

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGROMÍA

EVALUACION DE LAS PROPIEDADES FISICAS FUNDAMENTALES,  
MECANICAS Y CLASIFICACION VISUAL DE TABLAS DE  
MADERA DE UNA PLANTACION DE  
Eucalyptus grandis Maiden ex Hill  
DEL DEPARTAMENTO DE DURAZNO DE  
26 AÑOS DE EDAD

por

Carolina OLIVERA BENAVIDEZ  
Patricia CARDENAS RODRIGUEZ

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2007

Tesis aprobada por:

Director:

---

Ing. Agr. Carlos Mantero

---

Dr. Sadaaki Ohta

---

Ing. Agr. Luis Soria

Fecha:

Autores:

---

Carolina Olivera Benavidez

---

Patricia Cárdenas Rodríguez

## AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres y hermanos por su constante ayuda a lo largo de toda nuestra carrera.

A Diego y a Juan Francisco, por su comprensión y apoyo diario.

Al doctor Sadaaki Ohta y al Ing. Agr. Carlos Mantero por habernos transmitido su entusiasmo y por su dedicación a lo largo de todas las etapas de este trabajo.

A todo el equipo técnico del Departamento de Proyectos Forestales del LATU en especial a: Javier Doldán, Per. Agr Hugo O'Neill, Francisco Gatto, Ing. Quím. Raul de Castro, Tec. Agr. Felipe Tarigo, Ing. Quím. Silvia Böthig. Por su colaboración y dedicación en este trabajo.

A la señora Sully por su amable y desinteresada colaboración.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA	3
2.1.1. <u>Micro estructura de la madera</u>	4
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS	6
2.2.1. <u>Definición de propiedades físicas</u>	6
2.2.2. <u>Densidad aparente básica (dab)</u>	6
2.2.2.1. Antecedentes de trabajos realizados en E. grandis en el Uruguay	7
2.2.2.2. Variaciones de la densidad	9
2.2.2.3. Variaciones intraespecíficas de la densidad	9
2.2.2.4. Variaciones de la densidad dentro del árbol en sentido radial	10
2.2.2.5. Variaciones de la densidad dentro del árbol en sentido axial	11
2.2.2.6. Variación genética y ambiental de la densidad	12
2.2.2.7. Variación de la densidad con la velocidad de crecimiento	12
2.2.2.8. Variación de la densidad con la edad	13

2.2.3. <u>Contracción y punto de saturación de las fibras (PSF)</u>	13
2.3. CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS	14
2.3.1. <u>Porcentaje de duramen</u>	14
2.3.2. <u>Largo de fibra</u>	15
2.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPIEDADES MECANICAS	16
2.4.1. <u>Definición de propiedades mecánicas y factores de variación</u>	16
2.4.1.1. Variación con la densidad	17
2.4.1.2. Variación con el ángulo microfibrilar	17
2.4.1.3. Variación con el contenido de humedad	18
2.4.1.4. Variación con los defectos de la madera.	19
2.4.1.5. Variación con la edad	19
2.4.2. <u>Determinaciones de módulo de rotura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)</u>	19
2.4.2.1. Por métodos de ensayo no destructivos	19
2.4.2.2. Fundamentos de ensayos acústicos	19
2.4.2.3. Por métodos de ensayo destructivo	20
2.4.3. <u>Módulo de elasticidad (MOE)</u>	20
2.4.4. <u>Módulo de rotura (MOR)</u>	22
2.5. VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS CAUSADAS POR LA MADERA JUVENIL	23
2.6. CLASIFICACIÓN VISUAL	24
3. <u>MATERIALES Y METODOS</u>	25

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EXPERIMENTAL	25
3.2. METODOLOGIA DE TRABAJO	26
3.2.1. <u>Obtención de probetas para características anatómicas fundamentales</u>	27
3.2.1.1. Largo de fibras de 18 árboles en la troza basal.	27
3.2.1.2. Porcentaje de duramen de 18 árboles en la primera troza.	29
3.2.1.3. Contracción radial, tangencial y volumétrica	30
3.2.1.4. Contenido de humedad	33
3.2.1.5. Densidad aparente básica	34
3.2.1.6. Densidad corriente para tablas de tamaño real.	35
3.2.2. <u>Obtención de vigas de 2" x 6"</u>	35
3.2.2.1. Clasificación visual	36
3.2.2.2. MOE en tablas de tamaño real (ensayo no destructivo)	38
3.2.2.3. MOE y MOR por método destructivo	40
3.2.3. <u>Obtención de pequeñas probetas (pp) libres de defectos</u>	42
3.2.3.1. _Ensayo de flexión estática en pequeñas probetas en tres puntos.	42
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES.	44
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	45

4.1. LARGO DE FIBRA	45
4.1.1. <u>Largo de fibra para madera juvenil y madera adulta</u>	46
4.1.2 <u>Largo de fibra según clase diamétrica baja ,media y alta</u>	48
4.1.3. <u>Largo de fibra promedio de la población y su variación en el radio</u>	50
4.2. PORCENTAJE DE DURAMEN	52
4.2.1. <u>Relación entre porcentaje de duramen y velocidad de crecimiento</u>	53
4.3. CONTRACCIÓN TANGENCIAL RADIAL Y VOLUMÉTRICA	54
4.3.1. <u>Contracción desde médula a corteza</u>	55
4.3.2. <u>Anisotropía o relación entre contracción tangencial y radial (Bt/Br)</u>	57
4.4. DENSIDAD APARENTE BÁSICA	59
4.4.1. <u>Densidad aparente básica según ubicación en el radio</u>	60
4.5. DENSIDAD APARENTE BASICA, CONTRACCION Y LARGO DE FIBRA	61
4.5.1. <u>Correlación entre densidad aparente básica y contracción volumétrica.</u>	62
4.5.2. <u>Variación de contracción volumétrica total, densidad densidad aparente básica y largo de fibra en el radio</u>	64
4.5.3. <u>Análisis estadístico de la variación en el radio de largo de fibra, contracción y dab</u>	65

4.6. CLASIFICACIÓN VISUAL	67
4.7. PROPIEDADES MECANICAS	69
4.7.1. <u>Correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas</u>	70
4.7.2. <u>Análisis de MOE y MOR en tablas de tamaño real según su ubicación en el radio</u>	73
4.7.3. <u>Clasificación de tablas según norma JAS y propiedades mecánicas</u>	73
4.8. RESULTADOS DE TODAS LAS PROPIEDADES ESTUDIADAS	75
5. <u>CONCLUSIONES</u>	76
6. <u>RESUMEN</u>	77
7. <u>SUMMARY</u>	78
8. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	79



## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Resumen de resultados de densidades para E. grandis.	8
2. Datos de interés de los 18 árboles estudiados	25
3. Largo de fibra según posición en el radio	46
4. Largo de fibra para madera juvenil y madera adulto	47
5. Porcentaje de duramen y correlación con velocidad de crecimiento	52
6. Promedios de Contracción radial, tangencial y volumétrica en dos rangos de contenido de humedad	54
7. Valores promedio de contracción según ubicación en el radio	55
8. Contracción radial, tangencial y relación Bt/Br	58
9. Punto de saturación de las fibras	58
10. Valores promedio de densidad aparente básica para madera juvenil, de transición y adulta	60
11. Valores promedio de densidad aparente básica, contracción tangencial, radial y volumétrica según ubicación radial	62
12. Correlación entre densidad aparente básica y contracción para madera juvenil, de transición y adulta	62
13. Resultados de la clasificación visual	68
14. Frecuencia de las categorías de las tablas clasificadas	68
15. Media y distribución de variables	69
16. Coeficientes de correlación entre variables	70

17. Comparación de resultados de MOR Y MOE	72
18. MOE y MOR según ubicación en el radio	73
19. Clasificación de tablas en categorías estructurales según normas JAS	73
20. Resumen de todas las propiedades estudiadas madera juvenil, de transición y adulta	75
Figura No.	
1. Tres cortes de E.grandis de Rivera con microscopio electrónico (SEM)	4
2. Representación esquemática de una fibra de madera..	5
3. Relación módulo rotura y módulo elasticidad según el ángulo microfibrilar.	18
4. Efecto de la madera juvenil sobre las propiedades físicas y mecánicas	24
5. Secuencia de los ensayos realizados	26
6. Ubicación de las probetas de largo de fibra	28
7. Proyector de perfiles	29
8. Ubicación de probetas de contracción	31
9. Probeta para ensayos de contracción y densidad aparente básica	31
10. Micrómetro digital	33
11. Inmersión de las probetas de densidad	35
12. Clasificación de tablas según ubicación con respecto a la medula	36
13. Ejemplo de clasificación visual para una tabla de primera	38

14. Equipo FFT Analyzer . Donde. A⇒ FFT Analyzer; B⇒Micrófo; C⇒ Martillo, D⇒ Poliureta	39
15. Esquema de aplicación de cargas	40
16. Máquina universal	42
17. MOR y MOE en pequeñas probetas libre de defectos.	43
Gráfico No.	
1. Histograma de frecuencias según largo de fibras	45
2. Largo de fibra promedio de médula a corteza en cm según velocidad de crecimiento , alta , media , baja	47
3. Distribución de largos de fibra en la clase diamétrica mas baja (42-48 cm)	48
4. Distribución de largos de fibra en la clase diamétrica media (49-53 cm)	49
5. Distribución de largo de fibra en la clase diamétrica mas alta	49
6. Largo de fibra promedio de médula a corteza en porcentaje de distancia según velocidad de crecimiento alta media y baja	50
7. Largo de fibra según variación en el radio	51
8. Relación entre porcentaje de duramen y velocidad de crecimiento	53
9. Contracción tangencial promedio desde médula a corteza	56
10. Contracción radial promedio desde médula a corteza	56
11. Contracción volumétrica promedio desde médula a corteza	57
12. Punto de saturación de las fibras volumétrica tangencial y radial	59

13. Histograma de la totalidad de probetas	60
14. Densidad aparente básica promedio (g/cm <sup>3</sup> ) según ubicación radial	61
15. Correlación entre contracción volumétrica y densidad aparente básica según posición en radio en porcentaje	63
16. Correlación entre contracción volumétrica y densidad aparente básica	63
17. Variación de dab, contracción y largo de fibra según porcentaje de distancia a médula	64
18. Variación del largo de fibra según % de distancia a médula	66
19. Variación de la dab según % de distancia a médula.	66
20. Variación de la contracción según % de distancia a medula	67
21. MOE por método destructivo según densidad corriente	71
22. Relación entre MOE FFT y de MOE máquina universal	71
23. Porcentaje de tablas según categoría JAS	74

## 1. INTRODUCCION

El 28 de diciembre de 1987 el Uruguay pone en vigencia la tercera ley forestal. Esta dio al sector un marcado impulso promoviendo plantaciones de bosques de latifoliadas y coníferas con diferentes fines productivos. En veinte años se plantaron más de 750.000 ha. Se esperan perspectivas muy favorables para la colocación de madera y los subproductos provenientes de bosques implantados y manejados de manera sustentable, con fines productivos como los que se han realizado en estos últimos años en América del Sur.

El Uruguay está ubicado en una zona templada del hemisferio sur, entre los 30 y 35 grados de latitud, esta ubicación coincide con los principales emprendimientos de plantaciones forestales del mundo.

Los suelos de prioridad forestal se encuentran básicamente en cuatro zonas del país (norte, centro, sur y sudeste) existiendo una gran variabilidad entre ellos.

Uruguay cuenta con un total de 17.600.000 ha, aproximadamente 185.000 ha están ocupadas por coníferas y 541.000 ha por latifoliadas. Si se incluyen los bosques naturales 1.525.000 ha están ocupadas por árboles.

Las plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden abarcan alrededor de 160.000 ha, *Eucalyptus globulus* 270.000 y *Eucalyptus maidenii* 34.000 ha.

También hay plantaciones de *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus camaldulensis*. Estos últimos en general se encuentran formando montes de abrigo, o pequeñas plantaciones (URUGUAY. MGAP. DF, 2005).

Dado el predominio del género *Eucalyptus* es imprescindible caracterizar la madera proveniente de cada región del Uruguay así como de cada una de las especies de *Eucalyptus*.

En este contexto algunas instituciones involucradas directamente con el sector como la Universidad de la República (UDELAR), Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Sociedad de Productores Forestales (SPF), Dirección Forestal (DF) y Asociación de Industriales de la Madera han realizado varios estudios los cuales han permitido desarrollar mejores prácticas

silvícolas y así mejorar la calidad de madera de las plantaciones para poder encontrar los mejores canales de comercialización. Este trabajo se desarrolló dentro de lo que se conoce como el Grupo Técnico de Madera Aserrada de *Eucalyptus* formado por las instituciones antes mencionadas.

El objetivo general es estudiar y presentar los resultados obtenidos de los ensayos físico-mecánicos realizados en tablas y en probetas libre de defectos, así como la clasificación visual de tablas de una plantación de *E. grandis* de 26 años de edad procedentes del departamento de Durazno.

Los objetivos específicos son determinar:

- Propiedades Físicas: Densidad  
Contracción y determinación del PSF
- Características anatómicas: Caracterizar largos de fibra  
Porcentaje de duramen
- Realizar una clasificación visual de tablas.
- Evaluar la variación de madera juvenil y adulta en el radio, tomando en cuenta largo de fibra, densidad aparente básica y contracción.
- Propiedades mecánicas: Módulo de elasticidad y módulo de rotura en probetas de tamaño real de 2.5 m de largo por método destructivo y no destructivo.  
Módulo de elasticidad y módulo de rotura en probetas libres de defectos por método destructivo.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

La madera es un cuerpo de porosidad fina, compuesta por células individuales que cumplen variadas funciones, cada una de las cuales posee una pared celular de contenido diverso y vacío o lúmenes. Es decir que la madera está construida por una estructura formada por la pared celular y las porosidades (Coronel, 1994).

La madera está compuesta, principalmente, por vasos, fibras y parénquima. Por un lado se encuentran los vasos leñosos dispuestos en dirección longitudinal a través de los cuales se da la conducción ascendente de la savia. A veces, pueden ser observados a simple vista como tubos largos. Las fibras son células que están rodeando los vasos. Son de forma alargada y su función es de sostén. De ellas derivan las propiedades de resistencia mecánica de las latifoliadas. Por último, encontramos las células del parénquima axial y radial. Estas son de pared celular delgada y lumen grande. La función que desempeña es de almacenamiento de reservas.

Por presentar diferentes tipos de células la madera es un material heterogéneo. Es anisótropa, es decir que las propiedades físicas y mecánicas dependen de la dirección que se considere. Puede tratarse la madera como un material con tres ejes, longitudinal, radial y tangencial (Coronel, 1994).

Figura No. 1: Tres cortes de *E. grandis* de Rivera con microscopio electrónico (SEM).

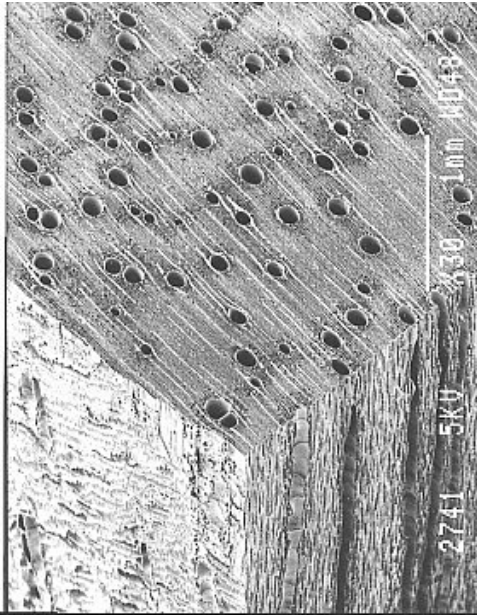


Foto: Ohta <sup>1</sup>

### 2.1.1. Micro estructura de la madera

Las fibrillas de la madera están compuestas por cadenas de alfa celulosa que aparecen unidas entre si en la pared celular formando una estructura reticular o una armadura micelar produciendo zonas cristalinas y amorfas o paracristalinas. También presentan numerosos espacios en donde se ubican la lignina, agua y otras sustancias.

La pared celular está compuesta por tres capas: pared primaria, secundaria y terciaria. En la pared primaria el 45 % de las fibras están ordenados cristalinaamente. En la pared secundaria las fibras se ordenan en un 70 %. Los extremos de esa estructura reticular, que no están ordenados, corren en forma irregular y confusa en la periferia de la red cristalina. La pared terciaria es la capa que forma las laminillas de la pared secundaria.



<sup>1</sup> Ohta, S. 2007. Com. personal.

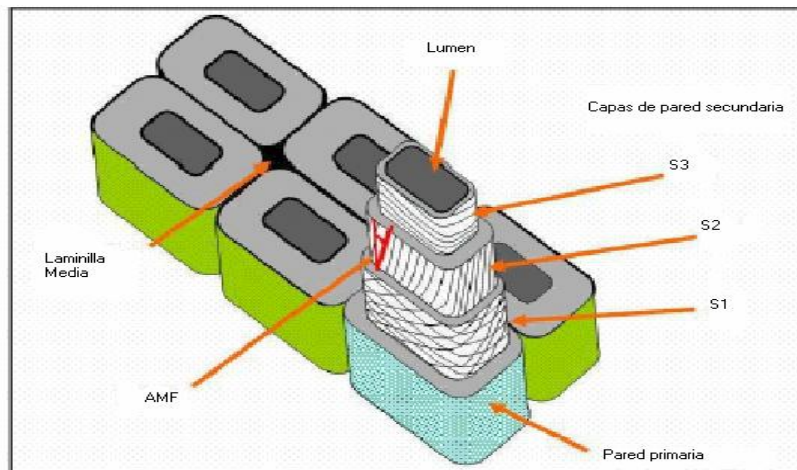
Como se puede ver en la figura No. 2 la pared secundaria se divide en tres capas:

La capa más externa es la S1, le sigue la S2 y la más interna es la S3. La S2 es la capa que más se desarrolla y por lo tanto la que tiene una mayor influencia en las características de la madera.

La S1 se integra con más de una lámina; la orientación de las fibrillas es perpendicular entre 2 láminas contiguas. La S2 tiene varias láminas pero no hay evidencias de que estén entrecruzadas.

La S3 es menos definida en estructura, tiene varias láminas alternando la orientación de las fibras, pero de una manera ordenada como S1 (Tuset y Duran, 1979).

Figura No. 2: Representación esquemática de una fibra de madera.



Fuente: El Hoseiny y Page (1973)

Dentro de la pared secundaria, la S1 presenta una inclinación promedio de las microfibrillas con respecto al eje de la célula de entre 50° a 70°. La S2 cuenta con un mayor espesor y las microfibrillas están orientadas con una dirección longitudinal de 5° a 20° de manera que van enrollando al eje de la fibra en sentido helicoidal (Coronel 1994, Piter 2003).

El ángulo de la hélice o espiral respecto al eje longitudinal de la célula se denomina ángulo microfibrilar (AMF).

Conocer las características de la pared celular secundaria es importante ya que la capa SII es la de mayor espesor y su ángulo microfibrilar es de suma importancia para el estudio de la madera. Esta capa puede absorber los esfuerzos de tracción favorablemente, esto se debe a la orientación mayoritariamente longitudinal de las microfibrillas.

## 2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

### 2.2.1. Definición de propiedades físicas

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento ante los factores que intervienen en el medio ambiente natural sin que este actúe química ni mecánicamente en su estructura interna (Coronel, 1994).

Las propiedades físicas dependen básicamente de:

- La disposición y la orientación de la pared celular de la madera.
- La cantidad de sustancia básica que forma la pared celular.
- Los porcentajes de sustancias estructurales o de material celulósico que contiene el leño.
- La composición química de las sustancias básicas, que explica muchas diferencias cuantitativas en el comportamiento de la madera.
- Contenido de agua que se encuentre presente

### 2.2.2. Densidad aparente básica (dab)

El peso específico y la densidad de la madera son diferentes formas de expresar que cantidad de sustancia de madera está presente (Zobel y Talbert, 1988). En este trabajo esta propiedad será denominada densidad aparente.

La densidad de la madera es una de las propiedades físicas más importantes. De ésta depende la mayoría de las características físicas y mecánicas.

La densidad aparente básica podemos definirla como la relación entre la masa en gramos de madera anhidra y el volumen de madera verde en centímetros cúbicos. La densidad aparente varía entre 0.1 y 0.3 g/cm<sup>3</sup> para

madera livianas y entre 1.2 y 1.4 g/cm<sup>3</sup> para maderas más pesadas (Coronel, 1994).

Es importante destacar que la humedad de la madera influye en el peso así como en el volumen, aunque este último solo varía entre el 0.5 y el 30 % de contenido de humedad, límites dentro de los cuales se produce el fenómeno de contracción e hinchamiento. Por lo tanto, dentro de estos límites, el aumento de peso por un mayor contenido de humedad es compensado por un aumento en el volumen debido al hinchamiento de la madera (Tuset y Duran, 1979).

#### 2.2.2.1. Antecedentes de trabajos realizados en *E. grandis* en el Uruguay

Soria (1979) analizó la variación de la densidad aparente de *E. grandis* de 3 años en el departamento de Tacuarembó y en promedio para la troza basal el valor fue de 0.48 g/cm<sup>3</sup>, para la troza media 0.41 g/cm<sup>3</sup> para la troza apical 0.39 g/cm<sup>3</sup>.

Bianchi y Dibarboure (1993) trabajaron con una plantación de 11 años de edad procedente de Cerro Largo y encontraron una densidad 0.461 g/cm<sup>3</sup>. Además encontraron que existe una gran variabilidad de resultados que van desde 0.340 g/cm<sup>3</sup> a 0.752 g/cm<sup>3</sup>.

Mantero (1999) estudió *E. grandis* de más de 25 cm. de dap, y encontró una densidad de 0.43 g/cm<sup>3</sup> con un coeficiente de variación de 9.59 %.

Pérez del Castillo (2001) trabajó con *E. grandis* de 16.5 años de edad y encontró una densidad corriente de 0.531 g/m<sup>3</sup> en tablas, la población era proveniente de Rivera.

Böthig (2001) trabajó con *E. grandis* de 13.5 años de edad proveniente de Rivera y obtuvo valores para densidad de 0.463 g/cm<sup>3</sup>.

Olaso (2002) encontró para la troza mas baja de las cuatro alturas que estudió, una densidad promedio de 0.405 g/cm<sup>3</sup> para una plantación de *E. grandis* de 12 años de edad procedente de Rivera. Además, estudió la densidad para madera juvenil, madera de transición, y madera adulta, los valores fueron de 0.424, 0.412 y 0.416 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

Doldán (2003) registró una densidad de 0.43 g/cm<sup>3</sup> para *E. grandis* de 18 años de edad, para una población proveniente de Río Negro.

Fernández (2004) observó una densidad de 0.368 g/cm<sup>3</sup> en *E. grandis* de 2 y 3 años de edad del departamento de Rivera.

GRUPO TECNICO DE MADERA ASERRADA (2005) encontraron una densidad aparente básica de 0.402 g/cm<sup>3</sup> para una plantación de 22 años de edad del departamento de Rivera.

Finocchetti (2005) trabajó con dos poblaciones de *E. grandis* una de 4 y otra de 8 años de edad, encontró una densidad básica de 0.406 y 0.455 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. Las dos procedentes de Río Negro.

Carballo (2006) estudió árboles de *E. grandis* de 12 años de edad y observó valores promedio de densidad de 0.372 g/cm<sup>3</sup>.

A modo de resumen, en el cuadro No 1, se presentan los resultados encontrados.

Cuadro No. 1: Resumen de resultados de densidades para *E. grandis*

<b>Año de publicación</b>	<b>Autor</b>	<b>Edad de la plantación</b>	<b>Método utilizado</b>	<b>DENSIDAD g/cm<sup>3</sup></b>
1979	Soria	3	UNIT 237-70	0.48
1993	Bianchi Dibarboure	11	UNIT 237-70	0.461
1993	Bianchi Dibarboure	11	Máximo tenor de humedad en chips	0.521
1999	Mantero	-	ASTM D 2395	0.43
2001	Pérez del Castillo	16.5	ASTM 143.383	0.531
2001	Böthig	13.5	ASTM D 2395	0.463
2002	Olaso	12	Tappi 258	0.405
2003	Doldán	18	ASTM D 2395	0.43
2004	Fernández	2 y 3	Volumen por inmersión	0.368
2005	GTMA*	22	ASTM D 2395	0.402
2005	Finocchetti	4	Tappi 258	0.406
2005	Finocchetti	8	Tappi 258	0.455
2006	Carballo	12	Desplazamiento de volumen	0.372

\*GTMA: Grupo técnico de madera aserrada.

#### 2.2.2.2. Variaciones de la densidad

La densidad no es una característica simple de la madera sino una combinación de características, cada una de las cuales posee un sólido patrón hereditario.

La densidad depende de la cantidad de madera formada en verano, ya que las células que se forman son de pared gruesa. También depende del tamaño de las células y del grosor de la pared. El árbol con células pequeñas tiene mayor densidad ya que estas tienen paredes más gruesas.

#### 2.2.2.3. Variaciones intraespecíficas de la densidad

Van Buijtenen et al., Webb, Skolmen, citados por Zobel y Talbert (1988) sostienen que en todas las características de la madera estudiadas, la variación entre árboles de la misma especie y edad que crecen en el mismo sitio es grande.

Centurión y Llano (1995) trabajaron con árboles de *E. grandis* de 12 años de edad provenientes de Cerro Largo y encontraron que existe una alta variabilidad intraespecífica.

Existe una gran variación entre árboles de una misma especie, ya que no son iguales, aunque crezcan en sitios uniformes. La mayoría de las características de la madera tienen alta variación, lo que da lugar a que siempre exista una buena base para establecer cualquier programa de mejora genética.

Downen, citado por Fernández (2004) encontró que la variación de densidades entre los árboles responde tanto a factores ambientales como genéticos.

Zobel y Talbert (1988) asociaron la variabilidad existente entre árboles de *E. grandis* de una misma edad que crecen en sitios adyacentes, al grosor de la pared celular. Esta característica presenta una buena heredabilidad.

#### 2.2.2.4. Variaciones de la densidad dentro del árbol en sentido radial

Doldán (2003) encontró que la madera cercana a la médula tiene valores de densidad menores que los cercanos a la corteza. Opina que esto se debería a que la madera cercana a la médula está constituida por madera juvenil, luego vendría una zona de transición y por último una zona constituida por madera adulta. Este patrón es el que se muestra en la mayoría de la bibliografía disponible.

Malán, citado por García y Tarigo (2008) encontró que en *E. grandis* la densidad aumenta desde médula a corteza. Una vez que empieza a generarse madera adulta comienza a estabilizarse.

Centurión y Llano (1995) no encontraron un patrón de comportamiento para la variación de la densidad en el radio. Encontraron que el 57 % de los árboles estudiados no se ajustó a ningún modelo propuesto por los autores. Del 43 % restante, la mitad tuvo un comportamiento lineal, donde se ve que la densidad aumenta de médula a corteza. Para la otra mitad se observó una respuesta cuadrática, allí se ve que la densidad desciende a partir de la médula y luego aumenta hasta la corteza.

Olaso (2002) encontró para *E. grandis* de 12 años de edad que los valores de densidad varían desde médula a corteza. Los valores más altos se encuentran en la madera juvenil, luego hay un descenso (madera de transición) y por último hay un incremento que no alcanza los valores encontrados en la madera juvenil.

Otros autores difieren de lo antes expuesto, éstos encontraron que la densidad disminuye de médula a corteza. A continuación se exponen algunos de estos resultados.

Brasil y Ferreira, citados por Fernández (2004) estudiaron la variación radial de *E. grandis* de 16 años de edad y observaron descenso de la densidad de médula a corteza.

De Mello et al., citados por Fernández (2004) trabajaron con *E. grandis* de 10 y 12 años de Tacuarembó y no encontraron diferencias significativas en los puntos de medición desde médula a corteza.

Malán, citado por Fernández (2004) observó que si bien existen variaciones entre árboles en cuanto a la relación de la densidad básica con la distancia a médula, esta disminuye hasta aproximadamente cerca de la médula y luego aumenta hacia la corteza.

#### 2.2.2.5. Variaciones de la densidad dentro del árbol en sentido axial

Si bien en este trabajo no se estudia la variación de la densidad en sentido longitudinal, es importante conocer como se comporta.

La variación de las propiedades en sentido axial no es tan acentuada como la variación en sentido radial. Existen muchos resultados publicados en los cuales se encuentra que la densidad aumenta con la altura. Algunos afirman que existe una disminución de la densidad con la altura, otros que se produce una disminución inicial y luego un incremento, también existe bibliografía que dice no encontrar un patrón definido.

Soria (1979) analizó la variación del peso específico aparente de *E. grandis* de 5 años y concluyó que este es mayor en la base que en el resto del árbol.

Según Malán, citado por Fernández (2004) la densidad aumenta con la altura aunque puede haber un descenso inicial. Existe un cilindro de madera juvenil que se extiende desde la base hasta el ápice del árbol, la proporción de madera juvenil por debajo de la mitad de la altura se incrementa.

Bianchi y Dibarboure (1995) trabajaron con *E. grandis* de 12 años de edad del departamento de Cerro Largo y encontraron que la relación entre la densidad y la altura es confusa y que no existe un único modelo que sea capaz de explicar la variación para todos los árboles.

Centurión y Llano (1995) tampoco encontraron un modelo único que explicara el comportamiento de la densidad con la altura. El 54 % de los árboles estudiados no se ajustó a ningún modelo de regresión, el 46 % se ajustó a modelos cuadráticos o cúbicos.

#### 2.2.2.6. Variación genética y ambiental de la densidad

El grado de control genético de cualquier propiedad se mide por la heredabilidad.

La densidad de la madera está cerca de ser la característica óptima para ser manipulada genéticamente debido a la gran variación que existe entre un árbol y el otro, y a la alta heredabilidad.

De Souza, citado por Viera y Serrentino (2007) trabajó con árboles de *E. grandis* y de *Eucalyptus saligna*. Obtuvo una alta heterogeneidad entre las procedencias, y dentro de las mismas para las dos especies y destaca que es mayor la variabilidad entre procedencias que entre especies.

Las propiedades de la madera dependen tanto del control genético como del control ambiental pero, afortunadamente, la interacción genotipo ambiente es muy pequeña para esta propiedad, excepto en aquellas condiciones en que las diferencias ambientales sean muy grandes (Zobel y Talbert, 1988).

Malán, citado por Bocage y Ulery (2006) afirma que la densidad esta significativamente afectada por efectos silvícolas como la densidad de plantación.

#### 2.2.2.7. Variación de la densidad con la velocidad de crecimiento

La falta de una firme correlación entre peso específico y velocidad de crecimiento, significa que no es necesario sacrificar madera por unidad de volumen, cuando se trata de hacer mejoramiento genético por esta característica (Zobel y Talbert, 1988).

Howe, citado por Zobel y Talbert (1988) en el caso de las latifoliadas dice tener poca información sobre la relación de la tasa de crecimiento y la densidad de madera.

Taylor, citado por Fernández (2004) trabajó con *E. grandis* de 16 años y encontró que los árboles que se elongan mas rápido producen madera con menor densidad.

Malán, citado por Fernández (2004) concluye, con certeza, que se puede asumir que al aumentar las tasas de crecimiento a través de prácticas



silvícolas no se provocan cambios detrimentales en las propiedades de la madera.

Wilkins (1989) trabajó con *E. grandis* de 9 años de edad, y concluyó que no hay relación entre el peso específico aparente y la velocidad de crecimiento.

#### 2.2.2.8. Variación de la densidad con la edad

La densidad de la madera varía con la edad del árbol por lo que es muy importante conocer la correlación que existe entre estas. Y así poder tratar la posibilidad de manejar la densidad de la madera a una edad temprana y acelerar el proceso de mejora genética.

Taylor, citado por Achugar y Scaglione (2003) asegura que existe una alta correlación entre la densidad básica de la madera juvenil y la madera de mayor madurez formada hacia las zonas externas del fuste.

Trugilho, citado por Viera y Serrentino (2007) comparando material de *E. grandis* de 12, 24 y 36 años de edad, demuestra que existe una clara tendencia de que la densidad aumenta con la edad. Luego se ve una tendencia a la estabilización, este efecto estaría explicado por la aproximación a las edades de producción de madera adulta donde las características de ésta se hacen más estables.

#### 2.2.3. Contracción y punto de saturación de las fibras (PSF)

La contracción de una pieza se produce como consecuencia de la pérdida de agua por debajo del PSF. El contenido de humedad correspondiente al PSF se sitúa, para la mayoría de las especies, entre 25 y 35 % de contenido de humedad.

El PSF puede ser definido como el momento en que la madera deja de tener agua libre en los capilares gruesos y en los espacios celulares. El valor de PSF varía según la especie.

Por encima de este valor la acumulación de agua no produce variaciones en la pared celular ya que esta se deposita en los orificios, es por esto que las propiedades físico mecánicas permanecen prácticamente constantes.

El PSF a efectos prácticos puede considerarse en 28 % de contenido de humedad. A partir de éste el agua perdida es extraída de las paredes. Por lo tanto, produce alteraciones tanto de las dimensiones como del comportamiento resistente y elástico de las piezas. Es decir, que en la medida que disminuye el contenido de humedad por debajo del PSF, se produce una reducción de las dimensiones y un aumento en general de la resistencia y rigidez de la madera.

La fuerte anisotropía que caracteriza a la madera origina grandes diferencias en el valor de las contracciones, experimentándose las mayores en la dirección tangencial que pueden alcanzar hasta el 10 %, siguiéndole en importancia la radial con un 6 % y en menor medida la longitudinal con valores desde 0.1 a 0.3 % (Coronel, 1994).

Mantero (1999) estudió árboles con un dap mayor a 25 cm de todo el país. El valor para la contracción total lineal tangencial fue de 9.49 % con un coeficiente de variación de 17.75 %. Para la contracción radial el valor fue de 5.10 % con un coeficiente de variación de 20.46 %.

Doldán (2003) estudió *E. grandis* de 18 años de edad del departamento de Cerro Largo, y encontró una contracción desde verde a 18 % de contenido de humedad tangencial de 3.6 %. La contracción radial fue de 1.44 % y la volumétrica de 5.02 %. Para los contenidos de humedad desde verde hasta anhidro los resultados encontrados fueron: para contracción tangencial, radial y volumétrica valores de 8.11, 4.61 y 12.72 % respectivamente.

Por otro lado encontró valores de PSF tangencial, radial y volumétrico de 32.4, 25.9 y 29.7 % de contenido de humedad respectivamente. Los coeficientes de contracción hallados fueron: para el volumétrico de 0.43, para el tangencial de 0.25 y para el radial 0.8 %.

## 2.3. CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS

### 2.3.1. Porcentaje de duramen

El duramen puede definirse como la porción de madera de color mas oscuro producto de la transformación de la albura por acumulación de numerosas sustancias que se van depositando en el interior de las células, tales como aceites esenciales, resinas, taninos, gomas, compuestos fenólicos, y sustancias cromógenas que colorean la madera.

Rodríguez et al., citados por Olaso (2002) en un trabajo realizado en Brasil con clones de *Eucalyptus urograndis* de 5 a 6 años de edad, encontraron que el duramen está presente en todos los árboles estudiados hasta un 65 % de la altura total. El porcentaje de duramen disminuye desde la base hacia la copa del árbol. Se citan valores de 51 y 18 % de duramen en la base y 65 % de la altura total respectivamente.

En Nueva Gales, Wilkins, citado por Olaso (2002) trabajó con *E. grandis* de 9.5 años de edad y concluyó que el porcentaje de albura se correlaciona positivamente con la altura en el fuste y negativamente con la velocidad de crecimiento.

Olaso (2002) estudió una población de *E. grandis* de Rivera de 12 años de edad y encontró valores promedio de porcentaje de duramen que van de 60 % a 70 %, para la troza basal. Además encontró que el porcentaje de duramen disminuye con la altura, y no encontró diferencias entre los valores de porcentaje de duramen promedio para distintas clases de dap.

### 2.3.2. Largo de fibra

Las fibras son las células que se encuentran rodeando los vasos leñosos. Presentan una forma alargada, con paredes gruesas y cumplen la función de sostén de la planta, de ellas derivan las propiedades de resistencia mecánica de las maderas de latifoliadas.

El largo de fibra proporciona información sobre la forma de dispersión del material celular, es decir sobre el patrón de construcción de la estructura de la madera. Es esperable que tenga relación con la resistencia. En el caso de la industria del papel, se sabe que a mayor largo de fibras se obtiene un producto con mayor resistencia (Böthig, 2001).

Esta variable se utiliza para identificar la juvenilidad de la madera debido a que presenta una alta correlación con el ángulo microfibrilar (AMF) el cual es un muy buen indicador de juvenilidad.

Soria en 1979 trabajó con 5 árboles de *E. grandis* de 3 años de edad del departamento de Tacuarembó y observó diferencias en la longitud de fibra en las tres alturas estudiadas. En la troza basal encontró valores promedio de 0.66 mm.

Downes et al., citados por Olaso (2002) sostienen que hay una variación sistemática de la morfología de la fibra en el radio. Los datos obtenidos

fueron divididos a lo largo del radio en tres zonas, es así que se llegó a determinar que existen tres zonas claras, una de madera juvenil, (de 0 a 33 % de distancia a la médula) otra con madera de transición (33 a 66 % de distancia a la médula) y el resto de madera adulta.

Taylor, citado por Bocage y Ulery (2005) muestreó *E. grandis* a diferentes alturas y en numerosos puntos de médula a corteza, y llegó a las siguientes conclusiones: el largo de fibra no está influenciado por la altura de muestreo y es prácticamente constante a diferentes alturas del árbol. El largo de fibra se incrementa al aumentar la distancia desde médula a corteza, es decir con la edad.

Según Acosta Cruz, citado por Bocage y Ulery (2005) la longitud máxima de fibra para *E. grandis* es de 1400  $\mu\text{m}$ , con un mínimo de 800  $\mu\text{m}$  y un valor promedio de 1100  $\mu\text{m}$ .

Olaso (2002) estudió árboles de *E. grandis* de 12 años de edad procedentes de Rivera y encontró un promedio de longitud de fibra de 0.88 mm, con un máximo de 1.15 y con un mínimo de 0.58 mm con un coeficiente de variación de 14 %. También estudió árboles de 10 años de edad de Paysandú y encontró un promedio de largo de fibra de 0.83 mm con un máximo de 1.15 mm y un mínimo de 0.449 con un coeficiente de variación de 20 %. Observó que existe una variación radial, o sea, el largo de fibra aumenta a hacia la corteza.

Doldán (2003) estudió árboles de 18 años de edad del departamento de Cerro Largo y encontró una longitud de fibra promedio 0.78 mm para madera juvenil y de 1.05 mm para madera adulta, con un coeficiente de variación de 18 % y de 8.86 % respectivamente.

## 2.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROPIEDADES MECANICAS

### 2.4.1. Definición de propiedades mecánicas y factores de variación

Las propiedades mecánicas de la madera indican el comportamiento cuando sobre ella actúan cargas o sollicitaciones exteriores principalmente a las deformaciones.

En general la determinación de las propiedades mecánicas de la madera se realiza mediante la ejecución de ensayos planificados, conforme a métodos normalizados (Coronel, 1994).

Las propiedades mecánicas según Kollman y Cote (1984) son influenciadas por diversos factores como la edad de los árboles, ángulo microfibrilar, tenor de humedad, temperatura, constituyentes químicos, masa específica, estructura anatómica duración de la tensión y la deformación, fallas de la madera, presencia de nudos y otros defectos.

#### 2.4.1.1. Variación con la densidad

Por general, a mayor densidad mayor es la resistencia de la madera a las acciones mecánicas, esto se debe al mayor contenido de tejido leñoso en la estructura de la pared celular.

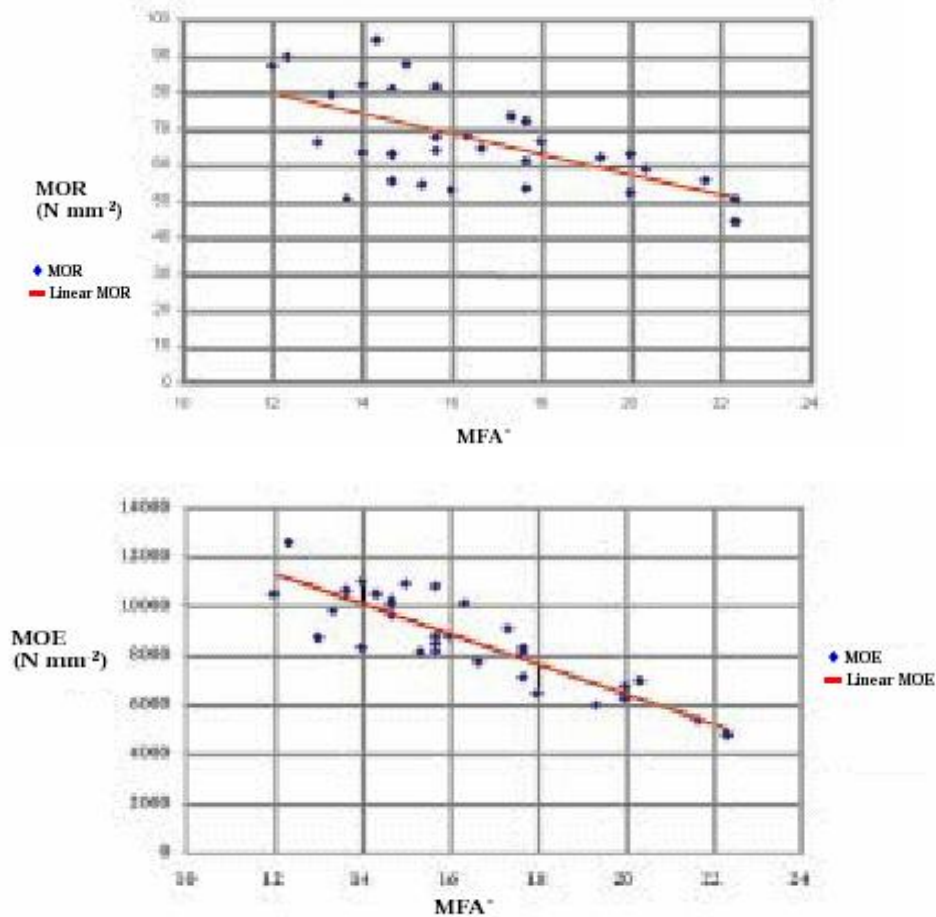
Pérez del Castillo (2001) encontró un coeficiente de correlación de 0.639 entre la densidad de tablas verdes y el módulo de elasticidad de las tablas medido con FFT Analyzer. También encontró un coeficiente de correlación de 0.624 entre densidad y módulo de elasticidad, y un coeficiente de correlación de 0.825 entre densidad y módulo de rotura.

Rogelio et al., citados por Viera y Serrentino (2007) encontraron que entre las propiedades físicas de la madera, la densidad fue la única que presentó alta correlación estadística con las propiedades mecánicas, lo que estaría indicando que la densidad básica puede ser utilizada para estimar de forma rápida y precisa la resistencia mecánica

#### 2.4.1.2. Variación con el ángulo microfibrilar

El ángulo microfibrilar es la característica fundamental que determina las propiedades de la madera y demuestra que éste varía en función del valor y de la altura. Se puede ver en la figura No. 3 que cuanto mayor es el ángulo microfibrilar menores serán los valores de módulo de elasticidad y módulo de rotura.

Figura No. 3: Relación módulo rotura y módulo elasticidad según el ángulo microfibrilar



Fuente: Treacey et al. (2000).

#### 2.4.1.3. Variación con el contenido de humedad

Las propiedades mecánicas varían considerablemente según el contenido de humedad. Sobre el PSF el contenido de humedad no afecta las propiedades mecánicas, pero si varían considerablemente cuando el contenido de humedad es inferior al PSF.

Pérez del Castillo, citado por Fernández (2004) encontró que trabajando con tablas de *Pinus ellottii* con 9.7 % de contenido de humedad las propiedades mecánicas resultaron mayores que cuando se trabajó con tablas verdes (contenido de humedad superior a 30 %).

#### 2.4.1.4. Variación con los defectos de la madera

Los nudos muertos como vivos, ocasionan defectos visibles en la madera produciendo una gran variación en las propiedades mecánicas provocando disminución en los valores de resistencia. Esto se debe a que cuando disminuye la cantidad de material resistente interrumpe la continuidad de las fibras, y en la proximidad del nudo se desvía una cantidad importante de fibras lo que puntualmente da lugar a tensiones que disminuyen visiblemente la resistencia.

#### 2.4.1.5. Variación con la edad

De Castro Silva et al., citados por Viera y Serrentino (2007) trabajando con 4 edades de árboles de 10, 14, 20 y 25 años verificaron que el módulo de rotura tiene correlación positiva con la edad de los mismos. Los mayores valores de módulo de elasticidad y módulo de rotura fueron encontrados en árboles de mayor edad.

### 2.4.2. Determinaciones de módulo de rotura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE)

#### 2.4.2.1. Por métodos de ensayo no destructivos

Por métodos no destructivos entendemos aquellos métodos que pueden determinar propiedades mecánicas, o la aptitud para ciertos usos de la madera, sin destruirla. Estos son muy importantes y actualmente están empezando a sustituir a los métodos destructivos, ya que por lo general estos últimos son de mayor costo

Los métodos no destructivos son variados. En pruebas sobre maderas se emplean por lo general los acústicos y los ultrasónicos.

#### 2.4.2.2. Fundamentos de ensayos acústicos

Las ondas acústicas o sonoras teóricamente se pueden propagar en cualquier medio o cuerpo donde existan átomos o moléculas que puedan vibrar elásticamente, es por esto que las ondas pueden propagarse en medio sólido, líquido o gaseoso

En el caso de la madera es un sólido, las ondas acústicas pueden propagarse como ondas transversales, longitudinales o ambas a la vez en distintos grados de combinaciones.

Las ondas acústicas producen efectos en la madera. La velocidad de propagación del sonido depende de la densidad y del módulo de elasticidad.

#### 2.4.2.3. Por métodos de ensayo destructivo

Son todos aquellos ensayos en los cuales las muestras se someten a cargas crecientes hasta alcanzar un estado límite que puede provocar la rotura de la madera o bien su agotamiento, lo que se traduce posteriormente en la imposibilidad de usarla nuevamente (Coronel, 1996).

Estos ensayos dan resultados muy completos para las características de las propiedades mecánicas. Proporcionan el dato, en si mismo, del módulo de rotura el cual es muy importante a la hora de clasificar la madera estructural.

#### 2.4.3. Módulo de elasticidad (MOE)

El MOE mide la capacidad de un material para recuperar sus dimensiones iniciales luego de ser sometido a un esfuerzo.

Podemos definirlo como la relación entre el esfuerzo por unidad de superficie sobre la deformación por unidad de longitud. Es una medida de flexibilidad o de rigidez de la madera. Esta propiedad como las otras también se encuentra afectada por la anisotropía de la madera. Cuanto mas alto sea el valor mayor será su rigidez (Tuset y Duran, 1979).

Soria (1979) encontró valores de MOE de 14015 MPa en la zona basal de los árboles de *E. grandis* estudiados.

Mantero (1999) trabajó con 20 probetas de *E. grandis* de árboles de 25 cm de diámetro de diferentes edades y de diferentes zonas del país. Obtuvo datos de MOE promedio de 13800 MPa en probetas secas al 12 %, con un coeficiente de variación de 22 %.



Pérez del Castillo (2001) trabajó con 52 probetas libres de defectos de 10 trozas basales de *E. grandis* de 16.5 años y encontró un MOE promedio de 11300 MPa con un coeficiente de variación de 17 %. Para las probetas libres de defectos, los coeficientes de correlación hallados fueron de 0.624 entre MOE y densidad, 0.895 entre MOR y MOE y 0.825 entre MOR y densidad. También encontró que la estimación del MOE mediante el método basado en la frecuencia fundamental de vibración FFT fue estadísticamente igual al obtenido en la máquina universal, para piezas con un 12 % de contenido de humedad.

En el estudio de probetas de tamaño real se encontró valores de MOE con FFT de 12500 MPa con un coeficiente de variación de 14 %. El valor de MOE calculado con máquina universal fue, en promedio, de 12100 MPa con un CV de 15 %.

Olaso (2002) utilizó la máquina universal para realizar los ensayos. En los estudios de árboles de *E. grandis* de 12 años de edad procedente de Rivera encontró un MOE de 10213 MPa, con un mínimo de 9338 MPa, y máximo de 11239 MPa para tablas secas. También estudió una población de *E. grandis* de 10 años de edad, de Paysandú y encontró un MOE promedio de 7939 MPa, con un mínimo de 5105 y un máximo de 9100 MPa para tablas secas.

Pérez del Castillo (2003) para probetas libre de defectos de *E. grandis* de Rivera encontró valores de MOE de 11338 MPa (CV 17 %) y para una población de Río Negro el MOE fue de 12210 MPa (CV 17 %). Para tablas de tamaño real los valores se calcularon con máquina universal, encontrando valores de MOE de 12524 MPa (CV 14 %) y de 12863 MPa (CV 17 %) para las poblaciones de Rivera y Río Negro respectivamente.

GRUPO TECNICO DE MADERA ASERRADA (2004) encontraron en un población de 14 años de *E. grandis* un MOE con FFT de 12425 MPa un MOE con máquina universal de 10853 MPa. Y en pequeñas probetas libres de defectos encontraron valores de MOE de 11766 MPa con un CV de 12.

GRUPO TECNICO DE MADERA ASERRADA (2005) para una población de 18 años observaron un MOE con FFT de 14088 MPa CV 11%, un MOE con máquina universal de 12174 MPa con CV de 15. En pequeñas probetas los datos encontrados para MOE fueron de 11628 MPa CV 18%. A su vez, realizaron la clasificación según categoría JAS, encontrando un mayor porcentaje de tablas en la categoría E110 que equivale a una rango de valores de MOE entre 9810 y 11770.

#### 2.4.4. Módulo de rotura (MOR)

El MOR es el esfuerzo unitario máximo provocado en una probeta de madera en el momento de su rotura (Tuset y Duran, 1979). Es cuando sobre un cuerpo se realiza un esfuerzo que sobrepasa el límite elástico y se producen perturbaciones en el interior de la estructura poniéndose de manifiesto procesos de escurrimiento de las sustancias que forman la estructura micelar de la madera o procesos visco elásticos.

Estos, en primera instancia, solo ocasionan una deformación no proporcional al esfuerzo. Una elevación del esfuerzo estará en relación con la composición y las diferentes sustancias estructurales del interior de la madera, hasta que el cuerpo se rompe, llamándose este el límite de esfuerzo de la rotura a la carga total aplicada.

Mantero (1999) estudió una población de *E. grandis* procedentes de todo el país y encontró un MOR promedio de 80 MPa con 15 % de coeficiente de variación.

Pérez del Castillo (2001) dividió las tablas en tres grupos según las zonas de donde provenían dentro de la troza. Las tablas con mayor porcentaje de madera juvenil eran las que provenían de la zona céntrica de la troza.

Aquellas con mayor porcentaje de madera adulta eran las que provenían de la zona más cercana a la corteza y con un porcentaje medio de las dos eran las tablas provenientes de la zona media entre las dos anteriores.

Comprobó, con un 95 % de confianza, que los MOR de las tablas con mayor contenido de madera juvenil son menores que los de aquellas con mas madera adulta y encontró un valor intermedio cuando las tablas son sacadas de una zona media.

Este autor estudió pequeñas probetas libres de defectos y encontró un MOR promedio de 80 MPa con un coeficiente de variación 15 %. Y en tablas de tamaño real un MOR de 54 MPa con un coeficiente de variación de 21 %.

Olaso (2002) observó en árboles de *E. grandis* de 12 años de edad de Rivera un MOR de 75 MPa con un mínimo de 67 MPa y un máximo de 85 MPa para tablas secas. También encontró en una población de *E. grandis* de 10 años de edad de Paysandú un MOR promedio de 59 MPa con un mínimo de 41 MPa y un máximo de 68 MPa para tablas verdes. El mismo autor observó una correlación de 0.511 entre MOE y MOR en condición seca.

Pérez del Castillo y Venturino (2003) en pequeñas probetas libre de defectos, encontraron valores de MOR medios de 88 MPa (CV 11 %) y 103MPa (CV 16 %) para dos poblaciones de Rivera y Río Negro respectivamente.

En tablas de tamaño real para la población de Rivera los valores de MOR estudiados fueron de 53 MPa (CV 11 %) para la de Río Negro fue de 52 MPa (CV 20 %)

GRUPO TECNICO DE MADERA ASERRADA (2004) estudiaron una población de 14 años de edad y observaron en tablas de tamaño real un MOR de 49.1MPa y en pequeñas probetas hallaron un MOR de 83 MPa CV de 12 %.

En el 2005, el mismo grupo, en una población de 18 años de *E. grandis*, encontraron un MOR con máquina universal de 57.4 MPa CV de 24 %, y en pequeñas probetas de 72 MPa con un CV de 18 %.

## 2.5. VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS CAUSADAS POR LA MADERA JUVENIL

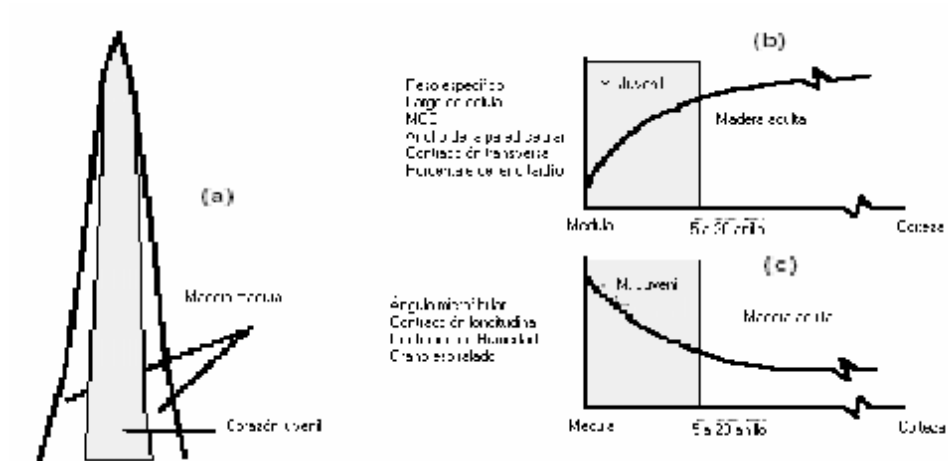
Se denomina madera juvenil a la formada por el cambium cuando este aun es joven. La madera juvenil se forma alrededor de la médula y se localiza a lo largo del fuste. Esta presenta diferencias en sus propiedades físicas, mecánicas químicas y anatómicas.

Tiene características particulares como ser menor espesor de pared, lo que lleva a que se encuentre una menor densidad, fibras mas cortas, y mayor ángulo microfibrilar con lo cual la resistencia a la flexión de esta madera será menor que para una madera adulta.

La contracción transversal también es menor mientras que la longitudinal es mayor. Presenta tendencia a alabeos durante el secado, menor resistencia y rigidez, mayores tensiones de contracción y expansión que la madera adulta (Coronel, 1994).

Pérez del Castillo (2000) dice que en una madera libre de defectos las propiedades que más influyen en el comportamiento mecánico son; el ángulo micro fibrilar, la densidad, el porcentaje de leño tardío, el espesor de la pared celular, y el diámetro del lumen. La madera juvenil, tiene un alto ángulo microfibrilar, lo que puede producir una contracción longitudinal 10 veces mayor que en la madera adulta

Figura No. 4: Efecto de la madera juvenil sobre las propiedades físicas y mecánicas



## 2.6. CLASIFICACIÓN VISUAL

Las clasificaciones visuales de trozas pueden tener como cometido identificar y cuantificar los defectos de las trozas antes de ser industrializadas. La evaluación de los tipos y cantidad de defectos puede ser relevante para medir las variaciones de la calidad de la madera. Toda irregularidad puede afectar las propiedades mecánicas, físicas, o químicas.

La presencia de anomalías ligadas al crecimiento como: los nudos, la desviación de las fibras, las derivadas de los procesos de secados, las fisuras, los ataques biológicos, entre otros afectan las propiedades mecánicas en general con distintos niveles de importancia. La presencia de nudos tiene una gran influencia cuando estos se ubican en las zonas sometidas a la tracción. Glos, citado por García y Tarigo (2008).

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EXPERIMENTAL

Los árboles utilizados para el presente trabajo provienen de una plantación comercial ubicada en el departamento de Durazno, paraje Blanquillo.

Se trata de una plantación monoespecífica de *E. grandis* realizada en el año 1976 con semilla originaria de Concordia, República Argentina.

La densidad inicial de plantación fue 1111 árboles por hectárea. No se realizaron podas posteriores. Y, a la edad de 22 años, se realizó un raleo dejando una densidad remanente de 250 árboles por hectárea (4 años entre extracción y raleo).

Las muestras fueron obtenidas a los 26 años de edad. Fue realizada una selección a campo del material a ensayar por parte del equipo técnico de LATU.

Esta selección consistió en un muestreo selectivo en el año 2002. Dentro del rodal fueron seleccionados 30 árboles elegidos por baja conicidad, diámetro, mejor rectitud del fuste y hábito de ramas.

A cada árbol se le midió DAP, altura de la primera rama viva, altura total y altura comercial. Se obtuvieron tres trozas de cada árbol de 4 m cada una. Estas trozas fueron utilizadas para llevar a cabo todos los ensayos pertinentes que en el laboratorio se realizaron.

Para este trabajo los ensayos se hicieron en 18 de los 30 árboles, utilizando las trozas basales. Los datos de los árboles utilizados se presentan en el cuadro No 2.

Cuadro No. 2: Datos de interés de los 18 árboles estudiados

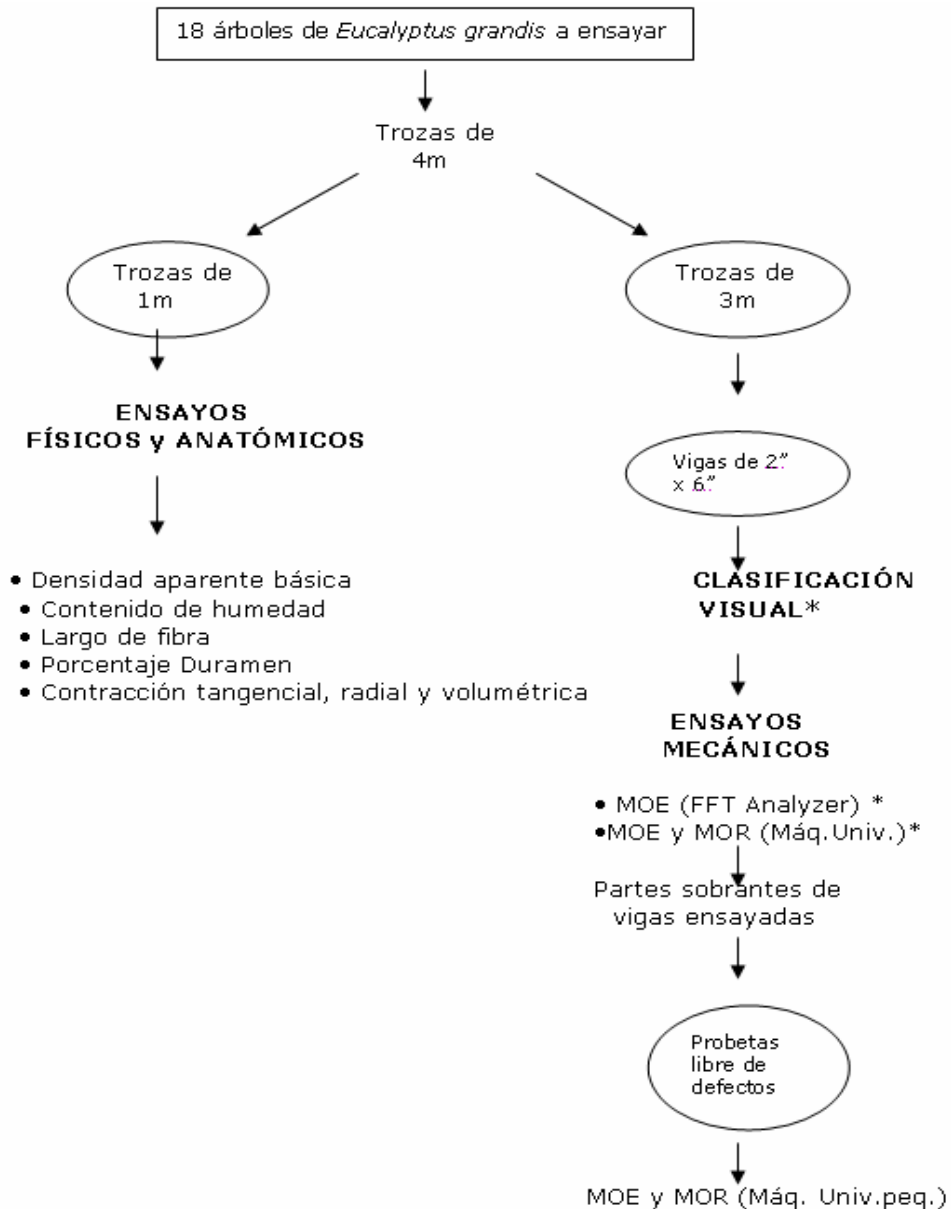
Clase diamétrica	Rango(cm)	Número de árbol	DAP(CC) medio (cm)
1	41-49	15,18,19,20,22,27	45
2	50-53	9,11,23,24,26,30	52
3	54-64	3,10,14,21,25,29	56

Referencias: DAP diámetro a 1.3 m de altura c/c con corteza.

### 3.2. METODOLOGIA DE TRABAJO

En la figura No. 5 se presenta una secuencia de los ensayos realizado

Figura No. 5: Secuencia de los ensayos realizados



\* Las tablas utilizadas se encuentran aproximadamente a 12 % de contenido de humedad.  
Todo el trabajo de laboratorio fue realizado en el LATU en la ciudad de Montevideo. Para aquellos ensayos en los cuales no se emplearon normas, la

Todo el trabajo de laboratorio fue realizado en el LATU en la ciudad de Montevideo. Para aquellos ensayos en los cuales no se emplearon normas, la metodología seguida fue según el Manual de Procedimientos Forestales (PEC. FOR.).

### 3.2.1. Obtención de probetas para características anatómicas fundamentales

Se cortó un metro de cada troza de cuatro metros de largo, en el extremo mayor (2 a 3 m). Este metro se aserró en primera instancia quitando dos costaneros y centrando la médula en un bloque de 15 cm. de espesor.

Posteriormente se eligieron las áreas libres de defectos (rajaduras, bolsas de quino, etc.) y se cortaron discos de aproximadamente 5 cm. de espesor. De dichos discos se obtuvieron las diferentes probetas para cada una de las propiedades a estudiar. Se mantuvo la humedad del disco una vez extraído.

Los datos obtenidos para largo de fibra, contracción y densidad aparente básica se analizaron según porcentaje de distancia entre médula y corteza.

#### 3.2.1.1. Largo de fibras de 18 árboles en la troza basal

En este trabajo se realizó un análisis del largo de fibra y su variación en sentido radial (desde médula a corteza). La longitud de esta se supone mayor a medida que nos acercamos a la corteza. El ángulo microfibrilar (AMF) es un muy buen indicador de juvenilidad y presenta una correlación alta con el largo de fibra. Como el AMF no se pudo medir, el largo de fibra se utilizara como indicador de juvenilidad. Analizando el largo de fibra en el radio se determinara el punto de transición de madera juvenil a adulta. La obtención de probetas para la medición de esta propiedad es de la siguiente manera:

- Obtención del listón radial de 20 cm aproximadamente. Este listón se eligió del lado que había madera normal sin defectos.
- Secado al aire.
- Elección de posición en radio. Se eligieron 6 posiciones desde médula a corteza (Figura No. 6).
- Corte de probetas en sentido longitudinal para no dañar las fibras.

Luego de obtener las probetas, se coloca en tubos de ensayo cuidadosamente identificados (posición y número de árbol) con solución Jeffrey (50 % HNO<sub>3</sub> al 10% y 50 % CrO<sub>3</sub> al 10%). Se miden 30 fibras por posición en promedio.

Figura No. 6: Ubicación de las probetas de largo de fibra

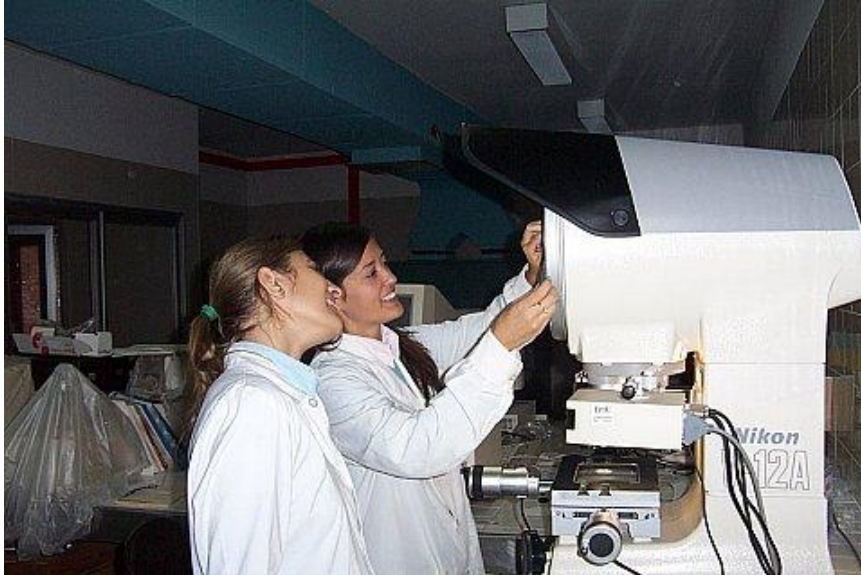


Para llevar a cabo este ensayo se utilizaron los siguientes equipos y procedimientos:

- PEC. FOR PFA 03 LATU 2003.
- Elementos para cortar madera (sierra circular).
- Tubos de ensayo.
- Proyector de perfiles Nikon V-12A (Figura No. 7).
- Regla.
- Reactivos: CrO<sub>3</sub> ppa, HNO<sub>3</sub> ppa.
- Solución de Jeffrey (50 % HNO<sub>3</sub> AL 10% y 50 % CrO<sub>3</sub> al 10%).



Figura No. 7: Proyector de perfiles



### 3.2.1.2 Porcentaje de duramen de 18 árboles en la primera troza

El porcentaje de duramen nos indica la durabilidad de la madera. Para fines como la construcción o exposición a la intemperie se desea un mayor porcentaje de duramen, no solo porque naturalmente es mejor sino porque el volumen de impregnación es menor.

De la troza basal que fue cortada para realizar la totalidad de los ensayos se sacó una fotografía en sentido transversal antes de quitarle los costaneros.

Estas fotografías fueron utilizadas para el cálculo del porcentaje de duramen. Se imprimieron las fotografías y se pesó el área del círculo ocupado por el árbol.

Método:

Se delimitó el área ocupada por el duramen y se recortó solamente el círculo que este ocupaba. Se pesó este en las mismas condiciones del disco anterior.

Con estos dos valores se calculó el porcentaje de duramen.

Para llevar a cabo este ensayo se utilizaron los siguientes equipos y procedimientos:

- PEC. FOR PFA 02 versión 01/05/2003
- Papel de densidad homogénea
- Balanza de precisión: Mettler Toledo PG 503-S
- Digitalizador de imagen: ScanJet HP4200C.

### 3.2.1.3 Contracción radial, tangencial y volumétrica

Los cambios en volumen se dan en la madera entre el PSF y el estado anhidro (peso seco constante a  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ ).

Al ser eliminadas las moléculas de agua de la pared celular por evaporación y difusión de los espacios submicroscópicos se produce un acercamiento de las micelas, lo que lleva a la contracción de la madera.

Existen diferencias entre la contracción tangencial, radial y longitudinal. En el caso de *E. grandis* no se presenta madera de tensión por lo que la contracción longitudinal es pequeña (menor a 0.1 %).

Por lo tanto solamente se estudio la contracción radial y tangencial, siendo la contracción volumétrica la suma de las mismas. La contracción total y no la normal es la utilizada a los largo del trabajo.

Para esta propiedad se tomaron listones de madera perpendiculares al eje. En estos listones se ubicaron todas las probetas que fue posible obtener de manera de abarcar la totalidad de los anillos. La cantidad de probetas fue entre 7 y 10 para cada lado de la troza. Esto significa que por cada árbol se tomaron entre 14 y 20 probetas. En total fueron 270 probetas de 30 x 30 x 5 mm.

En la figura No. 8 se muestra una fotografía para su mejor comprensión.

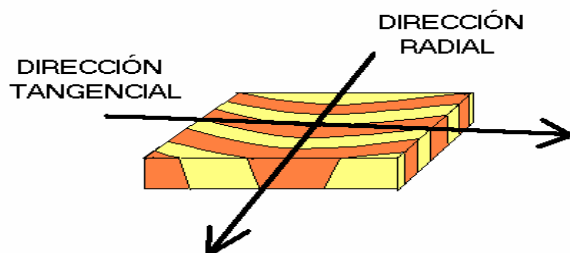
Figura No. 8: Ubicación de probetas de contracción



La metodología de medición de la contracción es medir el volumen de las probetas en estado verde con el micrómetro digital en el centro de cada posición (radial, tangencial) luego a 18 % de contenido de humedad y, finalmente, hasta llegar al estado anhidro (este estado se identifica cuando por medio de pesada sucesiva no varía el peso).

Se presenta el valor de la contracción al 15 % de contenido de humedad el cual no fue medido sino estimado tomando en cuenta la contracción al variar el contenido de humedad.

Figura No. 9: Probeta para ensayos de contracción y densidad aparente básica



La contracción se calcula;

$$\beta_i = (D_i - d_i) / D_i * 100$$

Donde;  **$\beta_i$** : contracción tangencial ( $\beta_t$ ) o radial ( $\beta_r$ )(%) (%)  
 **$D_i$** : dimensión de probeta a CH inicial (dirección tangencial o radial) (mm)  
 **$d_i$** : dimensión de probeta a CH final (dirección tangencial o radial) (mm)

La contracción volumétrica se obtiene sumando la contracción en los tres sentidos pero en este caso, al considerar despreciable la contracción longitudinal, se obtiene sumando la contracción tangencial y radial.

$$\beta_v = \beta_t + \beta_r$$

Para llevar a cabo los siguientes ensayos se utilizaron los siguientes equipos y normas:

- Elementos para cortar madera.
- Probetas de 30 x 30 x 5 mm.
- Norma JIS (JIS Z 2101 – 1994).
- Cámara climatizada (Nihon Freezer) para estados intermedios de humedad.
- Estufa de circulación forzada (Yamato DK 600) para llevar probetas a estado anhidro
- Micrómetro digital SONY apreciación 0.001 mm (Ver figura No. 10)

- a) Comparador Digital: DG-110B
- b) Base y soporte de Comparador: DZ-532
- c) Soporte de medición

Figura No. 10: Micrómetro digital



#### 3.2.1.4. Contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó mediante el método de pesadas, basado en la diferencia de peso de cada probeta antes y después de secado a estufa a  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ . Este valor está determinado en base seca.

$$\text{CH} = (\text{Ph} - \text{Pa}) / \text{Pa} * 100$$

Donde:

CH: contenido de humedad, en porcentaje  
Ph: Peso inicial de la muestra, antes de secar.  
Pa: Peso final, peso de la madera anhidra.

Para llevar a cabo el ensayo se utilizaron los siguientes equipos y normas:

- ASTM D 4442-92 (reaprobada en 1997)
- Balanza Mettler Toledo PG503-S con una precisión de 0.001 gramos.
- Estufa de circulación forzada (Yamato DK 600) para llevar probetas a estado anhidro.
- Elementos para cortar madera.

### 3.2.1.5. Densidad aparente básica

Fueron utilizadas las mismas probetas que para contracción. Por lo tanto cabe recordar que la cantidad de probetas fue entre 7 y 10 para cada lado de la troza. Esto significa que por cada árbol se tomaron entre 14 y 20 probetas. En total fueron 294 probetas de 30 x 30 x 5 mm.

$$Dab = Pa/Vv$$

La densidad aparente básica es la relación entre el peso en gramos de madera anhidra (Pa) y el volumen de madera verde (Vv) en centímetros cúbicos.

El método utilizado para este ensayo fue el de inmersión en agua. Este se basa en el principio de Arquímedes que consiste en tres pesadas. La primera se trata del peso húmedo de la madera (Pv), la segunda del peso sumergido en agua (Ps) y por último el peso anhidro (Pa). La ecuación de obtención de densidad aparente básica es la siguiente:

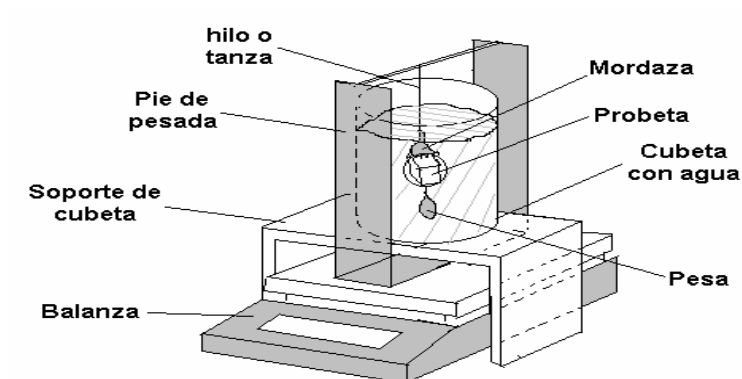
$$Dab = Pa / (Pv - Ps)$$

Para llevar a cabo los distintos ensayos se utilizaron los siguientes equipos:

- Balanza Mettler Toledo PG503-S con una precisión de 0.001 gramos.
- ASTM D 2395-93.
- Estufa de circulación forzada (Yamato DK 600) para llevar probetas a estado anhidro.
- Elementos para cortar madera.
- Aparato para peso sumergido: balanza con pesada inferior, estanque con agua, mordaza para sujetar discos.

En la figura No. 11 se muestra un esquema para su mejor comprensión.

Figura No. 11: Inmersión de las probetas



#### 3.2.1.6. Densidad corriente para tablas de tamaño real

Se calculó la densidad corriente de las tablas de tamaño real. Para esto se tomó el peso seco al 12 % (humedad estimada) y se tomaron las medidas de: largo, ancho y espesor para la obtención del volumen.

Se realizó el cálculo de densidad el cual es utilizado para todo el análisis de las propiedades mecánicas de tablas de tamaño real.

Para llevar a cabo los distintos ensayos se utilizaron los siguientes equipos:

- Balanza (300 kg).
- Calibre digital.
- Cinta métrica.

#### 3.2.2. Obtención de vigas de 2" x 6"

Las tablas fueron secadas en horno de secado convencional hasta un contenido de humedad promedio de 12 %. Luego estuvieron a la intemperie por unos días por lo que el contenido de humedad no es exactamente 12

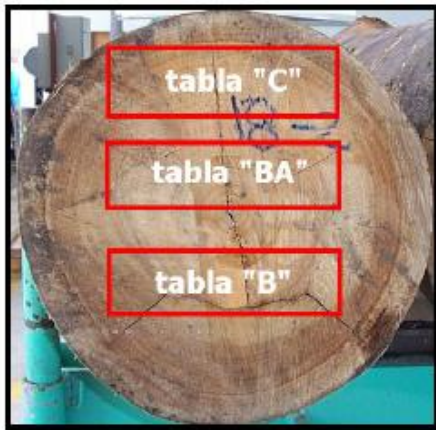


%.Luego se cepillaron llevándolas a dimensiones finales de 50 mm x 150mm x 2800mm.

Estas fueron las vigas utilizadas para los ensayos de MOE por el método no destructivo (FFT Analyzer), MOE y MOR por método destructivo, para la clasificación visual y también para la obtención de probetas libres de defectos.

Las vigas o tablas se clasifican según la ubicación radial como se muestra en la figura No. 12.

Figura No. 12: Clasificación de tablas según ubicación con respecto a la médula



Las tablas "BA" (incluyen médula), presentan gran proporción de madera juvenil; tablas "B" (zona intermedia) presentan proporciones variadas de madera juvenil y madera adulta y tablas "C" (próximas a corteza) presentan, en su mayoría, madera adulta.

En el presente trabajo se hizo un tipo de clasificación visual tomando solamente las tablas B y C con una cantidad de tablas de 66 y 59 respectivamente.

#### 3.2.2.1. Clasificación visual

El objetivo de la clasificación visual es encontrar una manera práctica, en los aserraderos, de categorizar el producto de manera de darles distintos destinos a la madera aserrada.



La clasificación se realizó en la cara más afectada por defectos como: nudos, rajaduras, arista faltante, ataque por insectos, pudriciones, etc. Se clasificaron un total de 125 tablas resultadas del aserrado de los 18 trozas basales.

Las tablas fueron identificadas según ubicación en el radio como se muestra en la Figura No.12. Y los resultados de clasificación visual fueron discriminados según la posición B o C

En esta clasificación las tablas fueron agrupadas en cuatro categorías: especial, primera, segunda y tercera. Según la norma JAS existen solamente tres categorías pero debido a los resultados obtenidos se decidió agregar una cuarta categoría ("tercera") ya que se trata de una plantación sin podas. Para *E. grandis* es posible un aprovechamiento de la madera en menores dimensiones que la categoría segunda.

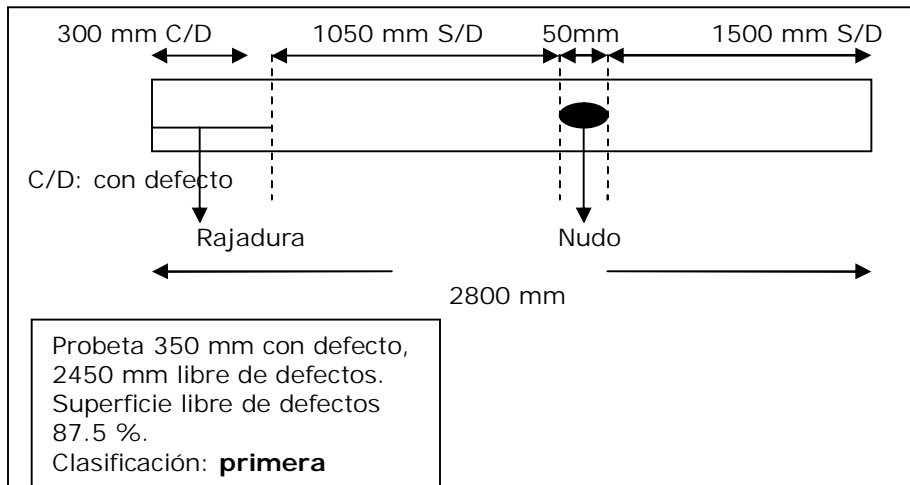
La división de categorías se realizó según el porcentaje de superficie libre de defectos.

Las categorías son numeradas del 1 al 4:

- **1 Especial**, con una superficie libre de defectos del 90 % en una sola pieza.
- **2 Primera**, con una superficie libre de defectos entre 66 y 89 % en no más de dos tablas (Figura No 13).
- **3 Segunda**, con una superficie libre de defectos entre 50 y 65 %.
- **4 Tercera**, menos de 50 % de superficie libre de defectos. (No tiene según Norma JAS, por ejemplo)

En la figura No. 13 se puede ver un ejemplo de clasificación visual para una tabla de primera

Figura No. 13: Ejemplo de clasificación visual para una tabla de primera.



### 3.2.2.2. MOE en tablas de tamaño real (ensayo no destructivo)

Se determinó del módulo de elasticidad (MOE) por el método no destructivo.

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

Donde,

- E<sub>ft</sub>**: MOE por vibración longitudinal
- L**: Largo de tabla
- f<sub>l</sub>**: Frecuencia de vibración longitudinal (proporcionada por FFT Analyzer)
- g**: Constante de aceleración gravitacional
- p**: Densidad corriente de la madera (peso corriente/volumen corriente).

Por medio del FFT Analyzer se determinó el MOE y luego se pesaron las tablas y tomaron las medidas para realizar el cálculo de densidad corriente al 12 % de contenido de humedad.

Figura No. 14: Equipo FFT Analyzer . Donde: Aa **FFT Analyzer**;  
Ba Micrófono; Ca Martillo, Da Poliuretano



Se utilizó el equipo FFT (Figura No. 14) que es un analizador de sonido conectado a un micrófono, donde se mide la frecuencia de vibración longitudinal principal.

Para poder realizar el ensayo correctamente se colocan las tablas en caballetes forrados con poliuretano (para impedir vibraciones), luego se golpea la cara de un extremo de la tabla y se coloca el micrófono en el otro extremo lo mas cercano posible leyéndose la captura de frecuencia longitudinal principal que da el aparato.

Para llevar a cabo los distintos ensayos se utilizaron los siguientes equipos.

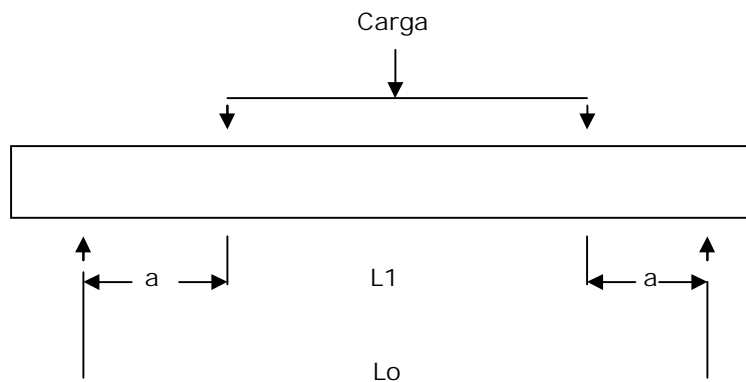
- FFT Analyzer.
- Calibre digital.
- Cinta diamétrica.
- Balanza AND fw 300 con apreciación a un gramo.

### 3.2.2.3. MOE y MOR por método destructivo

Luego de llevar a cabo el ensayo anterior en todas las tablas se realizaron los ensayos por métodos destructivos. Estos fueron hechos en la Máquina Universal.

Las vigas se sometieron a un esfuerzo de flexión estática de cuatro puntos con una separación entre apoyos inferiores (span) de 2520 mm (calculado como  $16.8 \times h$ ) y recibieron un esfuerzo en dos puntos separados 840 mm ( $1/3$  de la luz =  $2520/3$ ) entre si.

Figura No. 15: Esquema de aplicación de cargas



Los valores de MOE y MOR fueron calculados mediante el mismo ensayo de flexión estática de forma automática por la Máquina Universal una vez finalizado el ensayo utilizando las siguientes formulas:

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

Donde,

**MOE:** Módulo elástico.

**ΔP:** diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional.

**Lo:** distancia entre los apoyos inferiores.

**L1:** distancia entre los apoyos de carga.

**I:** momento de inercia.

**Δy:** diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de la zona proporcional.

El momento de inercia se calcula como:

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

Donde,

**I:** momento de inercia

**b:** espesor de tabla

**h:** altura de tabla

El MOR se calcula como:

$$\text{MOR} = \frac{3 \cdot P \cdot (l-a)}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Donde,

**P:** carga máxima

**I:** distancia entre apoyos inferiores

**a:** distancia desde el apoyo inferior al punto de carga superior mas próximo

**b:** espesor de la tabla

**h:** altura de la tabla

Para llevar a cabo los distintos ensayos se utilizaron los siguientes equipos y normas:

- Máquina Universal Minebea, modelo AL, 250 kN
- Norma ASTM D 198-98

Figura No. 16: Máquina Universal



### 3.2.3. Obtención de pequeñas probetas (pp) libres de defectos

Las probetas libres de defectos se confeccionaron a partir de las vigas de 2" x 6" ensayadas anteriormente.

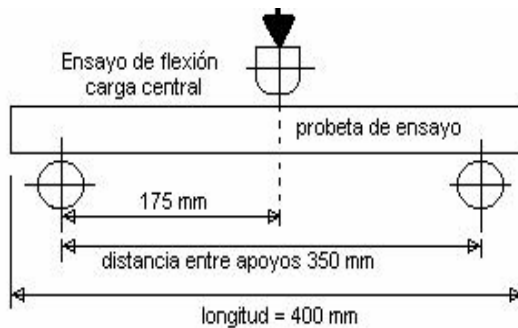
Las probetas se hicieron con una orientación perpendicular a los anillos y unas dimensiones de 25 mm x 25 mm x 400 mm.

#### 3.2.3.1. Ensayo de flexión estática en pequeñas probetas en tres puntos

Las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

- Un punto central de aplicación de carga
- Aplicación de carga en dirección tangencial a los anillos de crecimiento (cara radial)
- Velocidad de ensayo constante de 2.5 mm/min.
- Celda de carga de 50 kN.
- Distancia entre apoyos de 350 mm (span).
- JIS Z 2113 – 1994

Figura No. 17: MOR y MOE en pequeñas probetas libre de defectos.



Las fórmulas utilizadas para efectuar los cálculos de MOE y MOR en pequeñas probetas fueron los siguientes.

$$MOE_{3p} = \frac{\Delta P \cdot I^3}{4 \Delta y \cdot B \cdot h^3}$$

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

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

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

Para llevar a cabo los distintos ensayos se utilizaron los siguientes equipos:

- Probetas *libre de defectos* de 25x25x400 mm.
- Máquina Universal de ensayos Minebea
- Extensómetro utilizado en la línea neutra (para medir MOE).

### 3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS VARIABLES

Para el total de los datos registrados se calculó:

- media o promedio
- desvío estándar
- coeficiente de variación (CV)
- intervalo de confianza (IC)
- coeficiente de correlación entre algunas de las variables.

Para las variables largo de fibra, densidad aparente básica y contracción se analizó su variación de médula a corteza para los 18 árboles de la población.

En una primera instancia la variable largo de fibra fue la utilizada para definir el rango de transición de madera juvenil a adulta. Esta transición se estimó visualmente. Este criterio sirvió para poder estudiar la densidad de la madera adulta y juvenil así como la contracción de la madera adulta y juvenil.

Posteriormente se realizó un análisis estadístico para determinar el rango, dentro del radio, en el cual se da la transición de madera adulta a madera juvenil. Para realizar este análisis se ajustaron los modelos más adecuados por el método de mínimos cuadrados.

El porcentaje de duramen se analizó de acuerdo a su relación con la velocidad de crecimiento para cada uno de los 18 árboles.

Para las propiedades MOE y MOR además de indicadores generales se analizaron los resultados según ubicación de las tablas ensayadas en el radio. Y los resultados se relacionaron con la clasificación visual hecha anteriormente en estas mismas tablas.



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de las variables estudiadas. Se utiliza el supuesto de que todas las variables presentan distribución normal.

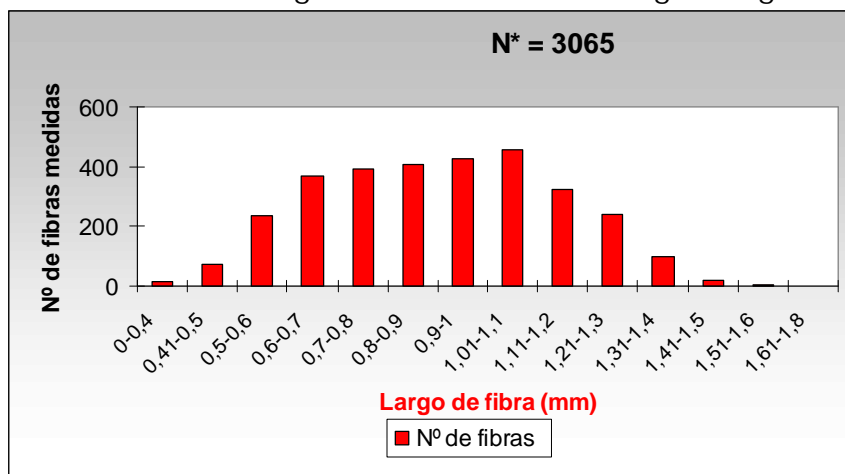
##### 4.1. LARGO DE FIBRA

En el gráfico No. 1 se puede ver el histograma de frecuencia para largo de fibra. Se midieron un total de 3065 fibras. El largo más frecuente fue de 1.1 mm. Además, se observa que el rango de frecuencias va desde 0.20 hasta 1.8 mm.

La media de la población estudiada fue de 0.92 mm con un máximo de 1.8 mm y un mínimo de 0.13 mm. El CV hallado fue de 25 %. Los valores hallados se acercan a los encontrados en bibliografía disponible. La mediana de esta población es 0.92 al igual que la media, por lo tanto el 50 % de los valores de largo de fibra están por debajo de este valor y el otro 50 % por encima.

Olaso (2002) encontró una media de 0.88 mm (máximo 1.15 mm y mínimo 0.58 mm) para 12 años de edad. En una población de 10 años halló una media de 0.83 (máximo 1.15 mm y mínimo 0.45 mm). Doldán (2003) en una población de *E. grandis* de 18 años de edad encontró una media de 1 mm.

Gráfico No. 1: Histograma de frecuencias según largo de fibras



N\*: número de fibras medidas

Cuadro No. 3: Largo de fibra según posición en el radio

	Porcentaje promedio de distancia entre medula y corteza					
	2	17	33	49	65	82
Promedio (mm)	0,64	0,75	0,87	1,01	1,11	1,16
Máximo (mm)	0,94	1,19	1,25	1,51	1,6	1,8
Mínimo (mm)	0,34	0,45	0,52	0,65	0,13	0,78
Desvest	0,112	0,139	0,151	0,151	0,155	0,152
IC(con95% de confianza)	0,009	0,012	0,013	0,013	0,014	0,013
CV (%)	18	19	17	15	14	13

En el cuadro No. 3 se puede ver los resultados promedio encontrados para largo de fibra para cada una de las posiciones estudiadas. Se ve que el largo de fibra aumenta de médula a corteza, esto coincide con los estudios realizados por Olaso (2002), Doldán (2003).

#### 4.1.1. Largo de fibra para madera juvenil y madera adulta

Para determinar una zona de transición se tomo en cuenta el momento en que los crecimientos en los largos de fibras comenzaron a ser decrecientes.

Al determinar esta zona de madera de transición se pueden obtener los promedios de longitud de fibra para las zonas de madera juvenil y adulta. En el cuadro No. 4 se observan esos promedios, la desviación estándar y CV de la totalidad de la muestra. En este cuadro se ve que la madera juvenil presenta un valor promedio de 0.70 mm, la madera de transición 0.94 y la madera adulta 1.13 mm.

Es notable la diferencia entre el coeficiente de variación de la madera adulta y la madera juvenil. El valor bajo en el coeficiente de variación de madera adulta nos indica una mayor homogeneidad, lo que podrá verse reflejado en mejores propiedades físico-mecánicas.

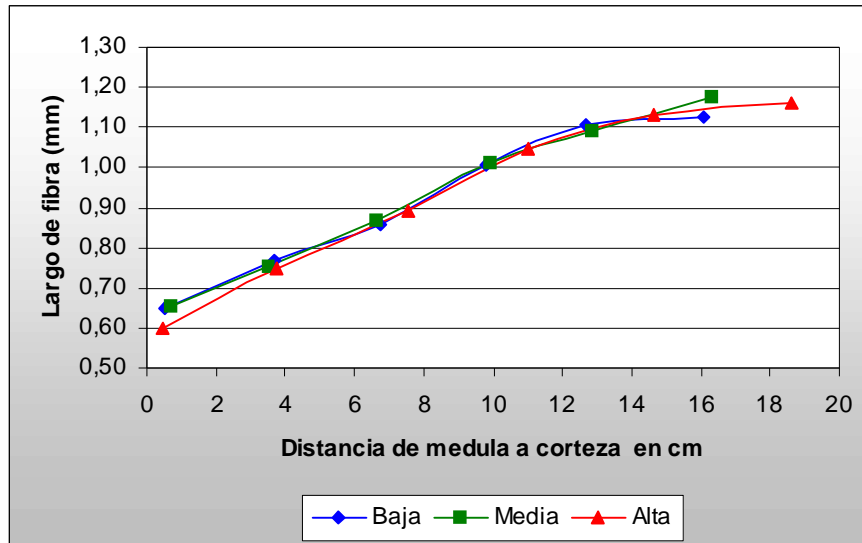
Cuadro No. 4: Largo de fibra para madera juvenil y madera adulta

	Madera Juvenil	Madera Transición	Madera Adulta
media (mm)	0,70	0,94	1,13
max (mm)	1,19	1,51	1,55
min (mm)	0,34	0,45	0,13
Desvest	0,14	0,16	0,15
c.v. (%)	20	14	13
N	1043	1012	1010

Doldán (2003) halló, para una población de 18 años, un promedio de 0.78 mm para madera juvenil con una CV de 18 %. Y un promedio de 1.05 mm y un CV de 9 % para madera adulta.

La relación de la media del largo de fibra entre madera adulta y juvenil es de 1.6.

Gráfico No. 2: Largo de fibra promedio de médula a corteza en cm según velocidad de crecimiento alta media y baja



En el gráfico No. 2 se puede ver a que entre los 8 y 12 cm de radio en promedio se da la transición de madera juvenil a adulta. En promedio hay, aproximadamente, 6 cm de madera adulta en el radio

#### 4.1.2. Largo de fibra según clase diamétrica baja media y alta

Se dividió la población de árboles estudiados según dap, esto se ve en los gráficos No. 2, 3 y 4. Es decir, según velocidad de crecimiento para poder visualizar los resultados individuales de cada árbol y su variación de médula a corteza.

Gráfico No. 3: Distribución de largos de fibra en la clase diamétrica más baja (42-48cm)

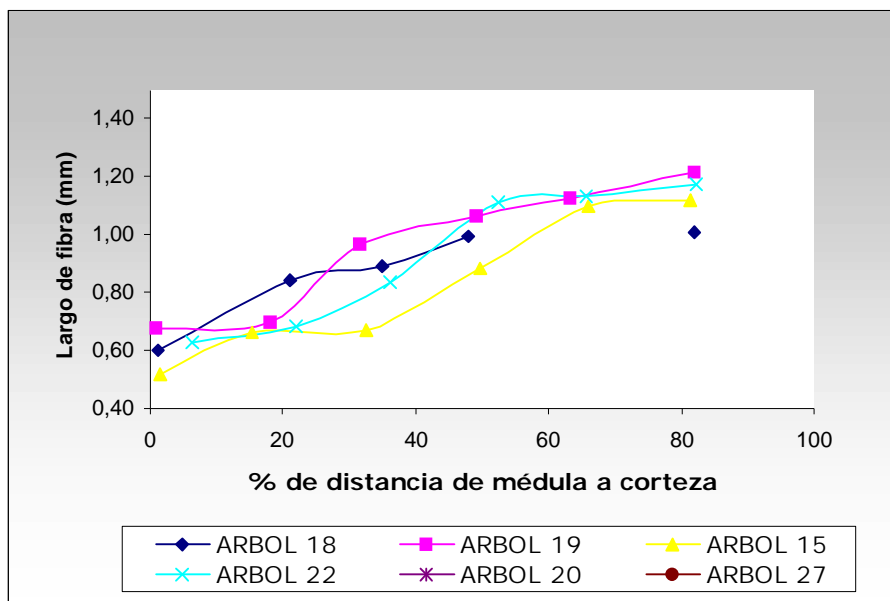


Gráfico No. 4: Distribución de largos de fibra en la clase diamétrica media (49-53 cm)

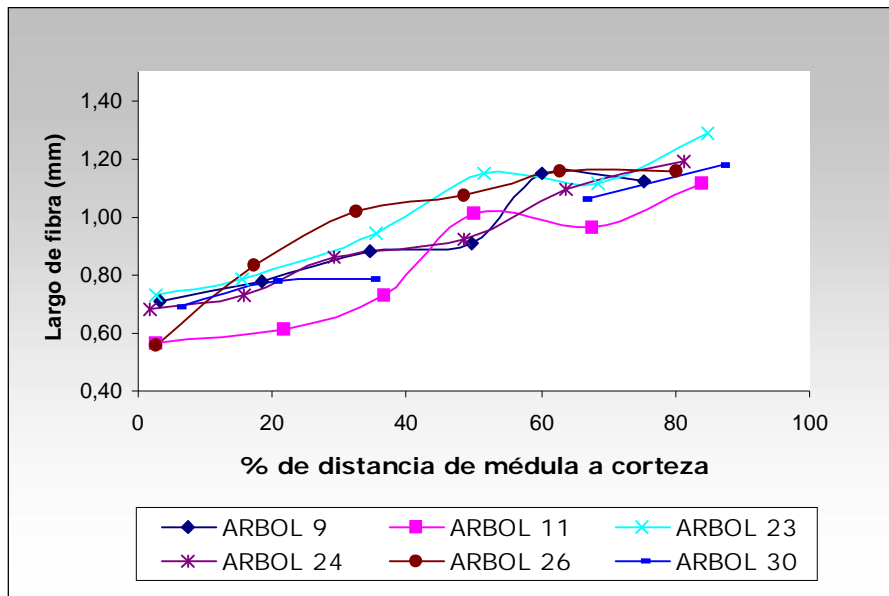
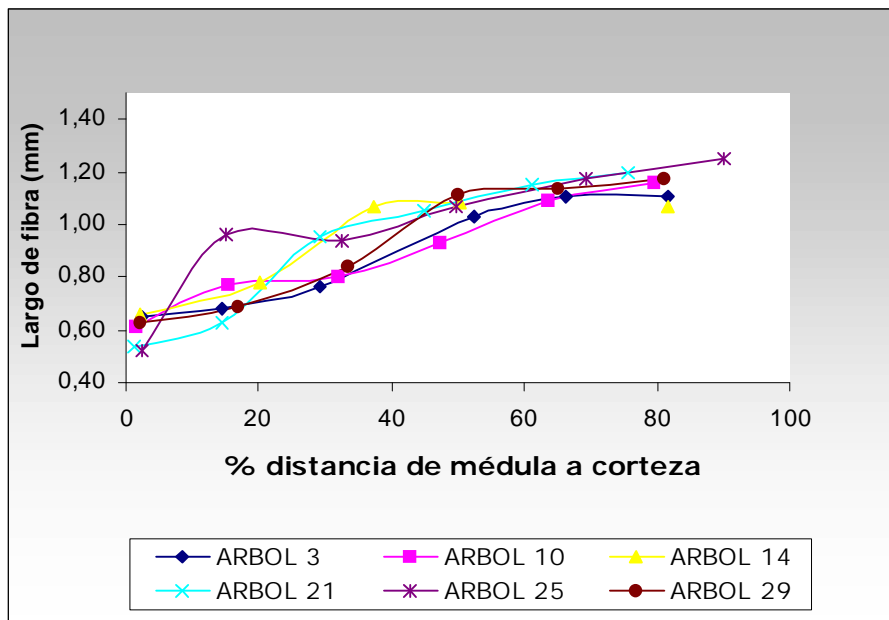


Gráfico No. 5: Distribución de largo de fibra en la clase diamétrica mas alta (53-64 cm)

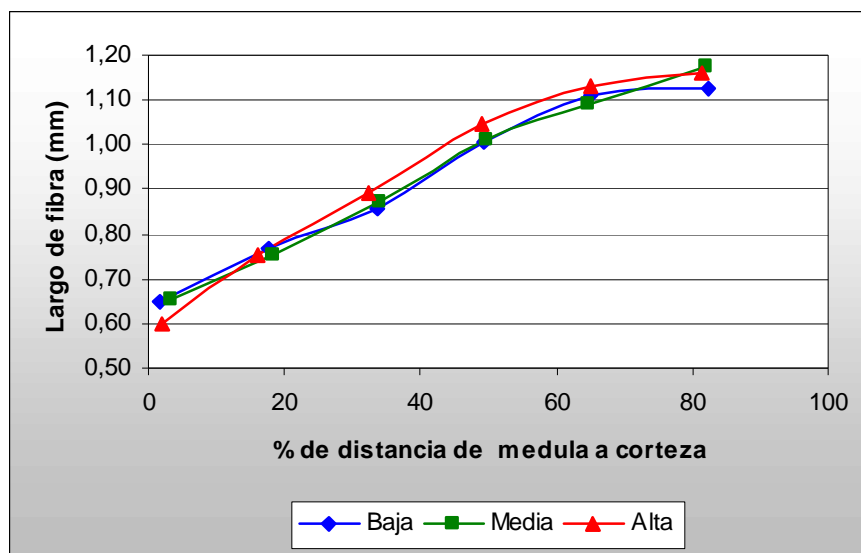


En los gráficos No. 3, 4 y 5 se ve el resultado obtenido del análisis de la distribución de médula a corteza de cada uno de los árboles agrupados en las clases diamétricas baja, media y alta. Se puede ver que en la población estudiada la transición entre madera juvenil y adulta se da en un rango del 40 al 60 % del radio. Dicha transición presenta una longitud de fibra entre 0.9 y 1mm.

En el gráfico No. 6 se presentan los valores de longitud de fibra promedio por clase diamétrica de médula a corteza.

Se puede que el largo de fibra no varía con la velocidad de crecimiento.

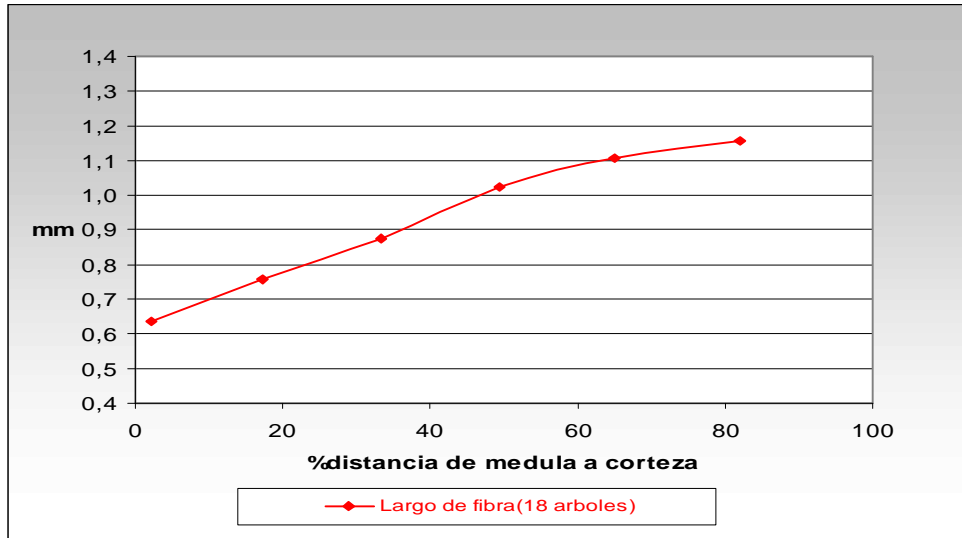
Gráfico No. 6: Largo de fibra promedio de médula a corteza en porcentaje de distancia según velocidad de crecimiento alta media y baja



#### 4.1.3. Largo de fibra promedio de la población y su variación en el radio

A modo de resumen en el gráfico No. 7 se pueden ver los resultados obtenidos para los 18 árboles, y su variación de médula a corteza para largo de fibra promedio.

Gráfico No. 7: Largo de fibra según variación en el radio



#### 4.2. PORCENTAJE DE DURAMEN

En el cuadro No. 5 se observa que los valores de porcentaje de duramen se encuentran entre 58 y 70 %. Estos datos concuerdan con los presentados por Olaso (2002), para la especie *E. grandis*

Cuadro No. 5: Porcentaje de duramen y correlación con velocidad de crecimiento.

Árbol	Dap	(%)Duramen
3	60	67,73
9	52	67,64
10	54	58,87
11	51	61,22
14	57	63,81
15	48	61,66
18	42	61,65
19	48	59,45
20	49	58,22
21	64	69,06
22	42	69,48
23	50	59,32
24	51	61,83
25	57	63,69
26	51	64,14
27	49	62,64
29	54	68,67
30	52	70,45
<b>Promedio</b>	<b>51,72</b>	<b>63,86</b>
<b>Máximo</b>	<b>64,00</b>	<b>70,45</b>
<b>Mínimo</b>	<b>42,00</b>	<b>58,22</b>
<b>Desvest</b>		<b>4,013</b>
<b>CV (%)</b>		<b>6</b>
<b>ic</b>		<b>0,0290</b>
<b>R</b>		<b>0,313</b>

Se determinó un porcentaje de duramen de 64 % promedio en las trozas basales, con coeficiente variación de 6 % este valor también coincide con el hallado por Olaso (2002) que encontró valores de porcentaje de duramen que van desde 60 hasta 70 %.

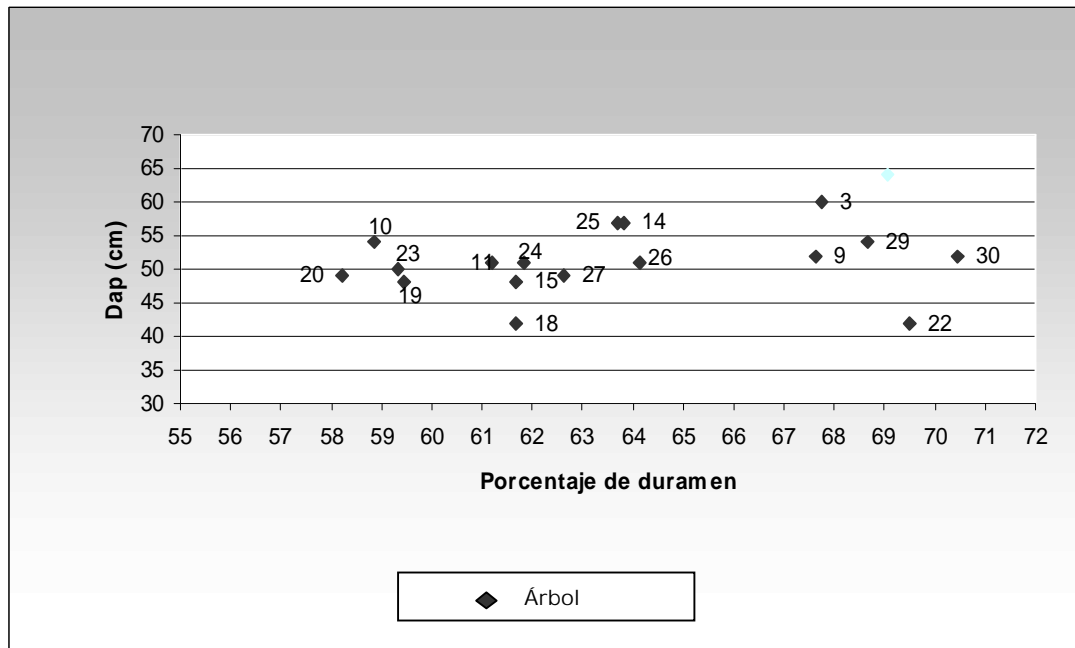


#### 4.2.1. Relación entre porcentaje de duramen y velocidad de crecimiento

En el gráfico No. 8 se ven todos los árboles estudiados y sus valores correspondientes de dap (cm) y porcentaje de duramen.

La correlación encontrada entre velocidad de crecimiento y porcentaje de duramen es 0.313, considerándose este valor muy bajo. Como ejemplo podría nombrarse a los árboles 10 y 29, los cuales a igual velocidad de crecimiento presentan una diferencia de porcentaje de duramen de 10 %.

Gráfico No. 8: Relación entre porcentaje de duramen y velocidad de crecimiento por árbol



#### 4.3. CONTRACCIÓN TANGENCIAL RADIAL Y VOLUMÉTRICA

La contracción de la madera se produce cuando el contenido de humedad comienza a ser menor al PSF. Teóricamente, debajo de este valor, la contracción aumenta linealmente. En este estudio se realizaron medidas de dimensiones en estado verde o probeta saturada en agua, 18 % de contenido de humedad y anhidro.

Como se puede apreciar en el cuadro No. 6 se presentan los valores promedios de contracción obtenidos en tres rangos de humedad, verde, 18 y 15 %.

El valor de contracción tangencial promedio de verde a anhidro es de 9.4 % similar al valor que encontró Mantero (1999) para árboles de dap mayor a 25 cm cuyo promedio de contracción tangencial fue 9,49 %. Respecto a la contracción radial de verde a anhidro el valor encontrado fue 5% mientras que el valor encontrado por Mantero (1999) fue 5.1%.

Con 95 % de confianza se puede decir que el valor promedio de la contracción volumétrica fue de 6.5 % en el rango de verde a 18 % de contenido de humedad. Este valor es mayor al encontrado por Doldán (2003) el cual fue 5.02%. La contracción volumétrica en el rango verde-anhidro fue 14.4 % con igual porcentaje de confianza mientras que Doldán (2003) halló un valor de 12.72%.

Cuadro No. 6: Promedios de contracción radial, tangencial y volumétrica en dos rangos de contenido de humedad

Contenido de Humedad	Contracción (%)		
	tangencial	radial	volumétrica
Verde a 15 %	5.4	2.3	7.7
Verde a 18 %	4,7	1,8	6,5
verde a anhidro	9,4	5	14,4

#### 4.3.1. Contracción desde médula a corteza

Como se describió en Materiales y Métodos, las probetas utilizadas para medir esta propiedad fueron tomadas de manera de abarcar todo el radio.

Hubieron hasta 10 posiciones desde médula a corteza (la cantidad dependió del diámetro de la troza). Estas fueron divididas en tres siendo:

- **1** la posición más cercana a la médula, es la madera juvenil (posiciones 1, 2 y 3).
- **2** la intermedia o madera de transición (posiciones 4, 5 y 6).
- **3** la más cercana a la corteza o madera adulta (posiciones 7, 8, 9 y 10).

Cuadro No. 7: Valores promedio de contracción según ubicación en el radio

ubicación	Contracción de verde a anhidro			CV (%) $\beta$ volumétrica
	Tangencial	Radial	Volumétrica	
M. Juvenil	9 ( $\pm 0.23$ )	4 ( $\pm 0.12$ )	14 ( $\pm 0.29$ )	11
M. Transición	9 ( $\pm 0.25$ )	5 ( $\pm 0.24$ )	14 ( $\pm 0.43$ )	16
M. Adulta	10 ( $\pm 0.29$ )	6 ( $\pm 0.25$ )	16 ( $\pm 0.46$ )	17
CV (%)	16	21	17	

La diferencia en el porcentaje de contracción según ubicación en el radio puede apreciarse en los resultados presentados en el cuadro No. 7. La contracción aumenta a medida que nos alejamos de la médula. Doldán (2003) encontró la misma tendencia.

La relación entre la contracción volumétrica de madera adulta y madera juvenil fue de 1.17.

En los gráficos No. 9, 10 y 11 se ve que la contracción tangencial, radial y volumétrica no presenta grandes diferencias en los valores de contracción según posición en radio para el rango de contenido de humedad verde a 18 %. Mientras que en el rango verde-anhidro se ven mayores diferencias.

Gráfico No. 9: Contracción tangencial promedio desde médula

a corteza

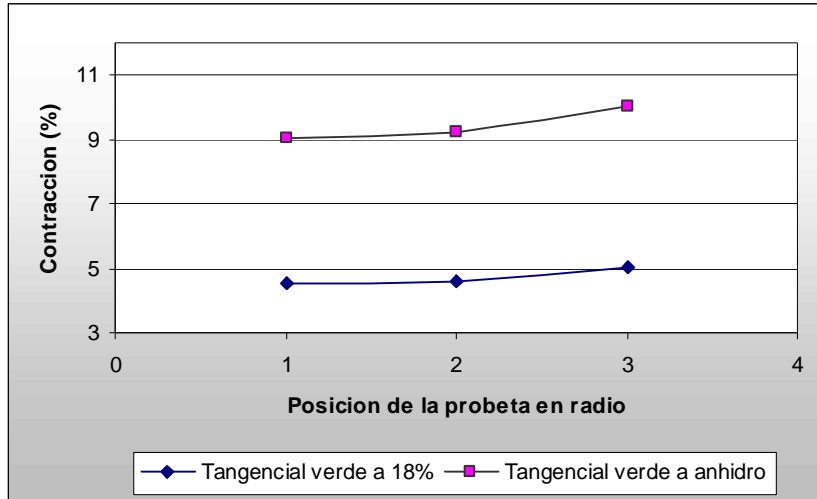


Gráfico No. 10: Contracción radial promedio desde médula a corteza

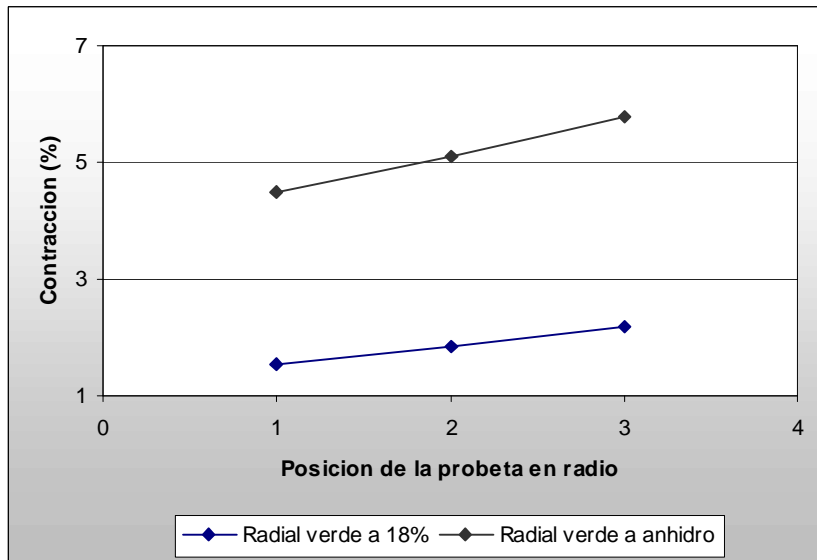
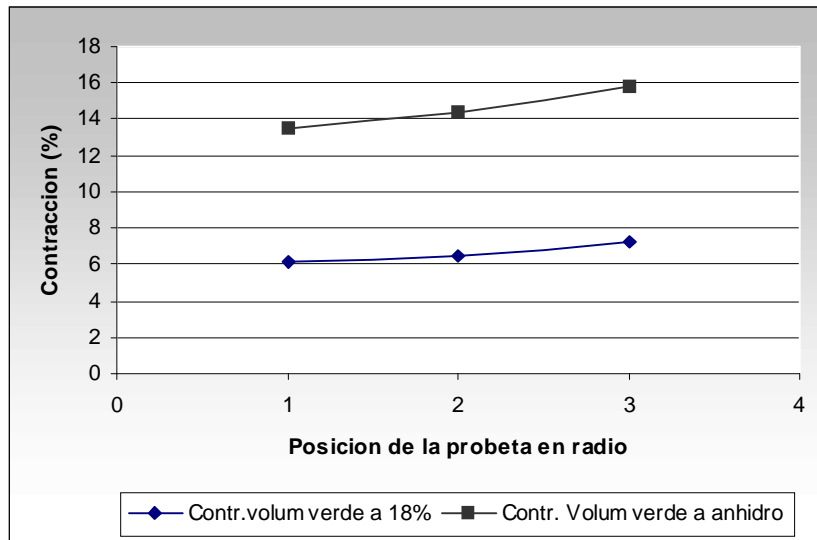


Gráfico No. 11: Contracción volumétrica promedio desde médula a corteza



#### 4.3.2. Anisotropía o relación entre contracción tangencial y radial (Bt/Br)

La anisotropía es la relación entre la contracción tangencial y la radial. Este valor es muy importante debido a que antes del secado debemos conocer las posibles deformaciones que puede sufrir la madera posteriormente. Una relación igual a 1 correspondería a una contracción de manera homogénea en las dos direcciones. Pero no es habitual que esto ocurra. Cuanto mayor es el coeficiente, mayor será la deformación posterior al secado.

Según Coronel (1994) existe una clasificación de calidad de maderas por su comportamiento anisotrópico.

- $1,2 < Bt/Br < 1,5$  maderas consideradas excelentes.
- $1,6 < Bt/Br < 1,9$  maderas consideradas normales.
- $Bt/Br > 2,0$  madera con menor posibilidad de utilización.

En el cuadro No. 8 se presentan los valores promedios del material ensayado. La relación Bt/Br o anisotropía es 1.9. Esto indica que el material ensayado se deformó luego del secado y está en el límite de la categoría considerada como normal según Coronel (1994).

Cuadro No. 8: Contracción radial, tangencial y relación Bt/Br

	<b>Total</b>	<b>M. juvenil</b>	<b>M. transición</b>	<b>M. adulta</b>
Bt (%)	9.4	9	9,2	10,0
Br (%)	5	4,5	5,1	5,7
Bt / βr	1.9	2	1,8	1,7

En el cuadro No. 9 y gráfico No. 12 se ven los valores calculados de PSF.

Se interpreta que una vez alcanzado el 34 % de contenido de humedad, comienza la contracción volumétrica.

Cuadro No. 9: Punto de saturación de las fibras

<b>Contracción</b>	<b><math>y = a x + b</math></b>	<b>PSF</b>	<b>coef. de contracción</b>
volumétrica	$y = - 0,421 x + 14,5$	34	0,421
tangencial	$y = - 0,249 x + 9,36$	38	0,249
radial	$y = - 0,172 x + 5,13$	29	0,172

Donde,

y: contracción en porcentaje

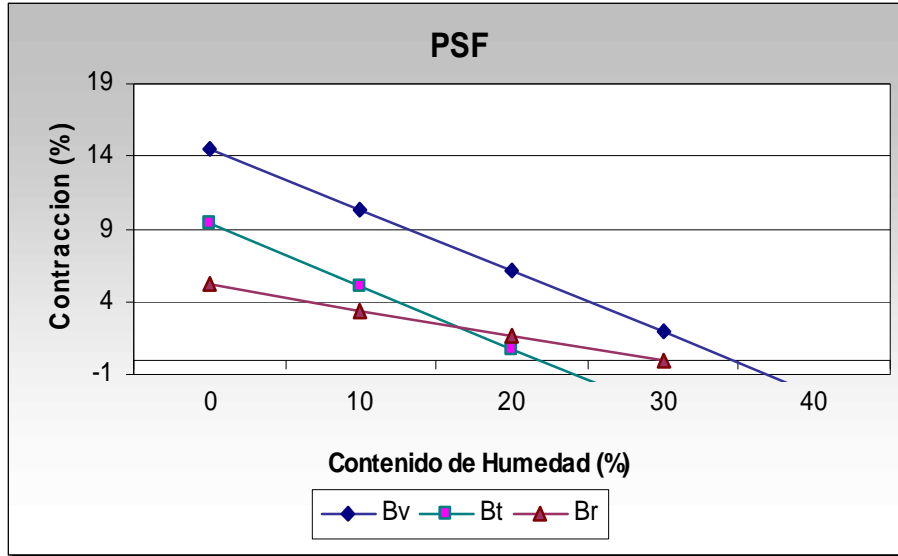
a: coeficiente de la recta (coeficiente de contracción).

b: intersección con el eje x.

Estos puntos de saturación hallados son similares a los encontrados por Doldán (2003) para una población de 18 años. Encontró que el PSF volumétrico es de 30 %, el tangencial 32 % y el radial 26 %. Posiblemente las diferencias entre los puntos de saturación se deban a las distintas edades.

Gráfico No. 12: Punto de saturación de las fibras volumétrica

tangencial y radial

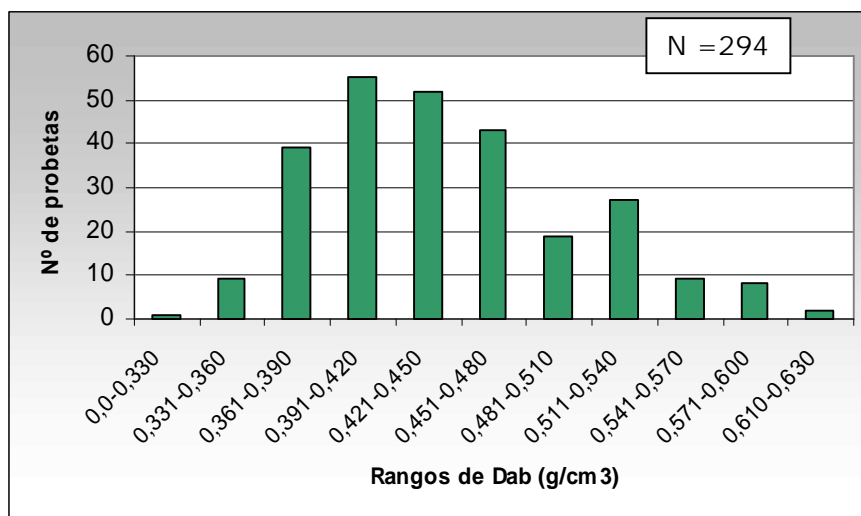


#### 4.4. DENSIDAD APARENTE BÁSICA

Con el mismo criterio que se utilizó para el cálculo de contracción, se dividieron las 10 posiciones de las probetas en tres categorías.

Se puede ver en el gráfico No. 13 que el rango de densidad aparente básica varía desde  $0.323 \text{ g/cm}^3$  hasta  $0.625 \text{ g/cm}^3$ , con un promedio de  $0.446 \text{ g/cm}^3$  y un CV de 7%.

Gráfico No. 13: Histograma de la totalidad de probetas



Al comparar estos resultados con la bibliografía consultada se encontró que los datos son similares. Doldán (2003) encuentra que el rango de los valores con mayor frecuencia está entre 0.425 y 0.447 g/cm<sup>3</sup> y en el material ensayado en este trabajo los valores más frecuentes están entre 0.391 y 0.420 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.4.1. Densidad aparente básica según ubicación en el radio

En el cuadro No. 10 se puede apreciar los valores promedio obtenidos para densidad aparente básica. La variable largo de fibra fue utilizada para definir el momento de transición de madera juvenil a adulta ya que estas células (fibras) son un buen indicador de madera adulta.

Cuadro No. 10: Valores promedio de densidad aparente básica para madera juvenil, de transición y adulta.

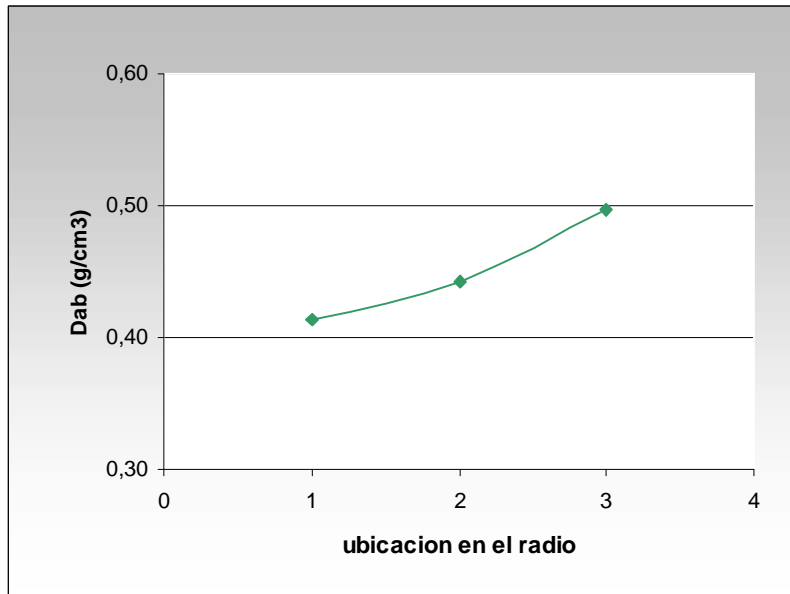
Probeta	N*	Dab (g/cm <sup>3</sup> )		
		Media	Desvest	CV (%)
M. Juvenil	97	0,414	0,035	8
M transición	102	0,442	0,056	12
M. adulta	65	0,498	0,061	12

\*N: número de probetas medidas.

En el gráfico No. 14 se visualiza la tendencia que presenta la densidad básica promedio desde médula a corteza.



Gráfico No. 14: Densidad aparente básica promedio ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) según ubicación radial



Los valores de densidad hallados para la población de *E. grandis* de 26 años son coincidentes con los encontrados en la bibliografía citada. Como se puede ver en el cuadro No 1 los valores de los diferentes autores van desde  $0.372 \text{ g}/\text{cm}^3$  hasta  $0.521 \text{ g}/\text{cm}^3$ , y el promedio general hallado en este trabajo fue de  $0.446 \text{ g}/\text{cm}^3$ .

En el gráfico No. 14 los valores de densidad aumentan de médula a corteza, esta tendencia también fue encontrada por Olaso (2002), Doldán (2003).

#### 4.5 DENSIDAD APARENTE BASICA, CONTRACCION Y LARGO DE FIBRA

En el cuadro No. 11 se puede observar los valores de densidad y contracción para todas las posiciones de médula a corteza muestreadas, siendo la posición más cercana a la médula uno y la más lejana la diez.

Cuadro No. 11: Valores promedio de densidad aparente básica, contracción tangencial, radial y volumétrica según ubicación radial

Posición Probeta	Distancia de médula a corteza		Dab (g/cm <sup>3</sup> )	Contracción de Verde a 18%			Contracción de Verde a anhidro		
	cm	%		$\beta t$	$\beta r$	$\beta v$	$\beta t$	$\beta r$	$\beta v$
1	3,62	18	0,418	4,717	1,484	6,201	9,266	4,282	13,548
2	6,14	31	0,412	4,500	1,627	6,126	8,943	4,572	13,515
3	7,78	39	0,413	4,493	1,508	6,001	8,918	4,570	13,488
4	10,20	51	0,417	4,361	1,563	5,924	8,840	4,720	13,560
5	12,30	61	0,440	4,382	1,928	6,309	8,985	5,127	14,112
6	14,18	70	0,472	5,100	2,053	7,153	9,921	5,520	15,440
7	16,12	80	0,492	5,044	2,276	7,320	10,083	5,837	15,921
8	17,97	86	0,500	5,228	2,248	7,476	10,253	5,761	16,014
9	20,21	90	0,500	4,844	2,121	6,965	9,819	5,614	15,433
10	21,47	93	0,578	3,921	1,261	4,761	8,547	5,289	13,836

#### 4.5.1 Correlación entre densidad aparente básica y contracción volumétrica

El determinar y conocer estas propiedades, ayuda a conocer mejor la transición de madera juvenil a madera adulta.

En el cuadro No. 12 se puede ver la correlación entre densidad aparente básica y contracción, para madera adulta, juvenil y de transición. Se puede ver que la correlación más alta es en la madera juvenil.

Cuadro No. 12: Correlación entre densidad aparente básica y contracción para madera juvenil, de transición y adulta

Ubicación	Coefficiente de Correlación
M .juvenil	0,59
M. transición	0,51
M .adulta	0,42
<b>Total</b>	<b>0,59</b>

Gráfico No. 15: Correlación entre contracción volumétrica y densidad aparente básica según posición en radio en porcentaje.

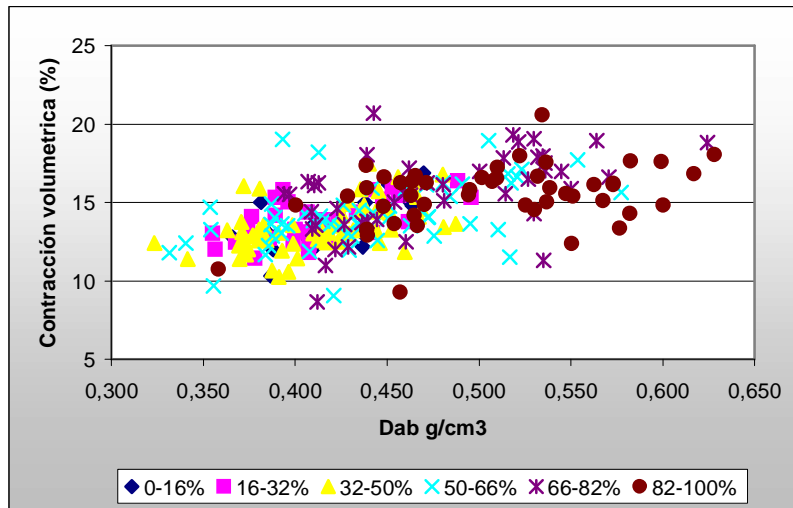
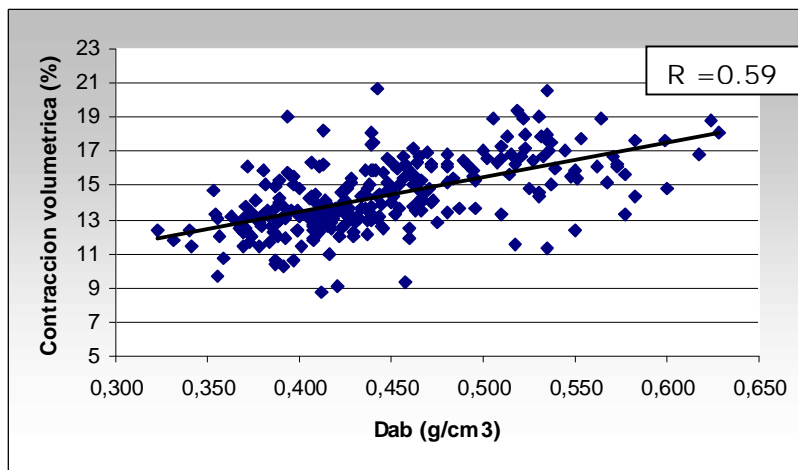


Gráfico No. 16: Correlación entre contracción volumétrica y densidad aparente básica.



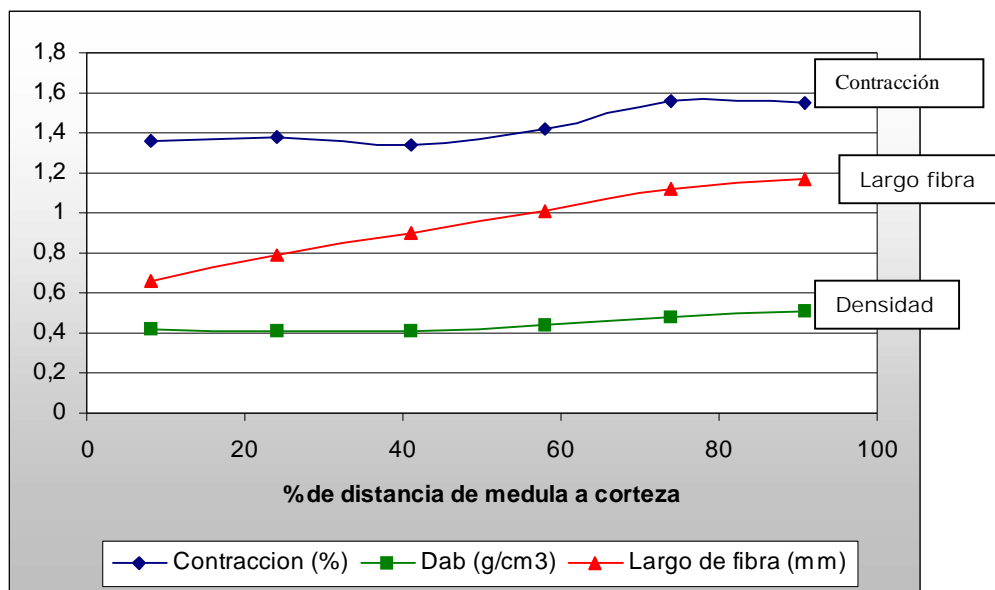
La correlación encontrada entre estas propiedades fue de  $R = 0.59$ . Se puede ver que a mayor densidad mayor contracción.

#### 4.5.2. Variación de contracción volumétrica total, densidad aparente básica y largo de fibra en el radio

En el gráfico No. 17 se puede ver el comportamiento de Dab, contracción y largo de fibra según ubicación en el radio. Aquí se observa que la Dab tiene un comportamiento estable hasta el 40 % de distancia a médula y luego aumenta.

En lo que refiere al largo de fibra se puede decir que aumenta con incrementos crecientes y, entre el 40 y 60 % de distancia a médula, comienzan los incrementos decrecientes. Para la propiedad contracción se encontró un comportamiento diferente, ya que si bien la tendencia es que aumenta claramente hacia la corteza, se encuentran algunos valores que escapan a ésta.

Grafico No. 17: Variación de Dab, contracción y largo de fibra según porcentaje de distancia a médula



Para una mejor visualización de los resultados en conjunto los datos de contracción fueron divididos entre 10. De esta manera se unificaron escalas.

#### 4.5.3. Análisis estadístico de la variación en el radio de largo de fibra, contracción y dab

Se ajustaron los modelos mas adecuados a cada variable. Estos fueron altamente significativos.

Para largo de fibra se ajusto un modelo bisegmentado lineal-plateau (Grafico No. 18). La ecuación de la recta en este caso es  $y = 0.5799 + 0.00726 x$ .

Siendo el punto en donde cambiaron las rectas el valor 79.27 % de distancia a médula (IC 77.1; 81,4).

Para contracción se ajustó un modelo bisegmentado plateau-lineal (Grafico No. 19). La ecuación de la recta en este caso es  $y = 0.4132 + 0.00210 x$ . Siendo el punto en donde cambiaron las rectas el valor 45.61% de distancia a médula (IC 36.1; 55.1).

Para la variable Dab se ajusto un modelo trisegmentado plateau-lineal-plateau (Grafico No. 20). La ecuación de la recta en este caso es  $y = 13.5385 + 0.0914 x$ . Siendo el primer punto en donde cambio la recta 50.95 % de distancia a médula (IC 44.3; 57,5) y el segundo 73.25 % de distancia a médula (IC 66.3; 80.1).

Grafico No. 18: Variación del largo de fibra según % de

distancia a médula

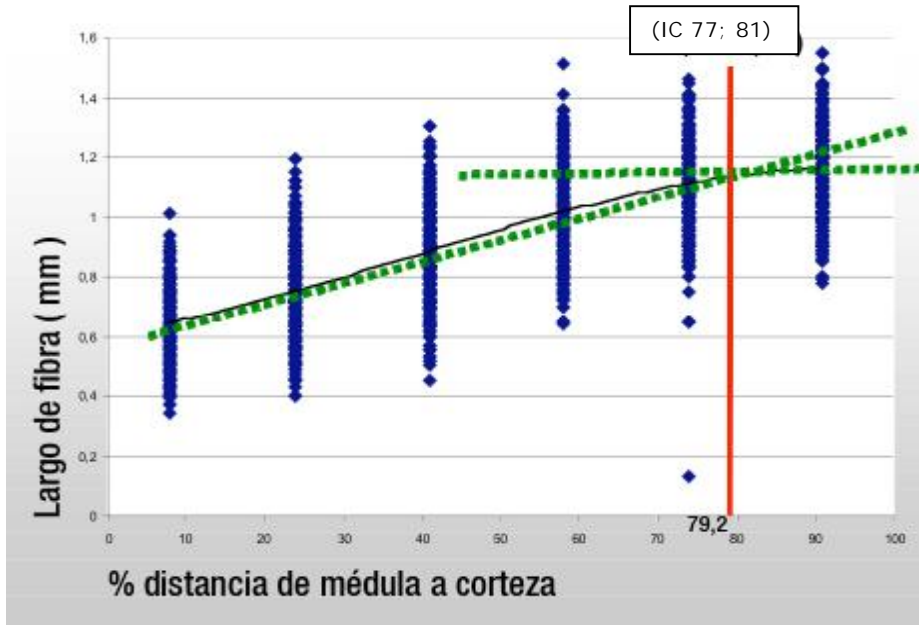


Gráfico No. 19: Variación de la dab según % de distancia a médula

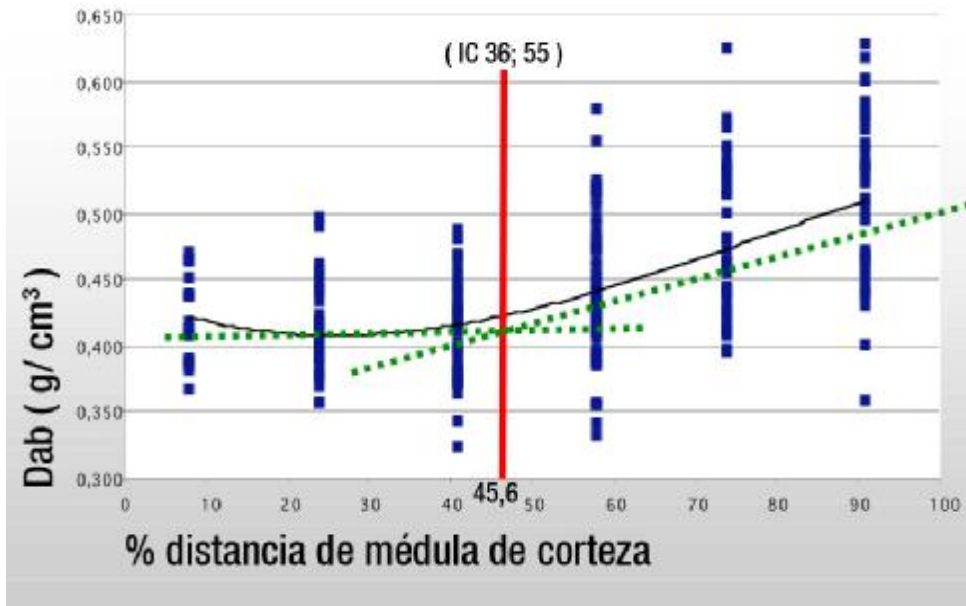
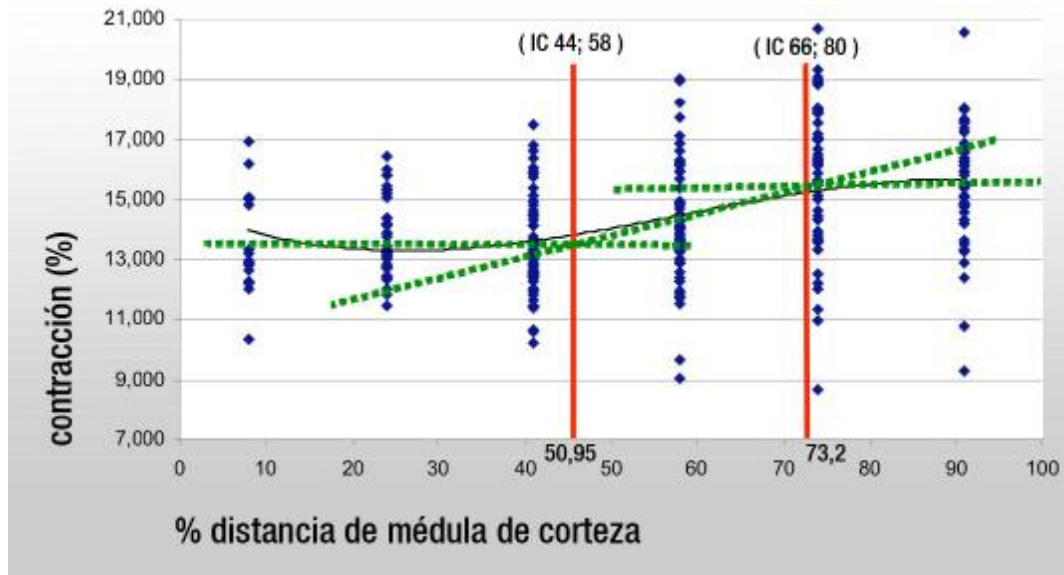


Gráfico No. 20: Variación de la contracción según % de distancia

a médula



Al analizar estas variables de manera conjunta se concluye que el rango de porcentaje de distancia a médula de madera de transición va desde el 36.12 % a 81.44%.

Con estos resultados podemos decir que la clase diamétrica media y baja presentan 6 cm de madera juvenil y la clase diamétrica alta 7cm. Por otro lado las clases diamétricas media y baja presentan al menos 3 cm de madera adulta y la clase alta 3.5.

#### 4.6. CLASIFICACIÓN VISUAL

A continuación se presentan los resultados para clasificación visual. Para facilitar el manejo de los datos se le asignó un número a cada categoría del cuatro al uno.

Siendo:

- **1** Especial: con una superficie libre de defectos del 90 % o más en una sola pieza.
- **2** Primera: con una superficie libre de defectos entre 66 y 89 % en no más de dos tablas.

- **3** Segunda: con una superficie libre de defectos entre 50 y 65 %.
- **4** Tercera: con una superficie libre de defectos de 50 % o menos.

Para la clasificación se asumió que si la tabla no cumplía con la condición más exigente automáticamente pasaba a la categoría siguiente. Por ejemplo si existía una tabla con un porcentaje libre de defectos igual o mayor a 90 % pero en más de una tabla pasaba a la siguiente categoría, o sea primera. De no cumplir con esta pasaba a la siguiente, es decir segunda.

En el cuadro No. 13 se presenta la media y el desvío para la población. La media se calculó con los valores que previamente se habían asignado a cada tabla según se explicó en el párrafo anterior.

Cuadro No 13: Resultados de la clasificación visual

	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<i>E.grandis</i>	125	2	1	3

La media encontrada fue 2, correspondiente a la categoría segunda. Se observa en el cuadro No 14 las cantidades de tablas clasificadas y porcentajes que se hallan en cada categoría.

Cuadro No. 14: Frecuencia de las categorías de las tablas clasificadas

<b>Categoría</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Total</b>	<b>Tablas B</b>	<b>Tablas C</b>
Especial	Cantidad	0	0	0
	Porcentaje	0	0	0
Primera	Cantidad	16	5	11
	Porcentaje	13	4	9
Segunda	Cantidad	61	32	29
	Porcentaje	49	26	23
Tercera	Cantidad	48	29	19
	Porcentaje	38	23	15

Existe una mayor cantidad en la categoría 2 o segunda. La que le sigue es la 1 o tercera, presentando una baja cantidad de tablas en la categoría 3 o primera.

No se encontró ninguna tabla perteneciente a la categoría especial.



Respecto a la posición en el radio hay un total de 66 tablas B y 59 tablas C. En las tablas B solamente el 6% pertenece a la categoría primera, y el resto están igualmente distribuidas entre tablas de segunda y tercera.

Por otro lado, las tablas C presentan un 19 % en la categoría primera, el 49% segunda y el 32% en la categoría tercera.

La ausencia de tratamiento silvicultural de este monte se ve reflejada en estos resultados. De todas maneras cabe resaltar que si ningún tipo de tratamiento un 13% pertenecen a la categoría de primera. Esto significa que presentan entre un 66 y 89% libre de defectos en dos o menos tablas.

Si tomamos en cuenta el total del área de las 125 tablas nos da un total de 5290158 cm<sup>2</sup>. De esta superficie el 56.7 % es *clear*, lo que corresponde a un total de 3002790 cm<sup>2</sup>.

#### 4.7. PROPIEDADES MECANICAS

En el cuadro No. 15 se observa la media y distribución de variables bajo estudio para la plantación.

Cuadro No 15: Media y distribución de variables

Variable	n	Media	Mínimo	Máximo	CV (%)
Densidad corriente (g/cm <sup>3</sup> )	130	0,601	0,466	0,770	12
MOE no destructivo (MPa)	130	13591	8855	20441	18
MOE destructivo (MPa)	130	11517	7442	17747	19
MOR (MPa)	130	50	11	101	19
MOE pp (MPa)	117	13023	7499	24230	25
MOR pp(MPa)	117	91	45	152	25

\*pp Pequeñas probetas libres de defectos

Al comparar el MOR de tablas de tamaño real con el valor de MOR de probetas libres de defectos vemos que éste es muy sensible a la presencia de nudos. Esto es así ya que el MOR en probetas libre de defectos es casi el doble que el hallado en tablas de tamaño real.

El MOE encontrado por el método FFT *Analyzer* es 15 % mayor al hallado por método destructivo.

Por otro lado, al comparar el MOE medido con FFT *Analyzer* y MOE en pequeñas probetas encontramos que este último es 4 % menor.

#### 4.7.1. Correlaciones entre las propiedades mecánicas estudiadas

En el cuadro No. 16 se presentan los coeficientes de correlación para algunas de las variables.

Cuadro No. 16: Coeficientes de correlación entre variables

<b>Variable 1</b>	<b>Variable 2</b>	<b>Correlación</b>
Densidad corriente (g/cm <sup>3</sup> )	MOE no destructivo (MPa)	0,840
Densidad corriente (g/cm <sup>3</sup> )	MOR destructivo (MPa)	0,611
Densidad corriente (g/cm <sup>3</sup> )	MOE destructivo (MPa)	0,735
MOE no destructivo (MPa)	MOE destructivo (MPa)	0,844
MOE no destructivo (MPa)	MOR destructivo (MPa)	0,627
MOE destructivo (MPa)	MOR	0,701
MOE pp (MPa)	MOR pp(MPa)	0,636

Se observa que la densidad corriente de las tablas tiene alta correlación con el MOE medido por el método no destructivo (FFT *Analyzer*) y también con el medido en la máquina universal (método destructivo).

Estos datos concuerdan con los hallados por Pérez del Castillo (2001) quien además demostró que el MOE medido por *FFT Analyzer* no presenta diferencias estadísticas significativas al MOE medido con la máquina universal.

La correlación entre MOE y MOR tanto para pequeñas probetas como para tablas de tamaño real es alta.

En el gráfico No. 21 se ve como se comporta el MOR por método destructivo en función de la densidad corriente. Esta alta correlación, 0.840, es muy importante ya que al conocer una de las propiedades, se puede deducir la otra. Puede ser una importante herramienta al momento de realizar mejoramiento genético.

Gráfico No. 21: MOE por método destructivo según densidad corriente

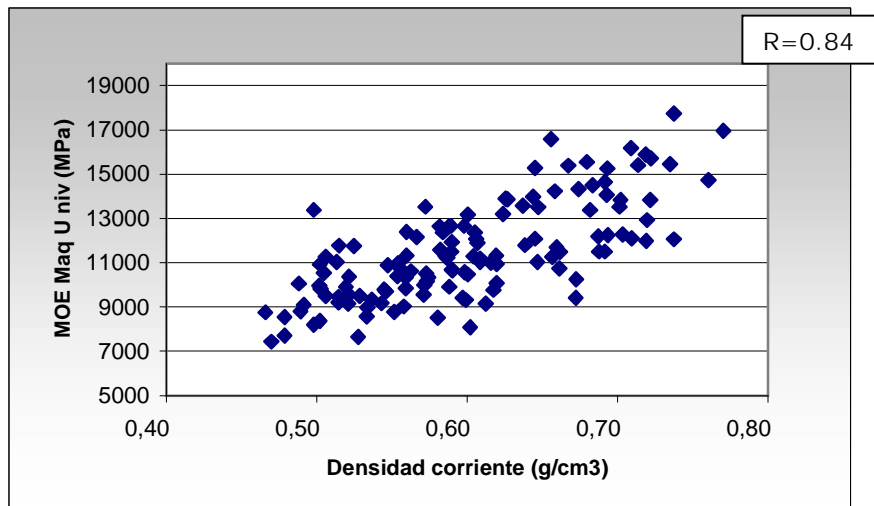
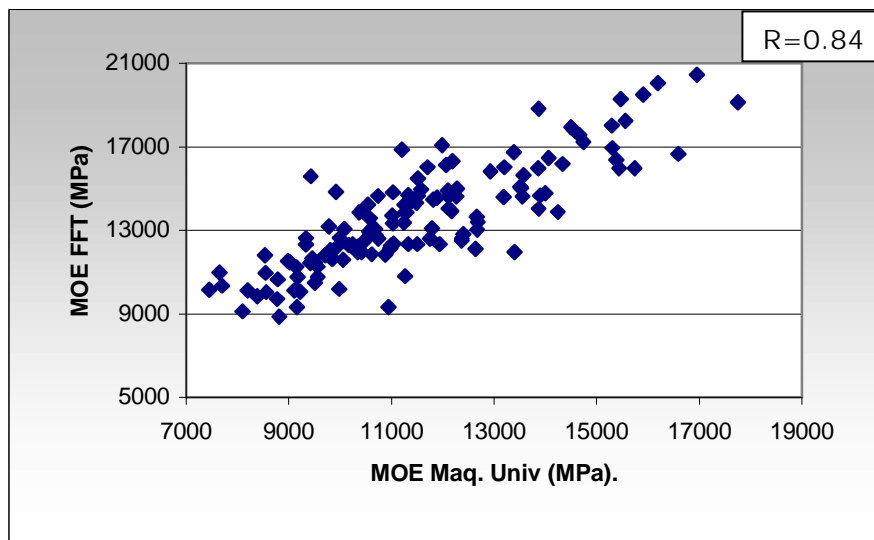


Gráfico No. 22: Relación entre MOE FFT y de MOE máquina universal



En el gráfico No. 22 se puede comprobar que existe una correlación muy alta entre el método destructivo y no destructivo para la determinación de MOE.

En el cuadro No. 17 se pueden comparar los resultados obtenidos por los diferentes autores, según revisión bibliográfica con los hallados en este trabajo

Cuadro No. 17: Comparación de resultados de MOR Y MOE.

AUTOR	EDAD POBLACIÓN	MOE FFT (Mpa)	MOE Maq. UNIVERSAL (MPa)	MOR Maq. UNIVERSAL (MPa)	MOE P.probetas (MPa)	MOR P.probetas (MPa)
Soria (1979) Población de Tacuarembó	3	-	14015		-	-
Mantero (1999) Procedentes de todo el país	-	-	-	-	13800	80
Pérez del Castillo (2001) Población de Rivera	16.5	12500	12100	54	11300	80
Olaso (2002) Población de Rivera	12	-	10213	75	-	-
Olaso (2002) Población de Paysandú	10	-	7939	59	-	-
Pérez del Castillo (2003) Población de Rivera	16	-	12524	53	11338	88
Pérez del Castillo (2003) Población de Río Negro	18	-	12863	52	12210	103
GTMA* (2004) Procedentes de Rivera	14	12425	10853	49	11766	83
GTMA* (2005) Procedentes de Rivera	18	14088	12174	57	11628	72
<b>Población estudiada (DURAZNO)</b>	<b>26</b>	<b>13591</b>	<b>11517</b>	<b>52</b>	<b>13022.8</b>	<b>91.2</b>

\*GTMA: GRUPO TECNICO DE MADERA ASERRADA

#### 4.7.2. Análisis de MOE y MOR en tablas de tamaño real según su ubicación en el radio

Se realizó un análisis de MOE y MOR según ubicación en radio para complementar el resultado obtenido en la clasificación visual.

Cuadro No. 18: MOE y MOR según ubicación en el radio.

Posición en radio	MOE (FFT) MPA	MOE maquina universal Mpa	MOR Mpa
<b>B</b>	13095	11090	42,6
<b>C</b>	14432	12195	58,74

Como era de esperar las tablas cercanas a la corteza presentan mayores valores tanto de MOE como de MOR. Las tablas C presentan mayor cantidad en la categoría primera y segunda que la B.

Tablas mejores categorizadas según clasificación visual presentan mayores valores de MOE y MOR.

#### 4.7.3. Clasificación de tablas según norma JAS y propiedades mecánicas

Cuadro No. 19: Clasificación de tablas en categorías estructurales según normas JAS.

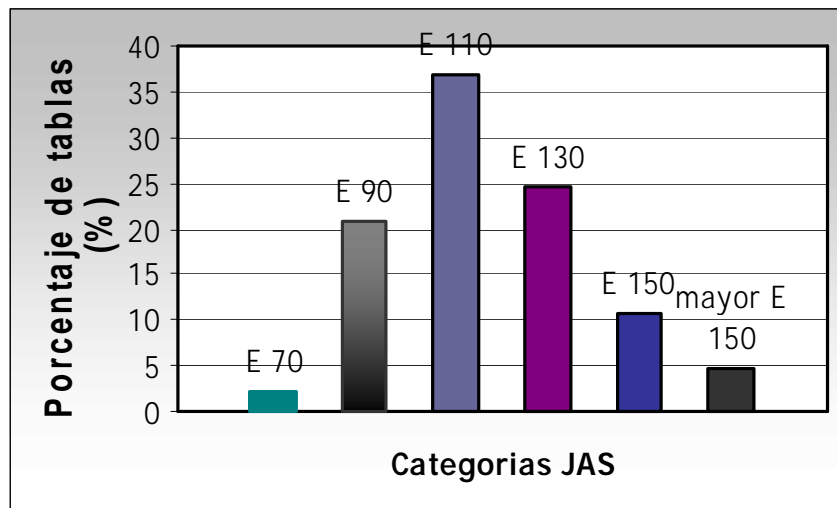
Categoría	MOE 10Kgf/cm2	MOE Maq. Univ. (Mpa)	Cantidad de tablas	Porcentaje (%)
E menor a 50	E menor a 40	menor a 3920	0	0
E 50	40 – 60	3920-5880	0	0
E 70	60 – 80	5880-7850	3	2
E 90	80 – 100	7850-9810	27	20
E 110	100 – 120	9810-11770	48	37
E 130	120 – 140	11770-13730	32	25
E 150	140 – 160	13730-15690	14	11
E mayor a 150	mayor a 160	mayor a 15690	6	5

En el cuadro No. 19 se muestra la clasificación de tablas según normas JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de coníferas de uso estructural. Según estas 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 esta población el 78 % de las tablas se encuentran por encima de esta categoría.

Si bien esta norma es para madera de coníferas, se utiliza también en madera de latifoliadas.

La evaluación de las tablas se basó en los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal.

Gráfico No. 23: Porcentaje de tablas según categoría JAS



Estos resultados coinciden con los hallados por el Grupo Técnico de Madera Aserrada (2005) en una población de *E.grandis* de 18 años.

#### 4.8. RESULTADOS DE TODAS LAS PROPIEDADES ESTUDIADAS

Cuadro No. 20: Resumen de todas las propiedades estudiadas

<b>PROPIEDADES</b>	<b>Media</b>	<b>Máx.</b>	<b>Mín.</b>	<b>CV (%)</b>
% Duramen	64	70	58	6
Largo de fibra promedio (mm)	0.92	1.8	0.13	25
Largo de fibra M. juvenil (mm)	0.70	1.19	0.34	20
Largo de fibra madera adulta (mm)	1.13	1.55	0.13	13
$\beta$ tang total (%)*	9	14	6	13
$\beta$ radial total (%)*	5	9	2	21
$\beta$ vol total (%)*	14	21	9	13
PSF vol (%)	34	-	-	-
Dab promedio (g/cm <sup>3</sup> )	0.446	0.625	0.323	7
Dab M. juvenil	0.414	0.496	0.355	8
Dab M. adulta	0.498	0.442	0.577	12
MOE (MPa)**	11517	17747	7442	19
MOR (MPa)**	50	101	10,5	19
MOE FFT (MPa)**	13591	20441	8855	18
MOR PP libre de defectos (MPa)	91	22.4	152.15	25
MOE PP Libre de defectos (MPa)	13023	24230	7499	25

\* Contracción verde hasta 0% de contenido de humedad

\*\* Propiedades mecánicas realizadas a un contenido de humedad de 12 %.

## 5. CONCLUSIONES

Al estudiar la variación del largo de fibra en el radio se pudo encontrar tres zonas definidas desde médula a corteza pertenecientes a madera juvenil, de transición y adulta.

La madera adulta además de tener largos de fibra mayores, es más homogénea que la madera juvenil. Por otro lado presenta mayor Dab y menor contracción. Lo que hace que sea de mejor aprovechamiento para la industria de la madera sólida.

Se encontraron valores de MOE y MOR similares a los hallados por otros autores nacionales en la misma especie y con edades menores.

El raleo aplicado a la plantación a la edad de 22 años indujo un aumento en el volumen de madera en diámetro pero los defectos originados por la falta de otro tipo de tratamiento silvicultural como la poda se vieron reflejados en la baja categorización visual de tablas.

Las tablas C presentaron mejores categorías al clasificarlas visualmente, correspondiéndose estos resultados con mayores valores de MOE y MOR. La madera crecida después de la poda natural tiene menos defectos que influyen sobre esas propiedades.

Las tablas ensayadas presentan una buena categorización estructural a pesar de la falta de tratamientos silviculturales y la mala categorización obtenidas por las tablas en la clasificación visual.

## 6. RESUMEN



Para realizar los ensayos se utilizo madera de una plantación de *Eucalyptus grandis Maiden ex Hill* de 26 años de edad del departamento de Durazno. Se clasificaron visualmente tablas secas de 2" x 6", y se determino modulo de elasticidad por método no destructivo. También se determino modulo de elasticidad y modulo de rotura por método de flexión estática (método destructivo). De las tablas se obtuvieron pequeñas probetas libre de defectos a las que se les midió modulo de elasticidad y modulo de rotura por el método destructivo. Se analizaron las correlaciones entre propiedades y para una misma propiedad la correlación entre distintos métodos. Se estudio densidad aparente básica, largo de fibra, contracción. Todas las variables estudiadas fueron analizadas en dirección transversal (de médula a corteza). También se calculo el porcentaje de duramen. Las variables MOE, MOR, densidad básica, largo de fibra y contracción aumentan desde médula a corteza. La mayoría de las tablas estudiadas en la clasificación visual, pertenecen a la categoría de tercera. El porcentaje de duramen no mostró tener correlación con la velocidad e crecimiento.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis Maiden ex Hill*; Clasificación visual; Módulo de elasticidad; Módulo de rotura; Densidad básica; Largo de fibra; Porcentaje de duramen.

## 7. SUMMARY

The material used for the tests was a 26 year ***old Eucalyptus grandis Maiden*** ex ***Hill*** plantation wood from Durazno. Kiln dried boards 2 x 6 inches were visually graded, and non-destructive modulus of elasticity was evaluated. Modulus of elasticity and modulus of rupture were measured by static bending (destructive method) also. From the boards small clear specimens were obtained and modulus of elasticity and modulus of rupture were tested using the destructive method. Correlations between properties were studied, also the correlation between different test for a property. Basic density, length of fiber and shrinkage were studied. All the properties were evaluated in the transversal way (from pith to bark). Also, percentage of heartwood was calculated. Modulus of elasticity, modulus of rupture, basic density, length of fiber and shrinkage increase from pith to bark. Most of the visually graded boards belong to the third category. Heartwood percentage did not correlate with growth speed.

Keywords: ***Eucalyptus grandis*** Maiden ex ***Hill***; Visual grading; Modulus of Elasticity; Modulus of rupture; Basic density; Length of fiber; Heartwood percentage.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. ACHUGAR, L. A.; SCAGLIONE, G. 2003. Evaluación de propiedades de la madera en clones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 97 p.
2. BIANCHI, B.; DIBARBOURE, H. 1993 Selección de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) por peso específico aparente básico y evaluación de tensiones de crecimiento. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 114 p.
3. BOCAGE, I.; ULERY, L. 2005 Caracterización anatómica de *Eucalyptus bentahamii* maiden et cambadge cultivado en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 97 p.
4. BÖTHIG, S. 2001. Densidad, dureza y color de *Eucalyptus grandis* de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 23 p. (Informe de Investigación no. 5)
5. BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. 1972. Variation in basic density and characteristics of the fibers in *Eucalyptus grandis* at b.h. Preliminary analysis. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. (IPEF). (5): 81-90. Tomado de: CAB Abstract. 1972-1975.
6. CARBALLO, P. 2006. Evaluación de peso específico aparente básico mediante Pilodyn, en una prueba de progenies de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) de 12 años de edad. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.
7. CENTURION, C.; LLANO, L. 1995. Determinación de peso específico aparente básico por los métodos UNIT 237-70 y máximo tenor de humedad con probetas de incremento radial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.
8. CORONEL, E. O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, 1ª parte; aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales. 187 p.
9. \_\_\_\_\_. 1996. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, 2ª parte; aspectos teóricos y

prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales. 329 p.

10. DOLDAN, J. 2003. Indicadores de calidad de madera de *Eucalyptus grandis* de Río Negro, Uruguay; contenido de humedad, densidad, contracción y largo de fibra. Montevideo LATU/JICA 40 p. (Informe de Investigación no. 9)
11. DOWNES, G. M.; HUDSON, I.L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H.; MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, L.R.; EVANS, R.; MUNERI, E.A. 1997. Sampling plantations; eucalyptus for wood and fiber properties. Australia, CSIRO . 132 p.
12. EL-HOSSEINY, F.; PAGE, D.H. 1973. The measurement of fibril angle of wood fibers using polarized light. *Wood Fiber*. 5: 208-214.
13. FERNÁNDEZ, E. M. 2004. Selección de clones de *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) por crecimiento y propiedades de la madera. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 71 p.
14. FINOCCHIETTI, S. Estudio de la variación axial de la densidad de la madera de *Eucalyptus grandis* (ex Maiden) para la determinación del punto de muestreo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 71 p.
15. GARCIA, G.; TARIGO, J. 2006 Propiedades físicas y mecánicas en dos plantaciones *Eucalyptus grandis* (ex Maiden). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 85 p.
16. GLOS, P. 1995. Solid timber; strength classes. In: Timber Engineering STEP 1. s.l., Centrum Hout. pp. A7/1-A7/8.
17. GRUPO TÉCNICO DE LA MADERA ASERRADA. 2004. Propiedades mecánicas de *E. grandis* del Norte del Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 44 p. (Informe no. 4)
18. GRUPO TÉCNICO DE LA MADERA ASERRADA. 2005. Propiedades mecánicas de *E. grandis* del Norte del Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 48 p. (Informe no. 5)
19. KOLMAN, F. F. P; COTE, W. A. 1984. Principles of wood science and technology. Berlin, Springer – Verlag. v. 1, 592 p.
20. MALAN, F.S. 1991. Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with

special reference to the effect of rate of growth South African Forestry Journal. no. 157: 16-23.

- 21.MANTERO, C. 1999. Propiedades físicas y mecánicas de los Eucaliptos: E.grandis; E.globulus, E.tereticornis. Uruguay Forestal. 9 (21): 13-16.
- 22.OLASO MARI, E. 2002. Estudio de la variación en las propiedades físicas y mecánicas de E. grandis Hill ex Maiden del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 81 p.
- 23.PAGE, D. H.; EL-HOSSEINY, F.; WINKLER, K.; BAIN, R. 1972. The mechanical properties of single wood-pulp fibers. Part 1; a new approach. Pulp and Paper Magazine of Canada. 73 (8): T198-T203.
- 24.PEREZ DEL CASTILLO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S. 2000. Ensayos de propiedades mecánicas de Pinus taeda por seis métodos no destructivos. Montevideo, LATU/JICA. 24 p. (Informe de Investigación no. 1)
- 25.\_\_\_\_\_. 2001. Propiedades mecánicas y calidad de madera de Eucalyptus grandis del Norte de Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 34 p. (Informe de Investigación no. 4 )
- 26.\_\_\_\_\_.; VENTURINO CAMAROTA, A. 2003. Resumen de propiedades Mecánicas de Eucalyptus grandis, Pino elliottii y Pinus taeda de distintas zonas del Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 31 p. ( Informe de Investigación no. 14 )
- 27.PITER, J.C. 2003. Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para Eucalyptus grandis en Argentina. Tesis Doctorado en Ingeniería. La Plata, Argentina. Universidad Nacional de La Plata. 206 p.
- 28.RODRIGUES, J.C.; GOMINHO, J.; FIGUEIRA, J. 2001. Within-tree variation of Heartwood, extractives and Wood density in the Eucalypt hybrid Urograndis (Eucalyptus grandis x E. urophylla). Wood and Fiber Science . 33 (1): 3-8.
- 29.SERRENTINO GIGENA, P.; VIERA FERRARI, J. 2006. Selección de Eucalyptus grandis Hill (ex maiden) por módulo de elasticidad y módulo de rotura de su madera.

Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 65 p.

30. SORIA, L. A. 1979 Aptitud papelera de *Eucalyptus grandis* como materia prima para la obtención de pastas celulósicas. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 69 p.
31. TAYLOR, F.W. 1973. Variation in the anatomical properties of South African grown *Eucalyptus grandis*. *Appita Journal*. 27 (3): 171-178.
32. TREACY, M.; EVERTSEN, J.; NI DHUBHAIN, A. 2000. A comparison of mechanical and physical wood properties of a range of Sitka spruce provenances. s.l., National Council for Forest Research and Development. 30 p.
33. TUSET, R.; DURÁN, F. 1979. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. 688 p.
34. URUGUAY, MINISTERIO DE GANADERIA AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCION GENERAL FORESTAL. 2005. Boletín estadístico diciembre de 2005. (en línea) .Montevideo. Consultado mar.2007. Disponible en <http://www.mgap.uy/Forestal/DGF.htm>
35. WILKINS, A. P. 1989. Sapwood, Heartwood and bark thickness of silviculturally treated heartwood formation in *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden. *IAWA Bulletin*. 10(3): 349. 2001.
36. \_\_\_\_\_.; HORNE, R. 1991. Wood density variation of young plantation grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*. 40 (1): 39-50. Tomado de: CAB Abstract. 1990-1991.
37. ZOBEL, B.; TALBERT, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. México, Limusa . 545 p.