

NOTA: (1) *Pinus elliottii* de San José. MOE de tablas de tamaño real (2x6).

Contenido de humedad seco \Rightarrow 9,7%

Contenido de humedad verde \Rightarrow superior al punto de saturación de las fibras.

(2) *Pinus taeda* de Rivera. MOE de tablas de tamaño real (2x6).

Contenido de humedad seco \Rightarrow 13%

Contenido de humedad verde \Rightarrow 25%.

(3) *Eucalyptus grandis* de Rivera. MOE de tablas de tamaño real (2x6).

Contenido de humedad seco \Rightarrow 12%

Contenido de humedad verde \Rightarrow 26%.

(4) Información obtenida del “Wood Handbook, USDA”. Pequeñas probetas clear.

Contenido de humedad seco \Rightarrow 12%

Contenido de humedad verde \Rightarrow superior al punto de saturación de las fibras.

Como se observa en la Gráfica N°15, el *P. elliottii* presenta valores de MOE muy similares a otras especies de pinos como ser el *P. radiata*, *P. resinosa* y *P. ponderosa*. A su vez, presenta valores de MOE mayores que el *P. taeda* de Rivera (31% mayor) y menores que *P. caribaea* (41% menor) y *E. grandis* de Rivera (24% menor).

6. CONCLUSIONES.

- 1) Los métodos no-destructivos para cálculo del módulo de elasticidad que fueron comparados con el método de flexión estática con pesas, presentaron coeficientes de correlación altos y positivos.
- 2) El método de frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer) se presentó como el más apropiado para la estimación del MOE, ya que presenta alta reproducibilidad, es simple y no requiere poner en contacto con la madera ni clavos ni sensores.
- 3) Los coeficientes de correlación obtenidos entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas de cada troza (tanto de tablas verdes como de tablas secas), fue alto y positivo. Esto demuestra que ensayando las trozas se podría llegar a estimar el MOE de las tablas que de ella se obtengan.
- 4) El coeficiente de correlación encontrado entre el MOE de tablas verdes (por encima del punto de saturación de las fibras) y el MOE de tablas secas es alto y positivo. Se observó un aumento del MOE del orden del 18% cuando las tablas pasaron del estado verde a seco.
- 5) No se encontró ninguna relación entre el MOE de trozas y la clase diamétrica. Tampoco se encontró ninguna relación entre el MOE de las tablas (verdes y secas) y la clase diamétrica.
- 6) La densidad no presentó una buena correlación con el MOE de las tablas secas. Esto se debe seguramente a la presencia de madera de compresión y de madera con alto contenido de extractivos (ej: resina).
- 7) Se encontraron diferencias significativas entre las tres categorías de tablas propuestas (Tablas A, B y C). Esto demuestra las diferencias que existen entre la madera juvenil y la madera adulta. Se deberá determinar, para *Pinus elliotti* de San José, en que número de anillos ocurre la transición entre los dos tipos de madera.
- 8) Mediante la clasificación según normas JAS, se determinó que las 80 tablas analizadas abarcaban 5 categorías (desde E 50 a E130). El 75% de las tablas estudiadas, se ubicaron en las categorías E 90, E 110 y E 130, lo que implica que son tablas aptas para ser utilizadas para construcción.
- 9) El hecho de que se hayan encontrado árboles con valores de MOE superiores a otros, demuestra que es posible aumentar la calidad de la madera de *Pinus elliottii* mediante mejoramiento genético y manejo forestal.
- 10) Se observó presencia de madera de compresión en algunas de las trozas estudiadas. Se deberá investigar más acerca de las razones que provocan la formación de este tipo de madera, que presenta características no deseadas en sus propiedades físicas y mecánicas.
- 11) El índice que se obtiene mediante el cociente “MOE / densidad”, puede ser útil para detectar con más facilidad la presencia de madera de compresión.
- 12) El *Pinus elliottii* de San José, presentó valores de MOE similares a otras especies conocidas en los mercados internacionales como ser *Pinus radiata*, *Pinus resinosa* y *Pinus ponderosa*.
- 13) Se deberán estudiar otras propiedades físicas y mecánicas de *Pinus elliottii*, tanto de San José como de otras zonas del país, para así tener un conocimiento más profundo de esta especie y así poder promover nuevos productos y nuevos mercados.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. AGRICULTURE HANDBOOK 72; *Wood Handbook*, Wood as an engineering material, USDA, 1999.
2. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS 2000. Volume 04-10, Wood. American Society for Testing and Materials, 2000: 708 p.
3. CORONEL, E./ Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994: 187 p.
4. KOLLMANN, F.; COTÉ, W. / Principles of Wood Science and Technology. State University of New York, 1968: 299-311.
5. KOMATSU, K. / Strength characteristics of sugi wood as a structural material. Proceedings of the symposium for promoting sugi wood as a structural material. *Timber Research Group Meeting*, Japan Wood Research Society, 1998: 9-20.
6. NAKAI, T.; TANAKA, T. / Non-destructive test by frequency of full-size timber for grading, *Building Research and Practice*. 1989, 17 (1).
7. 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: 23-25.
8. OHTA, S.; WATANABE, H. / Mechanical properties of juvenile wood in the stem of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), *Japan wood Research Society*, 1968, 14 (5).
9. OHTA, S.; KELLER, R.; JANIN G. / Fertilization et qualité du *Pin Maritime*. *Annales des sciences forestières*, 1975.
10. PÉREZ del CASTILLO, A. / Propiedades Mecánicas y Calidad de Madera de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay; Informe de Investigación N°4, LATU-JICA, 2001: 35p.
11. RAMSAY SMITH, W.; BRIGGS D./ Juvenile Wood: Has it come of age? Forest Products Research Society, 1985.
12. STRUCTURAL SOFTWOOD LUMBER. Japanese Agricultural Standard; 1991.
13. 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 LATU, 2000: 24 p.
14. TUSET, R.; DURÁN, F./ Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización, 1986. Editorial hemisferio Sur. 688 p.
15. URUGUAY. ALTERNATIVAS PARA LA TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL DEL RECURSO FORESTAL; Unidad de desarrollo sostenible y medio ambiente, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, 1996, 168 p.