

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE  
LA MADERA DE UNA POBLACIÓN DE *EUCALYPTUS BOSISTOANA*  
CULTIVADO EN URUGUAY**

**por**

**Andrea CARDOSO MACIEL  
Andrés CASTAGNA DU PRÉ**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2012**

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Ing. Agr. Carlos Mantero

-----  
Per. Agr. Hugo O'Neill

-----  
Ing. Agr. Andrés Dalto

Fecha:

25 de mayo de 2012

Autor:

-----  
Andrea Cardoso Maciel

-----  
Andrés Castagna Du Pré

## AGRADECIMIENTOS

A Facultad de Agronomía, en especial al Departamento Forestal y a nuestro director de tesis Carlos Mantero por su asesoramiento y constante apoyo en todo el trabajo.

Al Departamento de Proyectos Forestales, LATU por brindarnos un espacio de trabajo y los equipos para llevar a cabo los ensayos. En especial a Hugo O'Neill por su paciencia y dedicación; a Martín Vargas por su voluntad y entusiasmo en la confección de las probetas, y en general al personal del Departamento.

Al Ing. Agr. José Krall por brindarnos sus conocimientos y motivación en éste estudio.

A nuestras familias por su constante apoyo a lo largo de toda la carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1 GENERALIDADES DE LA ESPECIE.....	3
2.1.1. <u>Características vegetativas y reproductivas de la especie</u> .....	4
2.1.2. <u>Características de la madera</u> .....	5
2.1.3. <u>Anatomía</u> .....	6
2.1.4. <u>Usos de la madera</u> .....	7
2.2. ANTECEDENTES DEL URUGUAY.....	7
2.3. ANTECEDENTES FUERA DEL URUGUAY.....	9
2.4. PROPIEDADES FÍSICAS.....	9
2.4.1. <u>Densidad aparente</u> .....	9
2.4.2. <u>Contracción</u> .....	11
2.5. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	13
2.5.1. <u>Definición</u> .....	13
2.5.2. <u>Factores que afectan las propiedades mecánicas</u> .....	15
2.5.3. <u>Flexión estática</u> .....	15
2.5.4. <u>Compresión longitudinal a las fibras o compresión paralela</u> .....	16
2.5.5. <u>Dureza Janka</u> .....	17
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	18
3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRBOLES.....	18
3.2. OBTENCIÓN DE LA MADERA A ENSAYAR.....	18
3.3. PREPARACIÓN DE LAS PRE-PROBETAS.....	19
3.4. ANÁLISIS DE DATOS.....	20
3.5. ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE.....	21
3.5.1. <u>Densidad aparente básica</u> .....	21
3.5.2. <u>Densidad aparente corriente</u> .....	22
3.6. ENSAYO DE CONTRACCIÓN.....	22
3.7. ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA.....	25
3.8. ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA AL GRANO.....	27
3.9. ENSAYO DE DUREZA JANKA.....	28
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	30
4.1. DENSIDAD APARENTE BÁSICA.....	30
4.1.1. <u>Densidad básica según posición de la madera en el radio</u> .....	32

4.2. DENSIDAD APARENTE CORRIENTE.....	33
4.3. CONTRACCIÓN.....	34
4.3.1. <u>Contracción según contenido de humedad. Punto de Saturación de la fibras</u> .....	36
4.3.2. <u>Relación entre contracción radial y tangencial</u> .....	38
4.3.3. <u>Contracción volumétrica según posición desde la médula a corteza (1,2 3)</u> .....	38
4.3.4. <u>Contracción volumétrica según <math>D_{ap}</math> básica</u> .....	39
4.4. FLEXIÓN ESTÁTICA.....	39
4.4.1. <u>Variación de MOE y MOR entre y dentro de árboles</u> ...	40
4.4.2. <u>Distribución radial de los valores de MOE y MOR</u> .....	42
4.4.3. <u>Relación entre los valores de resistencia a la flexión y la densidad</u> .....	43
4.4.4. <u>Comportamiento del MOE y MOR en relación de la densidad por árbol</u> .....	44
4.4.5. <u>Valores de MOE y MOR corregidos al 12% de contenido de humedad</u> .....	46
4.5. ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA AL GRANO.....	46
4.5.1. <u>Variación de la compresión paralela entre y dentro de árboles</u> .....	48
4.5.2. <u>Compresión paralela al grano corregida al 12% de CH</u> .....	50
4.6. ENSAYO DE DUREZA.....	51
4.6.1. <u>Variación de la dureza Janka entre y dentro de árboles</u> .....	51
4.6.2. <u>Variación de la dureza Janka con la densidad de probetas ensayadas</u> .....	53
4.6.3. <u>Dureza y densidad por árbol</u> .....	54
4.6.4. <u>Dureza Janka ajustada al 12% de CH</u> .....	55
4.7. <u>RESULTADOS RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS</u> .....	56
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	57
6. <u>RESUMEN</u> .....	58
7. <u>SUMMARY</u> .....	59
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	60

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.		Página
1.	Valores de densidad aparente básica, corriente y verde según diferentes autores.....	10
2.	Valores de contracción de <i>E. bosistoana</i> según diferentes autores.....	11
3.	Mínimos valores de MOE y MOR de los grupos de resistencia para madera al 12% de humedad.....	15
4.	Valores mínimos de resistencia a la compresión paralela para maderas al 12% de humedad.....	16
5.	Valores medios de contenido de humedad (CH) de las probetas de contracción en cada medida realizada.....	23
6.	Media y descriptores para densidad aparente básica.....	30
7.	Valores medios de $D_{ap}$ básica por árbol ( $g/cm^3$ ).....	31
8.	Descriptores del $D_{ap}$ básico ( $g/cm^3$ ) según posición en el radio, desde medula a corteza.....	32
9.	Media y descriptores para densidad corriente ( $g/cm^3$ ).....	33
10.	Valores medios de densidad corriente por árbol ( $g/cm^3$ ).....	33
11.	Densidad corriente ( $g/cm^3$ ) según posición de medula a corteza.....	34
12.	Descriptores de la contracción lineal y volumétrica de verde a anhidro.....	34
13.	Valores de contracción total radial, tangencial, longitudinal y volumétrica por árbol.....	35
14.	Rectas teóricas de contracción ( $\beta$ ), PSF y Coeficiente de contracción.....	37
15.	Contracción radial, tangencial, coeficiente de anisotropía según posición desde medula a corteza.....	38
16.	Descriptores de MOE y MOR del ensayo de flexión estática con un CH promedio de 14.5%.....	40
17.	Variación de los valores de MOE entre y dentro de árboles (MPa).....	40
18.	Variación de los valores de MOR entre y dentro de árboles (MPa).....	41
19.	Medias de MOE y MOR según posición desde médula a corteza.....	43
20.	Descriptores de MOE y MOR corregido para un contenido de humedad de 12%.....	46
21.	Descriptores de compresión paralela al grano (MPa), al 15.7% de CH promedio.....	47
22.	Variación de los valores de compresión paralela al grano	

	entre y dentro de árboles (MPa).....	48
23.	Descriptores de compresión paralela al grano (MPa) al 12% de CH.....	49
24.	Valores medios de dureza Janka de las probetas con un CH promedio de 15.4%.....	51
25.	Valores medios de dureza Janka por árbol (MPa).....	52
26.	Media, desvío y coeficiente de variación de dureza Janka (MPa).....	52
27.	Dureza Janka (MPa) en las tres caras, para un CH de 12%...	55
28.	Resumen de las propiedades físicas y mecánicas del <i>E. bosistoana</i> .....	56

Figura No.

1.	Distribución natural de la especie.....	3
2.	Forma forestal de la especie.....	5
3.	Frutos, botones floreales y corteza.....	5
4.	Apariencia de la madera en sus tres cortes.....	6
5.	Vista de la porosidad en corte transversal de la madera de <i>E. bosistoana</i> .....	7
6.	Relación entre carga y deformación. Diagrama extraído de Coronel, 1996.....	14
7.	Imagen satelital de Google Earth con ubicación de la cortina (32°20'51.12''S; 54°26'58.16''O, elevación 155 m).....	18
8.	Foto del lugar donde se encontraba la cortina de árboles.....	18
9.	Esquema de obtención de tablones en corte trasversal de la troza.....	19
10.	Representación de la troza a partir de tablones.....	19
11.	Marcación de las pre-probetas sobre un tablón.....	20
12.	Tipo de pre-probetas obtenidas.....	20
13.	Medición de probetas con calibre.....	21
14.	Pesadas de probetas anhidras.....	21
15.	Pre-probetas de contracción y sierra circular donde se confeccionaron las probetas definitivas.....	22
16.	Probetas de contracción en estufa Yamato DK610.....	22
17.	Micrómetro digital.....	24
18.	Medición de probeta de contracción.....	24
19.	Ensayo de flexión.....	26
20.	Celda de carga, extensómetro sobre travesa.....	26
21.	Maquina Universal Minebea (NMB AL-250 kNB).....	28
22.	Ensayo de compresión: probeta y celda de carga.....	28
23.	Maquina Universal Minebea. Ensayo de dureza en sentido	29

	paralelo al grano.....	
24.	Ensayo de dureza en sentido perpendicular al grano. Vista del accesorio.....	29
25.	Forma tipo de ruptura en compresión paralela al grano.....	46
26.	Ruptura tipo “shearing” en compresión paralela.....	46

Gráfico No.

1.	Frecuencia relativa y porcentaje acumulado según rangos de $D_{ap}$ básica.....	30
2.	$D_{ap}$ básica según el contenido de humedad de las probetas saturadas.....	31
3.	$D_{ap}$ básica según posición de la madera en el radio.....	32
4.	Contracción radial, tangencial y volumétrica en función del contenido de humedad (CH%) y línea de tendencia.....	36
5.	Contracción longitudinal en función del CH (%) y línea de tendencia.....	36
6.	Contracción lineal y volumétrica según posición desde médula a corteza en cada dimensión.....	38
7.	Contracción volumétrica según rangos de $D_{ap}$ básica.....	39
8.	Distribución de valores de MOE y MOR según posición de médula a corteza.....	42
9.	Distribución de los valores de MOE y MOR según la densidad aparente al contenido de humedad de las probetas.....	43
10.	Relación entre los valores de resistencia y la densidad por árbol.....	45
11.	Relación entre compresión paralela al grano y densidad.....	49
12.	Relación entre compresión paralela al grano y densidad por árbol.....	50
13.	Relación entre dureza Janka en las tres caras de la madera y la densidad de las probetas al momento de ser ensayadas.	53
14.	Dureza Janka promedio y densidad al momento del ensayo según número de árbol.....	54



## 1. INTRODUCCIÓN

En 1959, en la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurtt - Facultad de Agronomía, se realizó un ensayo de introducción de varias especies del género *Eucalyptus* con el objetivo del estudio de la adaptación, comportamiento y crecimiento. Desde ese entonces se piensa en *Eucalyptus bosistoana* como una de las especies promisorias para adaptarse a las condiciones ambientales del Uruguay.

Se encontró un trabajo donde se recomienda, entre otras, el uso de esta especie para sistemas agroforestales y la obtención de madera para carpintería rural (Krall, 1997). Sin embargo su investigación quedó relegada frente a otras con objetivos distintos, no favoreciendo la diversificación de especies forestales y otros usos tanto maderables como no-maderables.

Es a partir del 2005 que se comienza con una política nacional de diversificación de especies, con el objetivo de promover la forestación a nivel de productores ganaderos y pequeños productores. Con esto se busca la utilización de especies en sistemas agroforestales con múltiples propósitos y la obtención de productos maderables de mayor valor.

Se considera de importancia la investigación y generación de información tecnológica, que es necesaria para conocer sus usos y de esta forma tener un mejor aprovechamiento del recurso maderero.

Actualmente en Uruguay no existen plantaciones comerciales de *E. bosistoana*, aunque si se puede encontrar cultivada en algunas cortinas y montes de abrigo (Brussa, 1994).

Respecto a datos de propiedades físicas y mecánicas de la madera de la especie, no existe información nacional y muy poca disponible a nivel internacional.

Es en este contexto que surge la inquietud de conocer más sobre la especie, dado las características que puede presentar para producir madera de calidad, y también no menos importante, como forma de generar antecedentes sobre las propiedades físicas y mecánicas del *E. bosistoana* para trabajos futuros.

Este trabajo tiene como objetivos generar conocimiento sobre las propiedades físicas y mecánicas de *E. bosistoana* cultivada en Bañados de Medina como una primera aproximación al comportamiento de la madera de la especie en el Uruguay.

Las propiedades que se estudiarán son:

Propiedades físicas: densidad aparente (básica, corriente), contracción (radial, tangencial, longitudinal, volumétrica)

Propiedades mecánicas: dureza Janka (transversal, tangencial, radial), flexión estática, compresión (paralela) en pequeñas probetas libres de defectos.

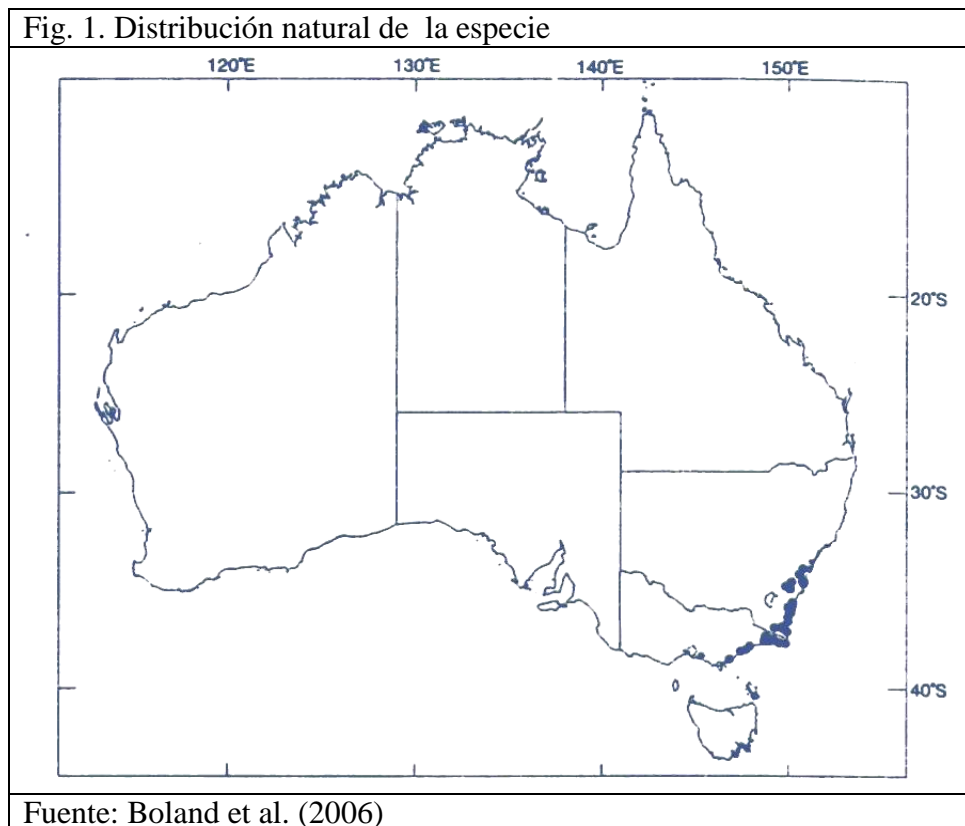
Además de los objetivos anteriores se busca clasificar la madera de la especie *E. bosistoana* cultivada en Bañados de Medina, según los resultados obtenidos de las distintas propiedades estudiadas.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 2.1. GENERALIDADES DE LA ESPECIE

La especie *Eucalyptus bosistoana* (nombre común en Australia: “Gippsland Grey Box”, “Coast Grey Box”), pertenece al género *Eucalyptus*, subgénero *Symphyomyrtus*, sección *Adnataria*. Se distribuye naturalmente en la región de Gippsland en el estado de Victoria y en el sureste del estado de Nueva Gales del Sur. En este último se encuentra en el sur de Wolgan Valley y una pequeña población en Southern Tableland (CPBR, 2006). FAO (1956), Boland et al., citados por Brussa (1994) mencionan la zona de distribución en áreas costeras de las regiones centro-este y sur del continente australiano (33°30' - 37°30' S), desde el nivel del mar a 300 metros, pudiéndose encontrar hasta 500 m de altitud.

En la figura 1 se muestra un mapa de Australia con la distribución natural, representada por puntos.



El clima del lugar de origen se caracteriza por temperaturas de 22-28°C y 1-6°C en los meses más cálidos y más fríos respectivamente. El régimen de precipitación es

uniforme, sumando, las lluvias anuales, un total de 750 a 1900 mm. (Boland et al., 2006).

Según Boland et al. (2006) la incidencia de heladas es baja a moderada (de 5 a 40 heladas por invierno en sitios elevados). Harris y Kevin (2001) clasifican a la especie como de alta resistencia a heladas.

En el área de distribución natural, esta especie, tiene preferencia por suelos de buena calidad, de limos profundos sobre piedra caliza. Puede soportar tanto períodos de anegamiento como de sequía. Es encontrada creciendo junto a otras especies de *Eucalyptus* o formando pequeños bosques monoespecíficos. Se desarrolla bien en áreas abiertas y a lo largo de pequeñas planicies de los ríos (Boland et al., 2006).

### **2.1.1. Características vegetativas y reproductivas de la especie**

En Brussa (1994) se describe a *E. bosistoana* como “árbol de buena altura con ramaje compacto y follaje de textura media”. En bibliografía australiana se encontró que puede alcanzar una altura entre 45 y 60 m, y diámetros de 0.90-1.2 m (Baker y Smith 1912, CPBR 2006). La corteza se describe como “persistente, escamosa, de fibras entrecruzadas manteniéndose hasta una tercera parte del tronco al menos; caduca en largas fajas en el resto y en ramas; ritidoma blanquecino y amarillento” (Brussa, 1994).

La descripción morfológica de la especie en Uruguay se puede encontrar en forma detallada en Brussa (1994). Las características más relevantes que menciona son botones florales curvados, inflorescencias simples o paniculadas y frutos con 5 valvas inclusas o a nivel. Otra característica particular que se menciona en CPBR (2006) es la forma larga y angosta de las hojas adultas.

En las siguientes figuras se presenta una fotografía que muestra la forma del árbol creciendo en una cortina forestal, e imágenes de los frutos, botones florales y corteza de un árbol de *E. bosistoana*.

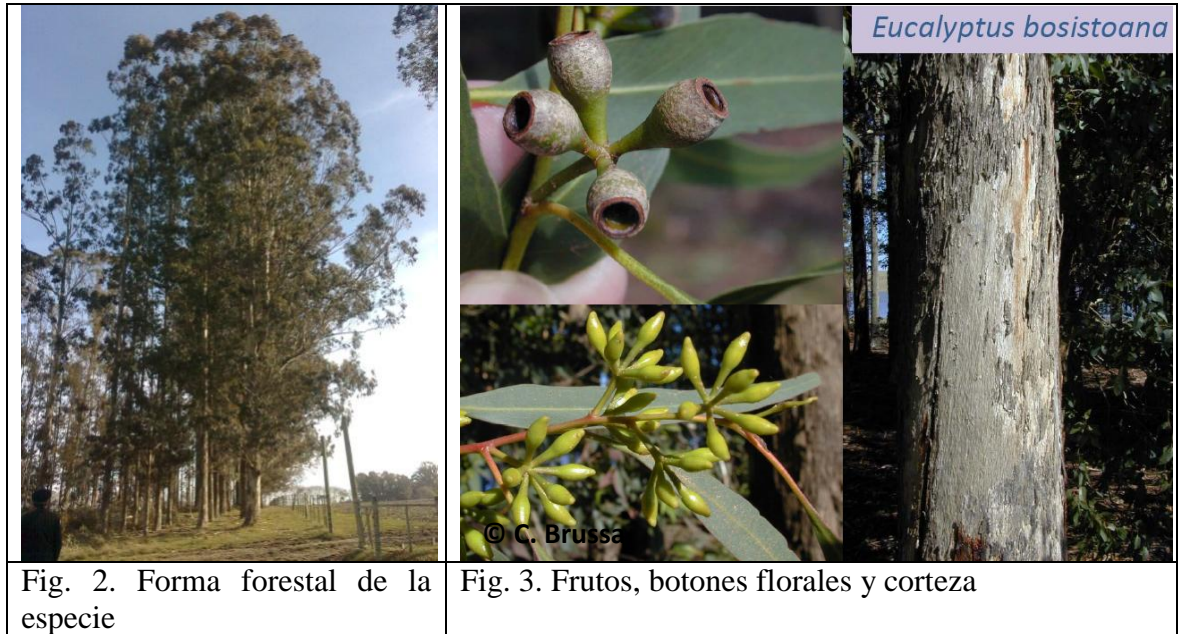


Fig. 2. Forma forestal de la especie

Fig. 3. Frutos, botones florales y corteza

La época de floración, en el lugar de origen, ocurre desde fines de primavera hasta febrero (Boland et al., 2006). Por otro lado, CPBR (2006), dice que la floración puede registrarse en febrero, marzo, abril y julio. Simberloff y Rajmánek (2011) menciona como una estrategia de regeneración de la especie la formación de lignotubérculos.

**2.1.2. Características de la madera**

El duramen es de color marrón claro, a veces con tonalidades rosadas; mientras que la albura es notoriamente más clara a blancuzca. Presenta una textura fina y uniforme, usualmente con grano entrecruzado (Boas 1947, Bootle 1983, Forestry and Timber Bureau 1985, Boland et al. 2006).



Fig. 4. Apariencia de la madera en sus tres cortes

Según el estándar australiano AS 5604-2005 (Timber – Natural durability rating), que refiere a la durabilidad natural, el duramen es considerado como de Clase 1, que corresponde con una expectativa de uso mayor a 25 años; mientras que, cuando la madera no está en contacto con el suelo, la durabilidad se estima mayor a 40 años (DEEDI s.f., FWPA 2012). Por otro lado, algunos autores mencionan que la albura puede ser atacada por *Lyctus*, aunque tiene una resistencia moderada (21 a 40 años) al ataque por taladros marinos y alta resistencia a termitas (Boland et al. 2006, FWPA 2012).

También se considera una madera algo difícil de trabajar y de lento secado, aunque generalmente no desarrolla defectos. Además tiene un comportamiento satisfactorio para el curvado con vapor (FWPA, 2012).

### **2.1.3. Anatomía**

Pertenece al grupo de *Eucalyptus* que poseen poros solitarios, cristales, radios finos (aunque pueden ser de 3 a 4 células de ancho) y textura difusa (Boas, 1947).



Fig. 5. Vista de la porosidad en corte transversal de madera de *E. bosistoana*

#### **2.1.4. Usos de la madera**

La mayoría de los autores consultados le adjudican los siguientes usos a la madera de *E. bosistoana*: postes, crucetas, piques, cercos, estructuras de ingeniería pesada, vigas y planchas, durmientes, pisos y “decks”, muelles y puentes (Boas 1947, Bootle 1983, Forestry and Timber Bureau 1985, Brussa 1994, Krall 1997, Boland et al. 2006).

La especie fue casi extinguida en la época de 1920 en Australia, ya que la madera era apreciada por su alta durabilidad y estabilidad (Millen, 2011).

Además de los productos madereros que brinda la especie, se encontró referencia de otros usos. Penfold y Willis, citados por Brussa (1994) destaca el potencial de *E. bosistoana* como excelente melífero. Por otro lado, Baker y Smith (1912) menciona el uso de hojas y brotes terminales para la extracción de aceites esenciales.

#### **2.2. ANTECEDENTES EN URUGUAY**

Como se dijo más arriba el *E. bosistoana* fue introducido al Uruguay en 1959 junto con otras especies para evaluar su adaptabilidad, UDELAR (URUGUAY). FA (1979).

Krall (1970) teniendo en cuenta las condiciones ambientales del lugar de origen, menciona que la especie sería apropiada de plantar en zonas bajas no anegadas de la cuenca de la Laguna Merín, en los departamentos de Rocha, Treinta y Tres y Cerro Largo.

En un estudio realizado por Balmelli y Resquin (2005) en la Unidad Experimental de INIA “Glencoe” (Tacuarembó), donde se ensayan 20 especies de *Eucalyptus* para evaluar el comportamiento de las mismas sobre basalto superficial y profundo. Entre estas se evalúa *Eucalyptus bosistoana* de procedencia Bañados de Medina. Esta presentó uno de los tres porcentajes de sobrevivencia mayor (84%) junto con *E. camandulensis* y *E. tereticornis*. Se destaca también su alto volumen y densidad de follaje que determinan una buena capacidad de brindar sombra y abrigo para el ganado; característica que lo recomienda para uso con tales fines para la región de basalto.

En ese mismo ensayo, datos sin publicar de mediciones realizadas al año 15, muestran un diámetro y altura promedio de los árboles igual a 0.20 m y 21 m respectivamente. Según observaciones realizadas sobre los ensayos, se vio que a lo largo de los primeros años el crecimiento era lento, sin embargo, en los últimos años ha aumentado los incrementos<sup>1</sup>.

La iniciativa de estudio del comportamiento de *E. bosistoana* sobre basalto ya era impulsada por el Ing. Agr. José Krall. En un artículo publicado en la revista de la Sociedad de Productores Forestales, se menciona a *E. bosistoana* entre las especies que se deben utilizar en esa región en sistemas silvopastoriles, con el objetivo de complementar las necesidades del país de maderas duras y durables para uso como postes, piques, durmientes, entre otros; además de los beneficios de su asociación con la ganadería (Krall, 1997).

Esta especie ha demostrado buenos crecimientos en suelos pesados de Bañados de Medina, en la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurt, además de en otras condiciones muy similares. Se destaca por su excelente forma, creciendo con fuste recto y cilíndrico de gran calidad (Krall, 1997).

Otro antecedente encontrado en Uruguay, resalta la potencialidad del *E. bosistoana* para la producción de aceites esenciales. En el estudio se determinó que el rendimiento en aceite fue de 1% y 82% de 1.8-cineol (“eucalyptol”). El uso que se le puede dar a estos aceites puede ser variado: medicinal, industrial y perfumería (Mantero et al., 2007).

Pou (1981) menciona a *E. bosistoana* dentro de las especies adaptables para producir madera con fines energéticos. A su vez, Brussa (1994) cita a la madera de la especie como un excelente combustible.

---

<sup>1</sup> Balmelli, G. 2011. Com. personal.



### **2.3. ANTECEDENTES FUERA DEL URUGUAY**

En el trabajo de Duarte et al. (2002) donde se realiza una caracterización silvicultural de la especie en plantaciones experimentales en Guaíba-RS, se determina que presenta un porcentaje de rebrote alto. Se encontró que el tiempo desde el corte al inicio de rebrote es de  $57 \pm 14$  días, con un número de 8 rebrotes por tocón de altura media a los 60 días de  $41.3 \pm 4.3$  cm.

Otro autor relata que se obtuvieron resultados positivos en el enraizamiento de estacas en otoño o invierno, utilizando brotes nuevos y sombra parcial (Vegetative propagation..., citado por De Vastey, 1962).

### **2.4. PROPIEDADES FISICAS**

#### **2.4.1. Densidad aparente**

Se puede definir la densidad aparente ( $D_{ap}$ ) de la madera como la cantidad de materia leñosa (en unidades de peso) por unidad de volumen (Coronel, 1994).

La densidad aparente es la relación entre el peso y el volumen de la madera sin descontar los espacios huecos de su interior. Es muy variable, dependiendo de la estructura y el contenido de humedad de la madera (Coronel, 1994).

La densidad básica es una de las propiedades de mayor importancia para determinar las especies que presentan madera de buena calidad. Una densidad alta confiere a la madera mayor resistencia mecánica y mayor capacidad calorífica por unidad de volumen (Duarte et al., 2000) entre otras propiedades físicas (Coronel, 1994)

Siempre que se determine la densidad aparente de una madera debe indicarse con que humedad se encuentra la misma. Se le llama densidad aparente normal cuando la relación entre el peso y el volumen de la madera es a 12 % de contenido de humedad. La densidad aparente básica es la relación entre el peso anhidro de la muestra y el volumen verde de la misma (Coronel, 1994).

Factores que influyen sobre la densidad aparente según Coronel (1994):

- Para cada especie vegetal se determina un  $D_{ap}$  promedio que es el característico, se conoce además que existen variaciones incluso dentro de la misma especie.
- La humedad, que afecta directamente al  $D_{ap}$ .
- Existen diferencias en el  $D_{ap}$ , dependiendo si la madera es del leño temprano o tardío, presentando un menor valor en el primero que en el segundo, debido principalmente al grosor de las paredes de uno y otro leño.

- El ancho de los anillos de crecimiento. En latifoliadas sucede que cuanto más ancho es el anillo mayor proporción de leño tardío, por lo tanto mayor  $D_{ap}$ . Se destaca que en latifoliadas de porosidad difusa casi no se encuentran variaciones en este sentido.
- La posición de toma de muestra en el tronco: en latifoliadas los valores de  $D_{ap}$  varían desde la médula a la parte externa; es importante la correspondencia de la variación en el sentido transversal con el ancho de los anillos de crecimiento dado que es muy diferente según se trate de madera juvenil o normal.

También se definen algunas causas externas de variación del  $D_{ap}$  sobre los árboles, como son: el lugar de crecimiento y los métodos silviculturales.

En cuanto a *Eucalyptus bosistoana* se han encontrado en la bibliografía distintos autores que mencionan valores de densidad.

A partir del estudio de 10 especímenes, Dadswell (1972) menciona un rango de 0.78 a 0.98  $g/cm^3$ , con 95% de probabilidad, y una media de 0.88  $g/cm^3$ .

En un trabajo realizado en Brasil, se muestrearon 5 árboles de 7 años de un ensayo con un espaciamiento de 2 x 2 m. En el mismo se obtuvieron los siguientes valores de densidad aparente básica: 0.68 a 0.70  $g/cm^3$  (a 1.30 m de altura), 0.67 a 0.69  $g/cm^3$  (albura), 0.66 a 0.68  $g/cm^3$  (cerno) y una media de 0.66 a 0.69  $g/cm^3$  (Duarte et al., 2002).

A continuación se presenta un cuadro resumen con todos los valores de densidad encontrados.

Cuadro 1. Valores de densidad aparente básica, corriente y verde según distintos autores			
Autor	$D_{ap}$ básica ( $g/cm^3$ )	$D_{ap}$ 12% ( $g/cm^3$ )	$D_{ap}$ verde ( $g/cm^3$ )
Boas (1947)	-	0.99 a 1.20	1.28
Dadswell (1972)	0.78 a 0.98	-	-
Bootle (1983)		1.10	1.18
Duarte et al. (2002)	0.68	-	-
Boland (2006)	-	0.99 a 1.19	
Nguyen et al. (2008)	-	1.11	-
Brink (2008)	-	0.90 a 1.20	-
DEEDI (s.f.)	0.88	1.09 a 1.10	1.16 a 1.18

### 2.4.2. Contracción

La contracción de la madera es la disminución del volumen debida a la eliminación de las moléculas de agua de los espacios submicroscopicos y de la pared celular por evaporación y difusión, ocasionando aproximaciones entre las micelas (Coronel, 1994).

La contracción de la madera se produce desde el punto de saturación de la fibras (PSF) hacia 0% de humedad, es decir que depende únicamente del agua de impregnación y de constitución.

Según Kollmann y Coté (1984), Coronel (1994) entre otros, la contracción volumétrica es la suma de las contracciones lineales, siendo la mayor alteración lineal en el sentido tangencial, luego en sentido radial y finalmente en dirección longitudinal. En algunos casos esta última contracción se considera despreciable, esto se explicaría porque la mayoría de los elementos estructurales que constituyen la madera están en forma vertical lo que hace que el número de paredes por  $\text{cm}^2$  en este sentido sean escasas.

La madera es un material que presenta anisotropía; según Coronel (1994) existe una relación entre la contracción tangencial y la contracción radial, llamada anisotropía dimensional de la contracción ( $A_c$ ) y realiza una clasificación del comportamiento de las maderas durante el secado:

$A_c = \beta_t/\beta_r$	Clasificación
1	Ideal, alteración idéntica de las dimensiones en secado
1,2 – 1,5	Excelente
1,6 – 1,9	Normal
>2	Se elimina la madera para varias utilidades

Los datos encontrados en la bibliografía sobre *Eucalyptus bosistoana*, referente a esta propiedad, se resumen en el siguiente cuadro:

Autor	Contracción al 12 % (%)	
	Radial	Tangencial
Boas (1947)	4	8
Bootle (1983)	4	7
DEEDI (s.f.)	4	7
FWPA (2012)	> 5	8.2

En adición a lo anterior, FWPA (2012) cita un coeficiente de contractibilidad de 0.42%. Este coeficiente indica la reducción en volumen de madera por cada punto porcentual de disminución en el contenido de humedad (Coronel, 1994).

FWPA (2012) clasifica la madera de *E. bosistoana* como de muy alta contracción.

Factores que influyen en la contracción de la madera:

Uno de los factores que tiene mayor influencia en la contracción de la madera es el contenido de humedad. Utilizar una pieza con una humedad alta afecta la apariencia del trabajo, debido a los alabeos, grietas y rajaduras que se producen en la misma al perder el agua. No menor es el efecto de utilizar madera demasiado seca, que al absorber humedad para obtener su equilibrio puede ocasionar grandes movimientos (Bootle, 1983).

Kollmann y Coté (1984) menciona que cuanto mayor sea la densidad de la madera mayor será la contracción volumétrica.

Usos:

Las contracciones lineales aportan información cuando se quiere conocer el comportamiento de una tabla en espesor o en ancho, principalmente. La contracción volumétrica es útil para conocer los cambios de volumen de las piezas de madera (Pezo, 2007).

Según Tuset y Duran (2007), si se observa piezas de caras radiales, éstas presentan mayor contracción en espesor y menor en el ancho que las de caras tangenciales. Esto tiene importancia cuando se piensa a la pieza para utilizarla en pisos, en donde son preferibles las radiales.

Debido a los costos y al tiempo que insume el secado de la madera, es necesario tener en cuenta los efectos de la contracción; así como también cuando se colocan anclajes en construcción se debe tener en cuenta el movimiento debido a la contracción para evitar la distorsión de transferencia y desigualdad de cargas sobre los mismos (Bootle, 1983).

## **2.5. PROPIEDADES MECÁNICAS**

### **2.5.1. Definición**

Se refieren a los comportamientos y a las resistencias que presentan las maderas cuando sobre ellas actúan cargas externas (Coronel, 1996).

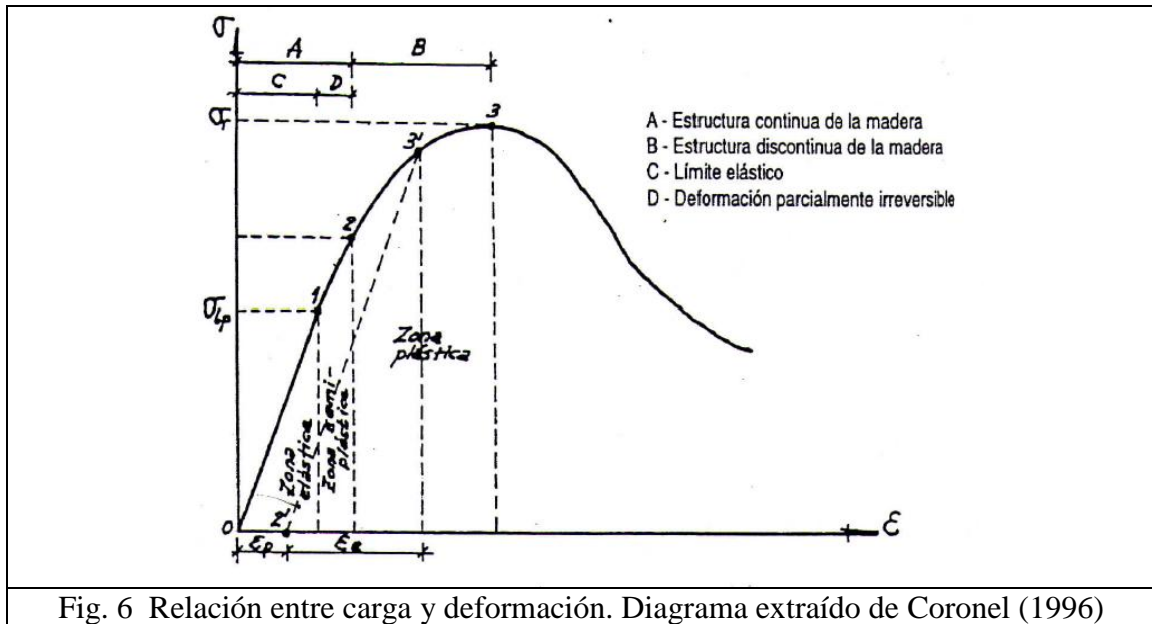
Las propiedades mecánicas están relacionadas fundamentalmente con las cargas aplicadas, y en determinadas circunstancias con el tiempo en que actúan las mismas, y la forma en que se realizan las combinaciones entre estas (Coronel, 1996).

En el presente trabajo se estudian algunas resistencias estáticas de la madera (compresión paralela y flexión estática). El uso de esta información tiene importancia en el dimensionado de piezas, según la resistencia y deformación que tengan (Coronel, 1996).

Los ensayos para evaluar las propiedades mecánicas pueden llevarse a cabo a través de métodos destructivos o no destructivos. A su vez los procedimientos utilizados en los ensayos destructivos pueden aplicarse sobre probetas libres de defectos o sobre madera de dimensiones comerciales (Coronel, 1996).

Cuando se utiliza probetas sin defectos se denomina Ensayos Normalizados. Con estos se busca eliminar la incidencia que pueden tener defectos, como nudos y rajaduras, en el comportamiento de la madera. Sin embargo, aunque los valores obtenidos se usen para determinar las Tensiones Admisibles de diseño en la construcción con madera, son de utilidad limitada ya que no reflejan la influencia de particularidades de la madera (Ej.: inclinación de la fibras, nudos), (Coronel, 1996).

Cuando se realiza el ensayo de resistencia estática, con los datos obtenidos se puede elaborar el diagrama esfuerzo-deformación.



Inicialmente la relación esfuerzo-deformación es lineal hasta el punto 1, llamado límite de proporcionalidad. En esta zona la madera se comporta de forma elástica, teniendo lugar un proceso reversible, donde no influye el tiempo de aplicación de carga. Luego se presenta una zona de deformación semi-plástica, donde la deformación es parcialmente reversible. Estas dos zonas se identifican por la continuidad de la estructura interna de la madera, no presentando fisuras visibles. Finalmente, a partir del punto 2 (límite de la zona semi-plástica), aparecen discontinuidades en la madera dando lugar a un proceso de rotura de la estructura interna. Esto genera la aparición de una zona de deformación plástica que refiere a un proceso irreversible (Coronel, 1996).

Módulo de Elasticidad (MOE).

El MOE es la relación entre el esfuerzo por unidad de superficie y la deformación por unidad de longitud (Tuset y Durán, 2008). Es una medida de rigidez del material, ya que a mayor valor del MOE, mayor resistencia del material y menor la tendencia a deformarse. Cuánto más alto sea su valor, el material es mejor para fines constructivos (Coronel, 1996).

Módulo de Rotura (MOR).

Tuset y Durán (2008) lo definen como el esfuerzo unitario máximo provocado en una probeta de madera cuando esta se rompe. Refleja la máxima capacidad de carga de una pieza de madera en flexión (Kretschmann, 2010).

### **2.5.2. Factores que afectan las propiedades mecánicas**

Son varios los factores que influyen en el comportamiento y resistencia de la madera. Los más importantes se pueden dividir en: los que están relacionados con la naturaleza del material y los relacionados con las condiciones ambientales (Coronel, 1996).

Uno de los factores del primer grupo, el cual se analiza su influencia, es la densidad aparente ( $D_{ap}$ ). Coronel (1996) dice que la resistencia de la madera a las acciones mecánicas aumenta con la  $D_{ap}$ .

### **2.5.3. Flexión estática**

El estudio de esta propiedad se realiza básicamente en el sentido longitudinal de las fibras, ya que la flexión en sentido transversal no tiene importancia por la baja resistencia de la madera en ese sentido (Coronel, 1996).

Cuando una carga actúa sobre una pieza de madera ocasionando un esfuerzo de flexión estática, se generan diferentes tensiones en las capas de fibras, sufriendo distintas deformaciones. Existirá una tensión máxima de compresión en la capa superior de las fibras, una tensión máxima de tracción en la capa inferior y una tensión nula en la capa neutra (Coronel, 1996). Las fibras que sufren un esfuerzo de compresión se acortan, en cambio las que sufren un esfuerzo de tracción se alargan. Por otro lado en plano neutro o zona central hay una tendencia al deslizamiento, generándose un esfuerzo de corte (Tuset y Durán, 2008)

La información que provee este ensayo es útil para determinar valores de resistencia de maderas utilizadas, por ejemplo, en cerchas de galpones, largueros de puentes, postes (Tuset y Durán, 2008).

Una de las clasificaciones encontradas en Bootle (1983), agrupa a las maderas según el valor mínimo de MOE y MOR, como se muestra en el siguiente cuadro:

Propiedad	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8
MOR (MPa)	150	130	110	94	78	65	55	45
MOE (MPa)	21500	18500	16000	14000	12500	10500	9100	7900

FWPA (2012), clasifica la madera de *E. bosistoana* en el grupo SD1, tanto para MOE como MOR.

En cuanto a los antecedentes de MOE y MOR para flexión estática, de la especie, se ha encontrado el mismo valor citado por DEEDI (s.f.), Bootle (1983), FWPA (2012) que corresponde a 21000 MPa y 163 MPa respectivamente, para 12% de contenido de humedad. Para madera en estado verde, el valor para MOE es de 17000 MPa, y el de MOR 103 MPa.

#### **2.5.4. Compresión longitudinal a las fibras o compresión paralela**

La compresión de la madera se puede estudiar teniendo en cuenta la dirección y sentido de las cargas aplicadas. Según esto se puede clasificar el estudio en: compresión en sentido longitudinal a las fibras, compresión en sentido transversal a las fibras y compresión en sentido oblicuo a las fibras (Coronel, 1996).

La compresión paralela al grano, se da cuando las fuerzas actúan de forma paralela a la dirección de las fibras y los sentidos de las mismas van dirigidos hacia el cuerpo afectado (Coronel, 1996).

Esas fuerzas provocan que las caras transversales se aproximen en la dirección de carga, originando una deformación de acortamiento en la altura (disminuye la longitud de las fibras) y ensanchamiento de la sección transversal. Luego se produce la rotura de la pieza con formación de grietas y rajaduras en la dirección de carga (Coronel, 1996).

Cuando se produce la rotura en el ensayo de compresión, las deformaciones se pueden manifestar de diversas formas. En el caso de maderas duras se presentan imprevistamente y sobreviene la rotura en forma de astillas (Coronel, 1996).

Este ensayo es útil cuando se quiere obtener el valor de resistencia de una madera que se quiere utilizar, por ejemplo, como apoyo de construcción (Ej.: pilares) (Tuset y Durán, 2008).

En Bootle (1983), se encuentra un valor de referencia para la especie en estudio de 73 MPa y de 50 MPa para un CH de 12% y verde, respectivamente.

La siguiente clasificación, divide la madera en 8 categorías teniendo en cuenta los valores mínimos de resistencia a la compresión (Bootle, 1983).

Cuadro 4. Valores mínimos de resistencia a la compresión paralela para madera al 12% de humedad								
Propiedad	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8
Compresión (MPa)	80	70	61	54	47	41	36	30



### 2.5.5. Dureza Janka

La propiedad mecánica dureza está definida por la resistencia que ofrece la madera a la penetración de un cuerpo más duro, mientras se presiona lentamente. La magnitud de la deformación indica el índice de dureza de la muestra (Coronel, 1996). Es un valor relativo, debido a que la madera presentará un valor de dureza según el material con el que se le aplique la fuerza (Kollmann y Coté, 1984).

La determinación de la dureza se realiza en las caras transversal, radial y tangencial.

Según Coronel (1996) es importante el estudio de la dureza en maderas tanto en construcción, así como para la utilización en tableros y pisos, y para determinar las herramientas que son necesarias para trabajar la madera.

Para la comparación entre distintas maderas, en general se utiliza el valor obtenido en ensayos realizados aplicando la carga en dirección paralela a las fibras (Coronel, 1996).

García y García, citados por Coronel (1996) clasifican a las maderas argentinas según la siguiente escala:

Maderas muy blandas	<300 kg/cm <sup>2</sup>
Maderas blandas	301 a 500 kg/cm <sup>2</sup>
Maderas semiduras	501 a 700 kg/cm <sup>2</sup>
Maderas duras	701 a 1000 kg/cm <sup>2</sup>
Maderas muy duras	>1000 kg/cm <sup>2</sup>

Según un trabajo de Pallay, citado en Kollmann y Coté (1984) las variaciones de dureza en una porción de madera son similares a las de la madera de toda la especie.

Uno de los factores que influye en la dureza de la madera según Coronel (1996), además de la densidad aparente y el contenido de humedad, es la dirección de las fibras. El valor de dureza es mayor en sentido longitudinal (transversal) que en el radial y tangencial. Entre estos dos últimos la dureza es mayor en sentido radial, debido a la resistencia que ofrecen los anillos de crecimiento. Según Bootle (1983), para maderas duras la diferencia entre la dureza en el sentido transversal y el perpendicular a las fibras (radial y tangencial) es menor que en maderas blandas.

Se encontró un único valor de dureza Janka para el promedio entre el valor radial y el tangencial de 13 kN y de 10 kN para madera al 12% de CH y verde respectivamente (Bootle, 1983).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRBOLES

Los árboles evaluados pertenecían a una cortina monoespecífica plantada en 1969, a partir de semilla de un ensayo de introducción de especies instalado en 1959 con semilla originaria del sur del estado de Nueva Gales del Sur en Australia. La cortina se ubicaba detrás del dique de una represa de la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurt (Bañados de Medina, Cerro Largo). Fueron cortados en febrero de 2011.



Fig. 7. Imagen satelital de Google Earth con ubicación de la cortina (32°20'51.12''S; 54°26'58.16''O, elevación 155 m.)

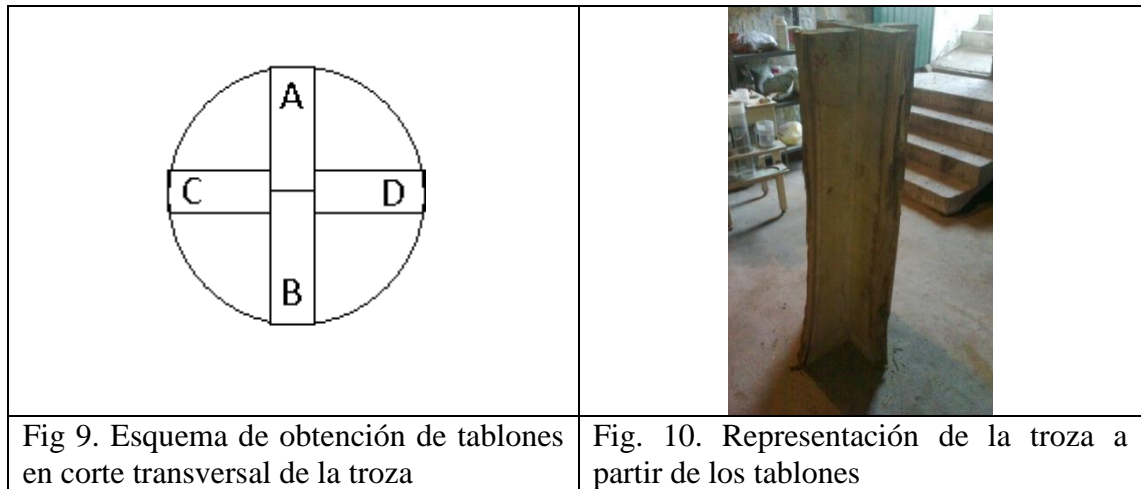


Fig. 8. Foto del lugar donde se encontraba la cortina de árboles

Para la caracterización a realizar se eligieron aquellos árboles que tuvieran mayor diámetro y mejor forma (rectitud del fuste, menor número de ramas bajas), con el objetivo de obtener trozas de donde se pudiera obtener mayor cantidad de madera para el ensayo.

#### 3.2. OBTENCIÓN DE LA MADERA A ENSAYAR

La madera utilizada para los ensayos se obtuvo de 11 árboles. Por cada árbol se obtuvieron 4 tabloncillos de una troza mayor a un metro de largo que incluyera por lo menos 0.50 m a cada lado del diámetro al 1.30 m (DAP), con un espesor de 0.075 m (ver Figura 9).



Para caracterizar el tamaño de los árboles a evaluar, se presenta, a modo de aproximación, las medidas del diámetro menor de los tablones A y B, de cada árbol, antes de ser divididos:

No. Tablón	1AB	2AB	3AB	4AB	5AB	6AB	7AB	8AB	9AB	10AB	11AB	Media
Diámetro menor (cm)	46.2	42.6	37.8	35.8	35.1	27.6	43.0	34.0	42.9	42.5	40.7	38.9

A partir de los tablones se confeccionaron las pre-probetas para cada uno de los ensayos.

### 3.3. PREPARACIÓN DE PRE-PROBETAS

La preparación de las probetas y la realización de los ensayos fueron llevadas a cabo en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

Para obtener las pre-probetas se utilizó la siguiente metodología. En cada tablón, se marcaban las posibles pre-probetas que se podían obtener, optimizando el uso el mismo. Para esto se tuvo en cuenta diferentes factores como: ancho del tablón, rajaduras, grietas, daño por insectos y posición de la médula. En cuanto a este último, se obtuvo pre-probetas de tres posiciones: cerca de la médula, cerca de la corteza y una posición intermedia. Para los ensayos de dureza Janka y compresión paralela al grano, debido al mayor tamaño de probetas y al material disponible, no se realizó el estudio según posición.

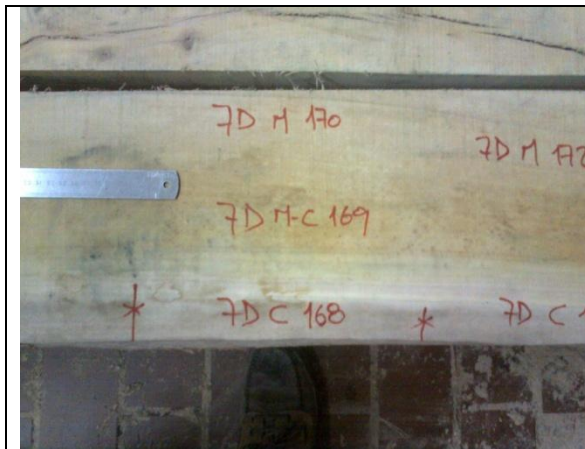


Fig. 11. Marcación de las pre-probetas sobre un tablón



Fig. 12. Tipos de pre-probetas obtenidas

En la figura 12 se muestran los dos tipos de pre-probetas obtenidas. A partir de las mismas se obtuvieron las probetas definitivas para los distintos ensayos; del tipo 1 se sacaron las probetas para los ensayos de flexión, contracción y densidad aparente, y del tipo 2, las probetas de compresión y dureza. Al armar el diseño y aserrar las pre-probetas, se dio prioridad a las de tipo 1, frente a la posibilidad de sacar un solo tipo.

Las pre-probetas de tipo 1 se cortaron a su vez en pre-probetas de flexión y contracción. Las primeras se colocaron en cámara de climatización en condiciones de humedad de equilibrio de 12%, al igual que las pre-probetas de tipo 2. Por otro lado las pre-probetas de contracción se sumergieron en agua para ser saturadas.

### 3.4. ANÁLISIS DE DATOS

Se realiza una descripción estadística de los datos, presentando valores medios, desvío estándar y coeficientes de variación; además se calcularon los intervalos de confianza para las medias generales de las cinco propiedades en estudio.

La precisión de los valores presentados se calcula como la semi-amplitud del intervalo de confianza expresado como porcentaje de la media.

### **3.5. ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE**

Para realizar los ensayos de densidad aparente básica y corriente se siguió el procedimiento determinado en la norma UNIT 237:2008 (UNIT, 2008b).

#### **3.5.1. Densidad aparente básica**

Las probetas utilizadas en este ensayo fueron las mismas de contracción longitudinal, ya que cumplían con las dimensiones definidas en la norma.

La metodología consistió en determinar el volumen en verde de la probeta por el método directo. Para esto se midió con calibre digital el ancho y espesor de la probeta y la dimensión longitudinal se determina con micrómetro ya que es la utilizada para el ensayo de contracción.

Para los cálculos se utilizó la fórmula siguiente:

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_v}$$

Donde:  $\rho_b$  es la densidad aparente básica ( $\text{g/cm}^3$ ),  $m_0$  es la masa en gramos de la probeta en condición anhidra y  $V_v$  es el volumen en  $\text{cm}^3$  de la probeta en estado verde determinado por medición directa.

Para las determinaciones se utilizaron los siguientes instrumentos y equipos:

- Calibre digital Mitutoyo.
- Micrómetro digital SONY DZ-501; apreciación 0.0005 mm.
- Estufa de circulación forzada Yamato DK 600
- Balanza Mettler Toledo PG-503-S (apreciación: 0.001gr).



Fig. 13. Medición de probetas con calibre



Fig. 14. Pesada de probetas anhidras

### **3.5.2. Densidad aparente corriente**

Para poder obtener una aproximación al valor de densidad aparente al 12% se realizaron cálculos utilizando resultados de las probetas de densidad y contenido de humedad del ensayo de flexión, además del coeficiente de contracción volumétrica (CCV) hallado en este trabajo.

La densidad corriente se calculó como el cociente entre el peso de la madera anhidra y el volumen al 12% de humedad. El primero se obtuvo directamente de los valores obtenidos por pesada directa de las probetas. Por otro lado, se corrige el volumen de las probetas mediante el CCV.

### **3.6. ENSAYO DE CONTRACCIÓN**

Para la determinación de la contracción radial, tangencial y longitudinal se siguieron los procedimientos definidos en la norma UNIT 363:2008 (UNIT, 2008c).

Las pre-probetas se sumergieron en agua durante 5 semanas (19/8 hasta 21/9) para saturarlas ya que la madera no estaba totalmente verde. Una vez saturadas se cortaron las probetas definitivas, obteniéndose 3 y 2 réplicas para las probetas tangenciales-radiales y longitudinales respectivamente. Estas no son verdaderas réplicas dada la heterogeneidad de la madera; lo que se intentó con esto es tener mayor cantidad de medidas en caso de pérdidas de probetas por colapso, grietas, rajaduras, otros.



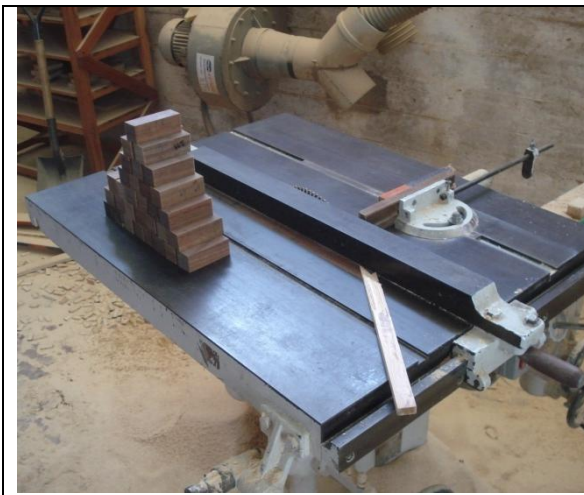


Fig. 15 Pre-probetas de contracción y sierra circular donde se confeccionaron las probetas definitivas



Fig. 16. Probetas de contracción en estufa Yamato DK 610

La metodología consistió en la medida de las dimensiones lineales de las probetas, en las distintas direcciones, a diferentes contenidos de humedad. Se midió en estado verde, anhidro y en tres condiciones intermedias entre los estados mencionados. Se realizaron dos medidas intermedias más que las indicadas en la norma, a modo de tener una mejor estimación del punto de saturación de las fibras. Para cada condición se registró el peso de las probetas con el fin de obtener los contenidos de humedad de las mismas.

Los contenidos de humedad promedio para las cinco medidas realizadas se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 5. Valores medios de contenido de humedad (CH) de las probetas de contracción en cada medida realizada		
Medida	CH (%) Radial – Tangencial	CH (%) Longitudinal
1	57	51
2	38	39
3	27	30
4	13	13
5	Anhidro	Anhidro

En el proceso de disminución de contenido de humedad se utilizó una estufa apagada. Las probetas se colocaron como muestra la Fig. 16 durante el secado hasta la segunda medida, la estufa permaneció cerrada y sin ventilación por 11 días. Lo mismo ocurrió para la tercera medida, durante 9 días. Posteriormente, en la etapa de secado hasta la cuarta medida, se le agregó ventilación y la puerta de la estufa se mantuvo

abierta durante 4 hs por día. Para llevar las probetas a estado anhidro, primero se abrió la puerta de forma permanente durante 7 días; luego se prendió la estufa con la puerta cerrada y se subió la temperatura gradualmente hasta llegar a 103°C. Este último proceso consistió en ir aumentando la temperatura en la estufa 10 °C por día, comenzado desde 35 °C; luego de llegar a 103 °C se las deja a esas condiciones durante 2 días más.

A pesar de que este proceso fue lento y precavido, debido al desconocimiento del comportamiento de secado de la madera de la especie, se obtuvieron muy buenos resultados, perdiéndose apenas algunas probetas con defectos (Ej.: colapso, grietas, rajaduras).

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

- Sierra circular para el dimensionamiento y confección de las probetas.
- Estufa Yamato DK 610 y estufa Yamato DK 600
- Balanza Mettler Toledo PG-503-S (apreciación: 0.001gr)
- Micrómetro digital SONY DZ-501; apreciación 0.0005 mm.



Fig. 17. Micrómetro digital

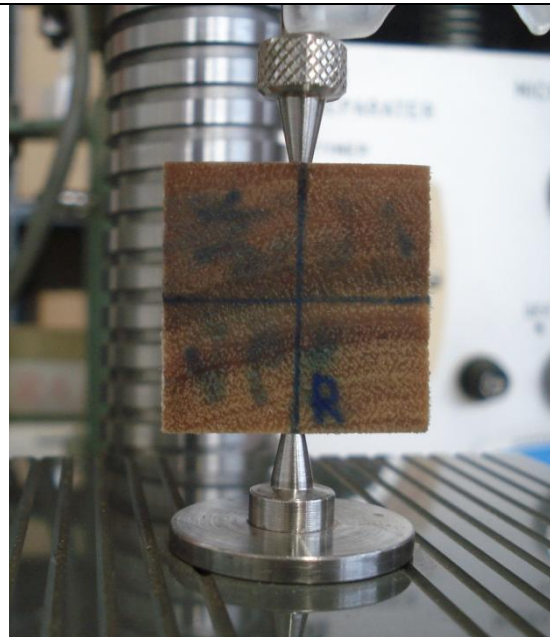


Fig. 18. Medición de probeta de contracción

Para el cálculo de las contracciones lineales se utilizó la fórmula matemática citada en UNIT (2008c):

$$C_n = \frac{d_{vn} - d_{shn}}{d_{vn}} \times 100, \text{ siendo:}$$



$C_n$ : contracción del estado verde al estado anhidro, en porcentaje, para cada uno de los sentidos;

$n$ : cada uno de los sentidos: tangencial, radial y longitudinal.

$d_{vn}$ : dimensión de la probeta en estado verde

$d_{shn}$ : dimensión de la probeta anhidra.

Para el cálculo de la contracción en los diferentes contenidos de humedad se utiliza la misma fórmula sustituyendo  $d_{shn}$  por las dimensiones de la probeta en ese CH.

Para el cálculo de la contracción volumétrica se utilizó la fórmula distinta a la citada en UNIT (2008c), planteada por Kollmann y Coté (1984), Pezo (2007).

$$C_{vol} = [1 - (1 - C_{tg}) * (1 - C_{rad}) * (1 - C_{long})]$$

En los resultados se presentan los valores de contracción volumétrica omitiendo el término referente a la contracción longitudinal, ya que ésta se puede considerar despreciable como menciona Kollmann y Coté (1984).

### **3.7. ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA**

Para este ensayo se siguieron los procedimientos marcados en la norma UNIT 1137:2007 (UNIT, 2007).

La norma establece el método de ensayo destructivo para determinar los módulos de elasticidad (MOE) y rotura (MOR) utilizando pequeñas probetas libres de defectos y con un contenido de humedad de 12%. Las dimensiones de las probetas utilizadas fue de 25 mm × 25 mm × 400 mm.

Las pre-probetas de flexión estuvieron 8 semanas en la cámara de climatización Nihon, con una temperatura de 20° C y una humedad relativa del 65%, de modo que la humedad de equilibrio fuera 12%. Se fue controlando la humedad de las probetas, utilizando alguna de ellas como testigo y pesándolas cada una semana. Para estimar la humedad se consideró el peso y la humedad de las piezas testigo al entrar en la cámara.

Cuando la humedad promedio de las pre-probetas testigo era 23%, se cambiaron para la cámara de climatización OKUNO, con una humedad relativa de 65% y a 20°C, de modo que el contenido de humedad de equilibrio (CHE) fuera de 12%. Permanecieron allí durante 13 semanas.

Una vez que las pre-probetas alcanzaron la humedad estimada de 12.88%, se cortaron llevándolas a las dimensiones finales y se colocaron, nuevamente, en cámara de climatización durante una semana, hasta ser ensayadas.

Las condiciones del ensayo fueron las siguientes:

- Ensayo de 3 puntos: dos de apoyo y un punto central de aplicación de carga.
- Aplicación de carga en dirección tangencial a los anillos de crecimiento en la cara más próxima a la médula.
- Velocidad de ensayo constante de 5.0 mm/min.
- Celda de carga de 50 kN.
- Distancia entre apoyos de 350 mm (span).
- Se utilizó un extensómetro digital colocado en la travesa para medir su desplazamiento y considerar ese valor como la deformación de la probeta y poder estimar el MOE.



Fig. 19. Ensayo de flexión



Fig. 20. Celda de carga, extensómetro sobre travesa

Se cálculo el MOE y MOR con las siguientes fórmulas citadas en UNIT (2007).

$$MOE = \frac{\Delta p L^3}{4\Delta d b h^3}$$

$$MOR = \frac{3P_m L}{2bh^2}$$

MOE, módulo de elasticidad en  $N/mm^2$

$\Delta p$  = diferencia entre dos puntos cualquiera, P1 y P2, de la recta de la zona elástica, en N

$\Delta d$  = diferencia entre las flechas o deformación correspondiente a las cargas elegidas, d1 y d2, expresado en mm.

MOR, esfuerzo unitario máximo en  $N/mm^2$

$P_m$  = carga máxima obtenida, en N.

$L$  = separación entre apoyos, en mm.

$b$  = ancho de la probeta, en mm.

$h$  = altura de la probeta, en mm.

Para el cálculo del contenido de humedad y densidad de las probetas ensayadas, se cortaron probetas más chicas de las mismas, según el procedimiento que indica la norma.

Materiales utilizados:

- Máquina Universal Minebea NMB TG-50kN, con celda de carga de 50kN, y una apreciación de 0.01.
- Cámara de climatización OKUNO.
- Cámara de climatización NIHON.
- Extensómetro o deflectómetro digital MITUTOYO de 50 mm de capacidad.

### **3.8. ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA AL GRANO**

Este ensayo se realiza siguiendo las determinaciones dadas por la norma ASTM D143-09 Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber (ASTM, 2009). Las dimensiones de la probetas utilizadas fue de 50 mm × 50 mm × 200 mm.

Las pre-probetas obtenidas para realizar este ensayo, estuvieron en cámara de climatización desde el 19 de agosto de 2011 hasta la primera semana de febrero de 2012 (24 semanas). Con 15 % de contenido de humedad (CH) se decide llevarlas a las dimensiones finales. Se toma la decisión de realizar este ensayo con un CH superior al 12%, debido a que el tiempo, que insume llevar las probetas a este estado, escapa los límites de la tesis.

Debido a los defectos ocasionados en el secado de las probetas, algunas de ellas fueron descartadas.

Las probetas definitivas son colocadas nuevamente en cámara de climatización con condiciones de 20 grados y 65 % de humedad relativa, durante cuatro semanas hasta ser ensayadas con una humedad aproximada de 15%.

Las condiciones del ensayo fueron las siguientes:

- Velocidad de aplicación de carga: 1 mm/min.
- Carga limitada a 200 kN, por seguridad.

Los instrumentos utilizados en el ensayo son los siguientes:

- Cámara de climatización OKUNO.
- Cámara de climatización NIHON

- Máquina Universal Minebea NMB AL-250kNB, con una celda de carga de 250 kN de capacidad.

La descripción de las fallas en la compresión se realiza según lo detallado en la norma norteamericana.



Fig. 21. Máquina Universal Minebea (NMB AL-250kNB)



Fig. 22. Ensayo de compresión: probeta y celda de carga

Luego de realizado el ensayo se obtiene un prisma para la determinación del contenido de humedad y la densidad aparente de cada probeta.

### 3.9. ENSAYO DE DUREZA JANKA

Este ensayo se realiza bajo las determinaciones de la norma UNIT 364:2008 Determinación de la dureza Janka en Maderas.

La preparación de las probetas se realiza en el mismo tiempo que para las del ensayo de compresión.

Algunas pre-probetas fueron descartadas por defectos consecuencia de la disminución de humedad en la cámara de climatización, además de las probetas en las que se encontraron defectos antes de realizar el ensayo.

Condiciones del ensayo:

- Velocidad de aplicación de carga: 6 mm/min.

Los instrumentos utilizados en este ensayo son los siguientes:

- Cámara de climatización OKUNO.

- Cámara de climatización NIHON.
- Máquina Universal Minebea NMB TG-50kN, con celda de carga de 50kN, y una apreciación de 0.01.
- Accesorio de ensayo, con cabezal consistente en una semiesfera metálica de diámetro igual a  $11.3 \pm 0.1$  mm.



Fig. 23. Máquina Universal Minebea. Ensayo de dureza en sentido paralelo al grano



Fig. 24. Ensayo de dureza en sentido perpendicular al grano. Vista del accesorio

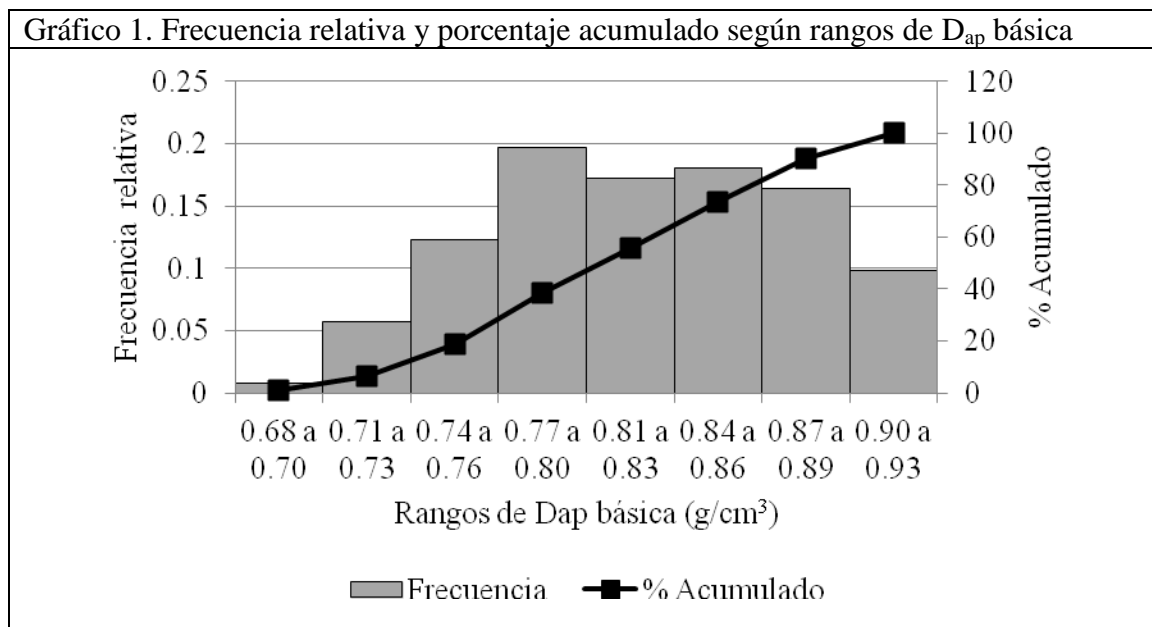
Luego de realizado el ensayo se obtiene un prisma para la determinación del contenido de humedad y la densidad aparente corriente de cada probeta.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. DENSIDAD APARENTE BÁSICA

Cuadro 6. Media y descriptores para Densidad Aparente Básica ( $D_{ap}$ )						
Media ( $\text{g/cm}^3$ )	n*	Desvío	CV (%)	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
0.82	122	0.0565	6.86	0.81	0.83	1.22
*Número de probetas.						

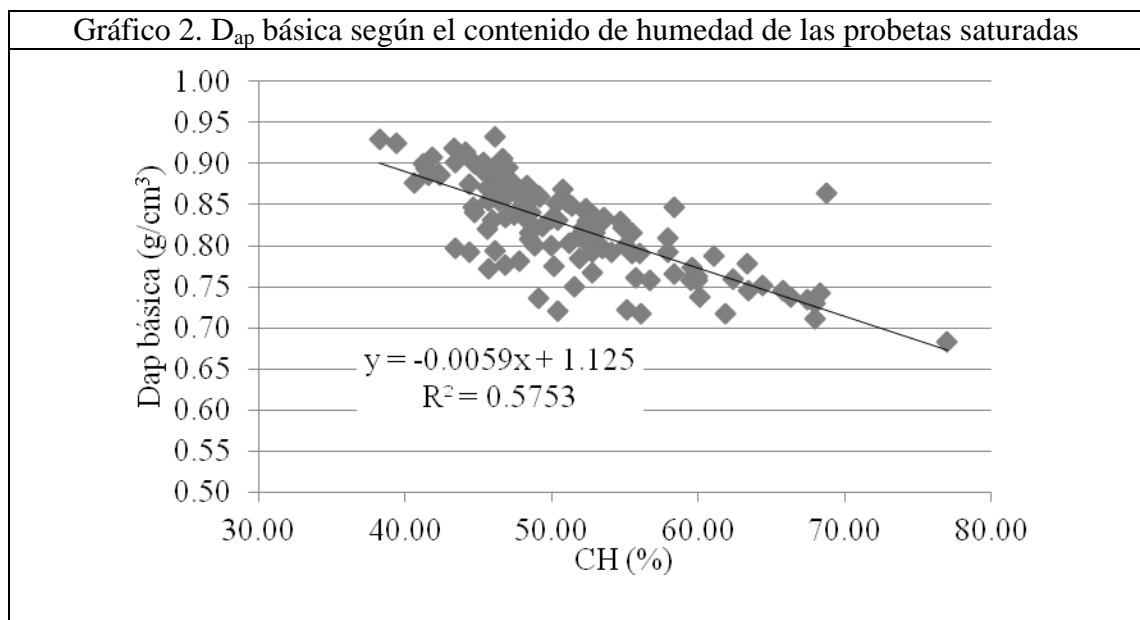
La media de la densidad aparente básica es de  $0.82 \text{ g/cm}^3$ , con un intervalo de  $\pm 0.010 \text{ g/cm}^3$ , con un 95% de confianza. Este valor es cercano al citado por Dadswell (1972); aunque difiere de Duarte et al. (2002), que menciona un valor de  $0.68 \text{ g/cm}^3$ . Esta diferencia podría deberse a que en el trabajo de Brasil los árboles muestreados son más jóvenes, por lo que la densidad sería menor.



En el histograma se puede observar que el rango de  $D_{ap}$  básica varía de  $0.68$  a  $0.93 \text{ g/cm}^3$ , estando el 71% de los valores comprendidos entre  $0.77$  a  $0.89 \text{ g/cm}^3$ ; y menos de un 7% de las probetas estudiadas tienen una densidad básica por debajo de  $0.73 \text{ g/cm}^3$ .

Cuadro 7. Valores medios de $D_{ap}$ básica por árbol ( $g/cm^3$ )			
Árbol	Media	Desvío	CV (%)
1	0.80	0.0591	7.4
2	0.86	0.0494	5.8
3	0.84	0.0695	8.3
4	0.82	0.0354	4.3
5	0.79	0.0339	4.3
6	0.81	0.0601	7.4
7	0.86	0.0390	4.5
8	0.86	0.0531	6.2
9	0.77	0.0457	5.9
10	0.80	0.0542	6.8
11	0.83	0.0336	4.0
Media	0.82		
Desvío	0.0309		
CV (%)	3.75		

En el cuadro se presentan los valores medios de densidad junto con el desvío y coeficiente de variación para cada uno de los árboles. Los valores de los 11 árboles presentan un desvío de 0.0309 y un coeficiente de variación de 3.75%. Esto demuestra que la variación dentro de cada árbol es mayor que la observada entre árboles. Además los árboles 2, 7 y 8 son los que presentan mayor densidad con un valor de  $0.86 g/cm^3$ .



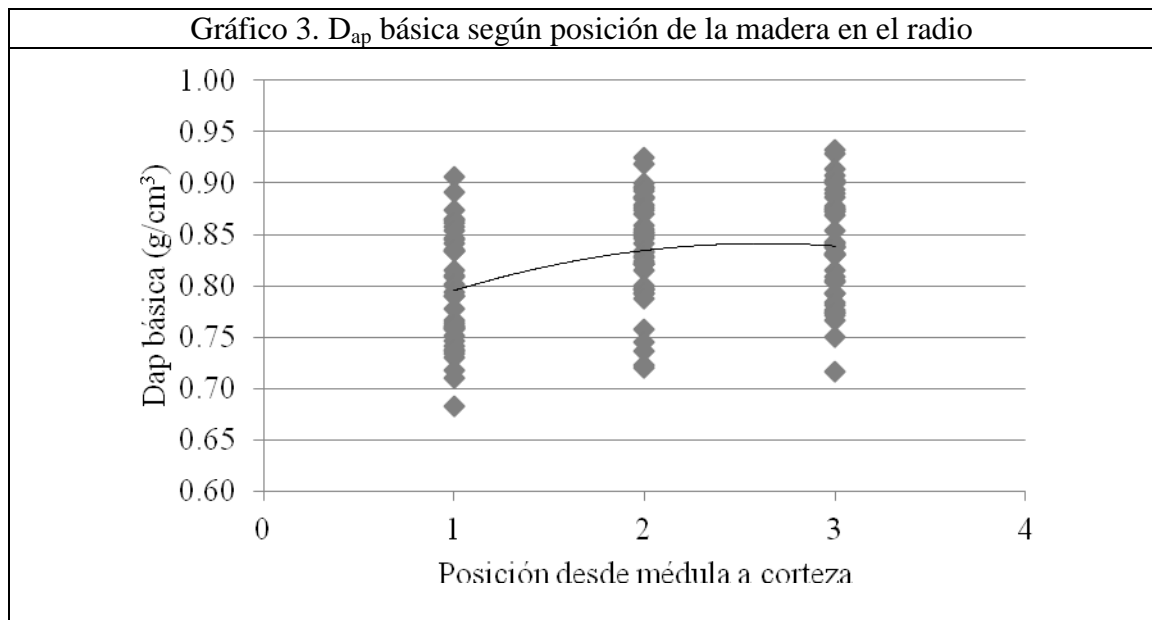
El estudio de  $D_{ap}$  básica arrojó que existe una correlación negativa entre el contenido de humedad de las probetas de contracción, con un  $R^2 = 0.58$ . Por lo que a menor contenido de humedad en estado saturado, mayor es la densidad básica.

#### 4.1.1. $D_{ap}$ básica según posición de la madera en el radio

Posición	Media	Desvío	CV (%)
1	0.80	0.0558	7.02
2	0.83	0.0519	6.22
3	0.84	0.0560	6.67

Los resultados obtenidos muestran que la madera cercana a la corteza fue la que presentó el valor mayor de densidad básica promedio; mientras que los menores valores se registran en la madera cercana a la médula. A su vez la variación para las tres posiciones es similar.

En el gráfico 3 se muestra la distribución de los valores de densidad básica de todas las probetas según la posición en el radio, en donde no se observa una clara tendencia de variación entre las tres posiciones. Una de las causas de esto podría ser que se trabajó con madera de árboles adultos (> 40 años).





#### 4.2. DENSIDAD APARENTE CORRIENTE

Media	n	Desvío	CV (%)	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
0.94	124	0.0661	7.04	0.93	0.95	1.24

En el cuadro 9 se presenta el valor medio de densidad al 12% de contenido de humedad junto con descriptores de variabilidad, un intervalo con 95% de confianza y la precisión. Los valores extremos obtenidos son de 1.06 g/cm<sup>3</sup> y 0.77 g/cm<sup>3</sup>, superior e inferior respectivamente.

El intervalo de confianza hallado está incluido en el rango de densidad corriente citado por Brink (2008). Además se puede mencionar que el valor máximo que se obtuvo queda dentro de todos los rangos de densidad corriente citados en la revisión.

Árbol	Media	n	Desvío	CV (%)
1	0.91	12	0.0666	7.33
2	0.99	12	0.0464	4.69
3	0.99	12	0.0604	6.10
4	0.95	10	0.0494	5.22
5	0.89	11	0.0374	4.18
6	0.94	10	0.0558	5.96
7	0.98	12	0.0374	3.83
8	0.99	11	0.0577	5.84
9	0.86	12	0.0550	6.39
10	0.91	11	0.0532	5.87
11	0.94	11	0.0239	2.55
Media	0.94			
Desvío	0.0439			
CV (%)	4.67			

En el cuadro anterior se observa la variación de densidad entre y dentro de los árboles. Se puede decir que la variación dentro de los árboles, en general es mayor que entre árboles. Los árboles 2, 3 y 8 son los que presentan un mayor valor de densidad corriente, mientras que el árbol 9 es el que tiene el menor valor.

Posición	Media	Desvío	CV (%)
1	0.92	0.0584	6.34
2	0.97	0.0572	5.92
3	0.93	0.0740	7.99

En cuanto a la variación de la densidad corriente respecto a la posición en el radio, podemos mencionar que valor medio máximo se observa en la posición intermedia, siendo los valores similares en las posiciones 1 y 3.

### 4.3. CONTRACCIÓN

Contracción	n*	Media	Desvío	CV%	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
Radial (%)	118	6.45	0.64	9.93	6.33	6.56	1.79
Tangencial (%)	118	12.02	1.01	8.43	11.84	12.20	1.52
Longitudinal (%)	120	0.17	0.10	54.75	0.16	0.19	9.80
Volumétrica (%)	118	17.69	1.24	7.03	17.47	17.92	1.27

No.\* = número de probetas. Li = Límite inferior y Ls = límite superior, con 95% de confianza.

Para el cálculo de todas las contracciones se tomo como valor de cada probeta el promedio de las réplicas no verdaderas que se utilizaron en el procedimiento del ensayo.

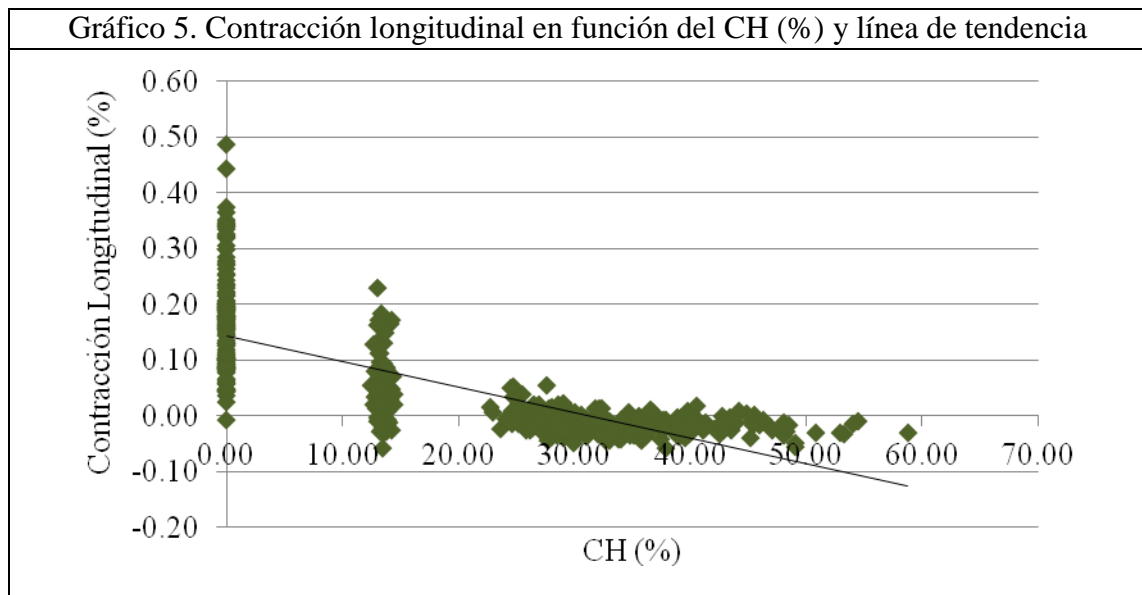
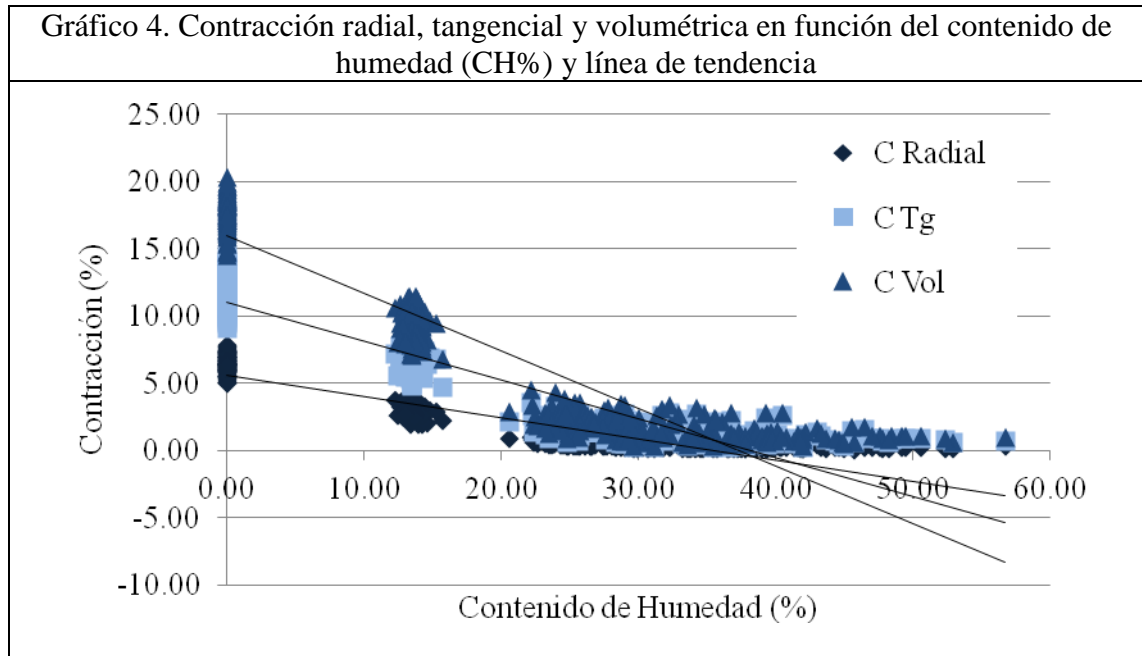
A través del cuadro se ve que la contracción tangencial es la mayor de las lineales, siendo casi el doble que la contracción radial. La contracción longitudinal se considera despreciable para el cálculo de la contracción volumétrica ya que su valor relativo es muy bajo.

Según la clasificación de Tuset y Durán (2008), la madera de *E. bosistoana* se cataloga de contracción fuerte o gran contracción, ya que la media de contracción volumétrica hallada se ubica en el rango de 15 a 20%.

Árbol	Contracción			
	Radial	Tangencial	Longitudinal	Volumétrica
1	6.86	12.31	0.16	18.33
2	6.65	12.24	0.12	18.07
3	6.57	12.62	0.13	18.36
4	7.05	12.47	0.15	18.64
5	6.34	11.92	0.21	17.50
6	6.70	12.05	0.22	17.94
7	6.28	12.84	0.12	18.31
8	5.64	12.16	0.25	17.11
9	6.65	11.51	0.23	17.39
10	6.12	11.03	0.17	16.48
11	6.22	11.26	0.14	16.79
Media	6.46	12.04	0.17	17.72
Desvío	0.393	0.566	0.046	0.714
CV (%)	6.08	4.70	26.21	4.03

De los resultados del cuadro se desprende que la variación entre árboles es baja, salvo para el caso de contracción longitudinal. El árbol 4 es el que posee la mayor contracción volumétrica (18.64%) y el árbol 10 es el que tiene la menor (16.48%). La mitad de los árboles tiene una contracción volumétrica entre 18 y 19%.

#### 4.3.1. Contracción según contenido de humedad. Punto de saturación de la fibra (PSE)



Cuadro 14. Rectas teóricas de contracción ( $\beta$ ), PSF y Coeficiente de contracción				
Contracción	% Contracción = $a \times \% \text{humedad} + b$	$R^2$	PSF (%)	Coef. de contracción (% $\beta$ / % CH)
Radial	$y = -0.159x + 5.614$	0.85	35.3	0.159
Tangencial	$y = -0.288x + 10.98$	0.88	38.1	0.288
Longitudinal	$y = -0.004x + 0.142$	0.56	35.5	0.004
Volumétrica	$y = -0.428x + 15.98$	0.88	37.3	0.428

En general, se puede decir que a medida que disminuye el contenido de humedad (CH), aumenta proporcionalmente la contracción. Estas rectas permiten calcular la contracción de una madera del estado verde hasta cualquier contenido de humedad.

El PSF teórico se ubica entre 35 y 38% de humedad, dependiendo de la dimensión considerada. Esto quiere decir que cuando el contenido de humedad de la madera comienza a estar por debajo de esos valores se producen variaciones en las dimensiones de la misma.

Teniendo en cuenta la clasificación de la madera según el coeficiente de contracción volumétrica, Villière, citado por Tuset y Duran (2008), cataloga la madera de *E. bosistoana* como “Medianamente nerviosa”, ya que el valor obtenido (0.43) se encuentra en el rango de 0.35 a 0.55. Este coeficiente indica que por cada 1% que disminuye el CH de la madera, esta se contrae 0.43%. El mismo es similar al que presenta el Forest and Wood Products Australia (FWPA, 2012).

Utilizando las funciones de las rectas teóricas se estimaron los valores de contracción al 12% de humedad, siendo de 3.71 y 7.52% la contracción radial y tangencial respectivamente. Estos son similares a los encontrados por Boas (1947), Bootle (1983).

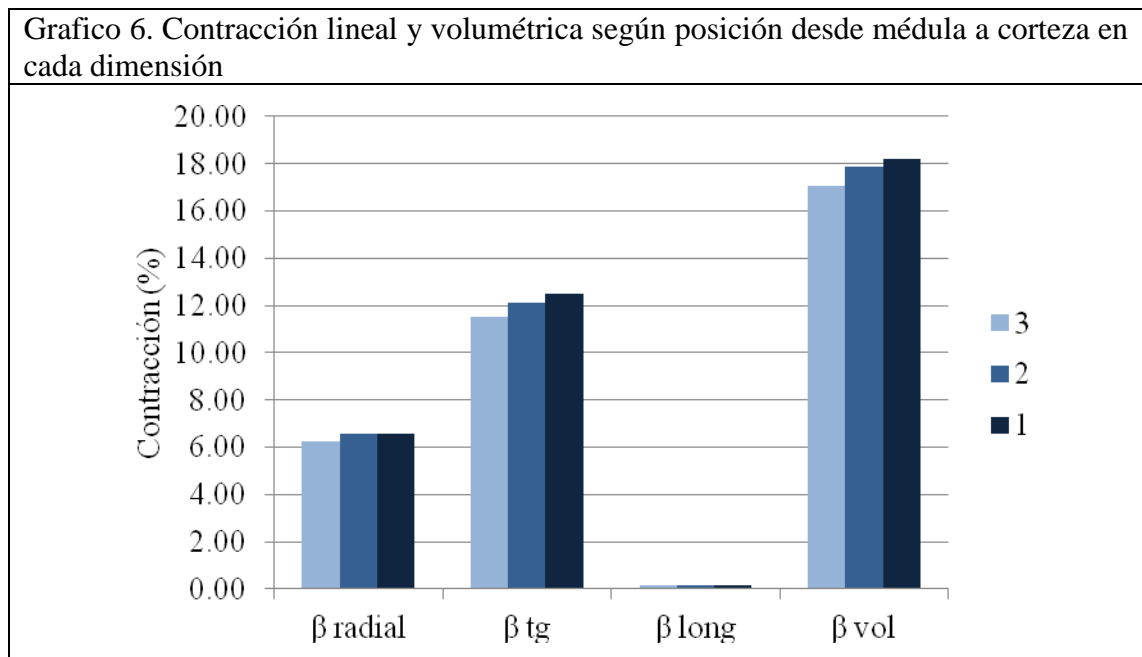
#### 4.3.2. Relación entre contracción radial y tangencial

Cuadro 15: Contracción radial, tangencial y coeficiente de anisotropía según posición desde médula a corteza				
	1	2	3	Total
$\beta$ longitudinal	0.18	0.16	0.18	0.17
$\beta$ tangencial	12.48	12.12	11.52	12.02
$\beta$ radial	6.56	6.54	6.25	6.45
$\beta$ tang/ $\beta$ rad	1.90	1.85	1.84	1.86

El coeficiente de anisotropía total es de 1.86, este valor caracteriza a la madera de *E. bosistoana* como apta para secado o normal según la clasificación de Coronel (1994), mencionada más arriba.

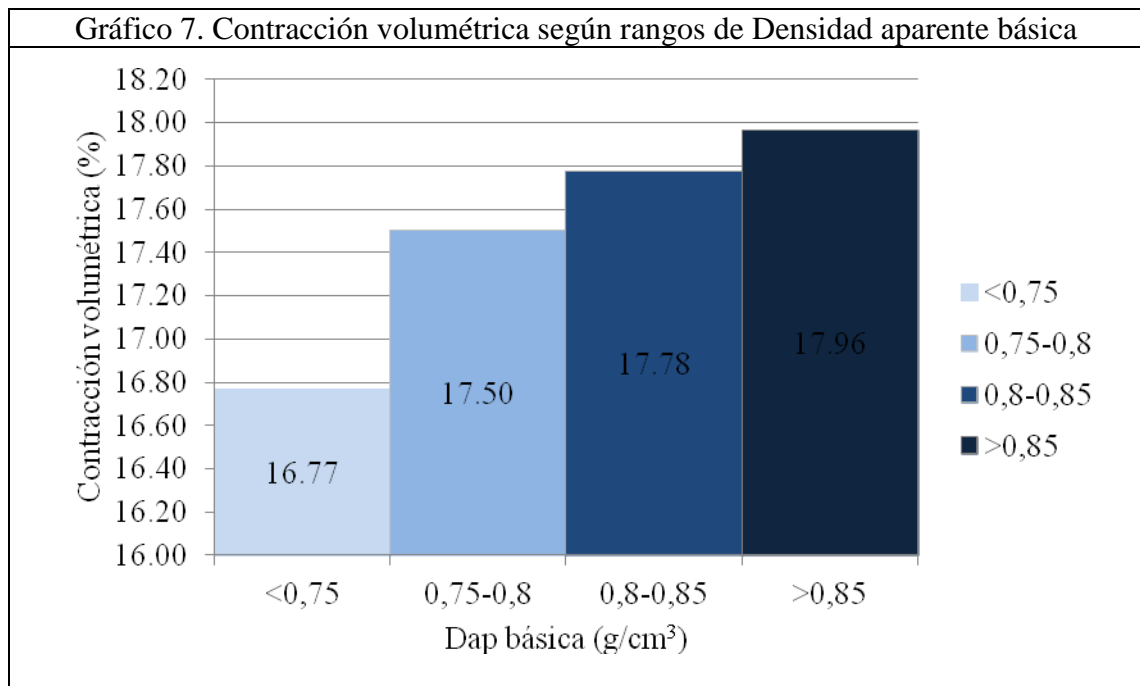
Se destaca que toda la madera tiene un coeficiente de contracción en el mismo rango de clasificación, en este sentido se podría decir que los usos de la madera son similares a lo largo del radio.

#### 4.3.3. Contracción volumétrica según posición desde médula a corteza (1, 2 y 3)



En el gráfico se observa que los valores de contracción en la posición más cercana a la médula (1) son mayores, aunque la diferencia con las otras posiciones no es marcada.

#### 4.3.4. Contracción volumétrica según densidad aparente básica



El gráfico muestra los valores de las medias de contracción volumétrica, del estado verde a anhidro, para cada rango de  $D_{ap}$  básica. Se observa que cuanto mayor es esta, mayores son las variaciones en las dimensiones de las probetas.

#### 4.4. FLEXIÓN ESTÁTICA

El contenido de humedad de las probetas ensayadas fue en promedio de 14.5%. Los resultados se analizan con este contenido de humedad, aunque también se mencionan valores medios de módulo de elasticidad (MOE) y módulo de rotura (MOR) corregidos al 12 %.

Se observó, en la mayoría de los casos, que la deformación ocurre primero por fuerzas de compresión y luego la ruptura es por fuerzas de tracción.

En el siguiente cuadro se presentan los valores de MOE y MOR obtenidos en el ensayo de flexión estática sobre pequeñas probetas libres de defectos y con un contenido de humedad (CH) promedio de 14.5%.

Cuadro 16. Descriptores de MOE y MOR del ensayo de flexión estática con un CH promedio de 14.5%							
Propiedad	Media	n*	Desvío	CV	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
MOE (MPa)	18738	97	2156	11.50	18309	19167	2.29
MOR (MPa)	146.2	97	13.1	8.97	143.6	148.8	1.79
Li = límite inferior y Ls = límite superior, con 95% de confianza. *No. = número de probetas.							

Los coeficientes de variación para estas propiedades son menor es a 16%, valor de referencia que presenta Coronel (1996), para valores de resistencia en latifoliadas.

El rango de valores para MOE es de 12792 a 23374 MPa, y de 109.1 a 172.3 MPa para los valores de MOR.

#### 4.4.1. Variación de MOE y MOR entre y dentro de árboles

Cuadro 17. Variación de valores de MOE entre y dentro de árboles (MPa)				
Árbol	Media	n	Desvío	CV %
2	20143	11	1299.1	6.45
5	19934	10	1962.0	9.84
3	19308	12	1986.3	10.29
1	19117	10	2293.9	12.00
6	18631	9	2572.0	13.80
7	18512	8	1829.2	9.88
4	18412	6	1217.6	6.61
8	18172	10	1588.2	8.74
9	17754	8	3228.3	18.18
11	17714	10	1600.2	9.03
10	15551	3	1858.7	11.95
Media	18477.15			
Desvío	1256.49			
CV(%)	6.80			

En el cuadro 17 se observa que la variación dentro de árboles es en la mayoría de los casos mayor a la variación que existe entre los 11 árboles evaluados. El árbol 2 es el que presenta mayor valor de MOE, aunque los árboles 5, 3 y 1 tienen valores cercanos al mismo. El menor valor de MOE se encuentra en el árbol 10.

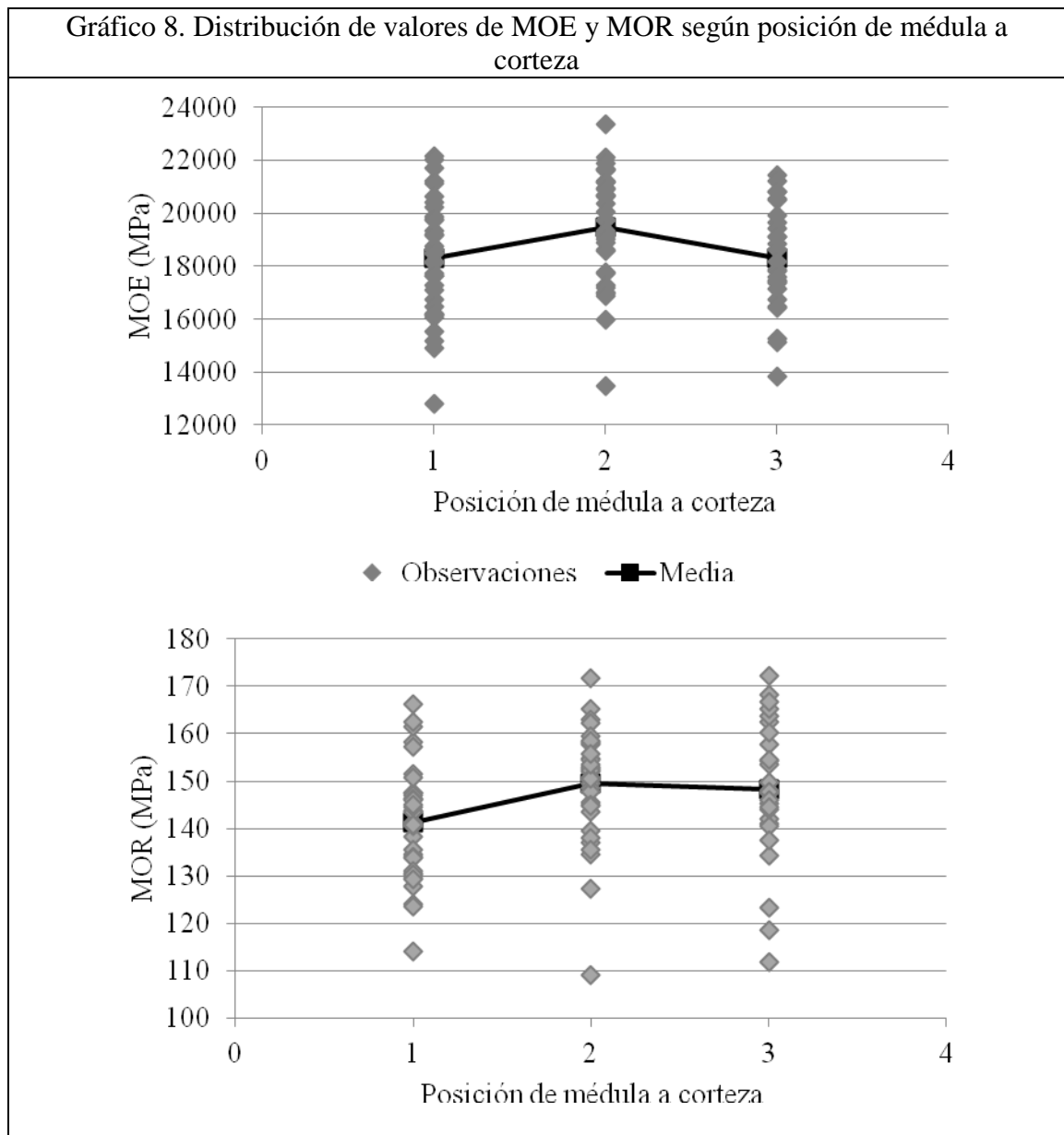


Cuadro 18. Variación de valores de MOR entre y dentro de árboles (MPa)				
Árbol	Media	n	Desvío	CV (%)
2	163.1	11	6.4	3.95
8	150.2	10	10.0	6.66
3	148.3	12	6.8	4.55
7	148.2	8	13.6	9.20
6	147.5	9	11.2	7.57
5	145.8	10	8.9	6.13
1	144.5	10	10.1	7.00
11	143.6	10	10.6	7.37
4	143.3	6	8.6	6.03
9	128.0	8	13.0	10.18
10	123.2	3	14.0	11.36
Media	144.16			
Desvío	10.70			
CV (%)	7.42			

A diferencia de lo que sucede con el MOE, la variación del MOR dentro de los árboles es menor en varios casos a la variación que existe entre árboles. El árbol que presento mayor valor de MOE, es también que el posee mayor MOR. El árbol 10 es al igual que para MOE, último en el “ranking”.

#### 4.4.2. Distribución radial de los valores de MOE y MOR

En los gráficos se presenta los valores de las observaciones de MOE y MOR de las probetas y los promedios para cada una de las posiciones.



En ambos casos se puede decir que no existe una tendencia clara de variación entre las tres posiciones estudiadas ya que sus rangos son similares; aunque los valores

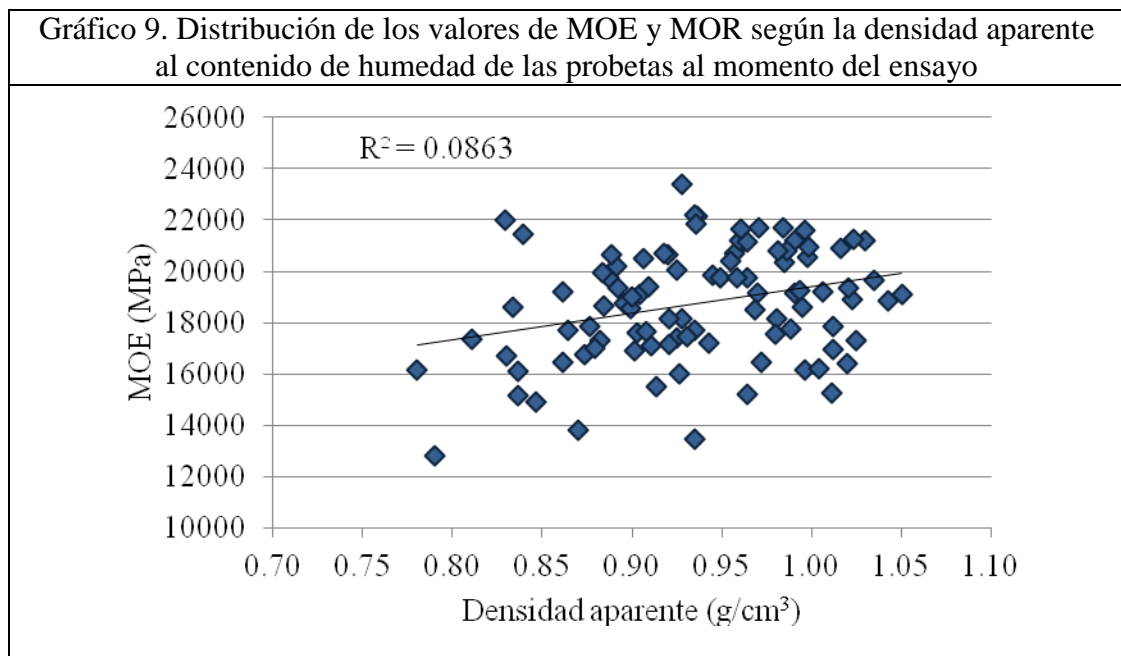
de la posición intermedia presentan una media mayor. Esta distribución puede estar asociada a la mayor densidad aparente media encontrada en la posición 2.

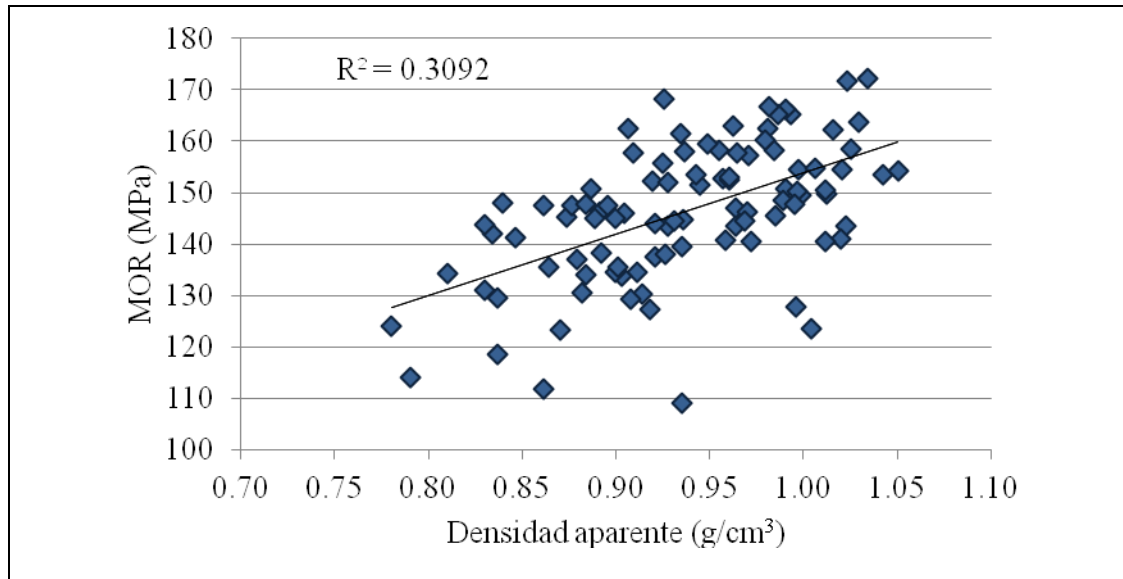
En la siguiente tabla se muestran las medias de resistencia.

Cuadro 19. Medias de MOE y MOR según posición desde médula a corteza			
Posición	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	18312	141.4	0.91
2	19485	149.5	0.96
3	18321	148.2	0.94

#### 4.4.3. Relación entre los valores de resistencia a la flexión y la densidad

Aquí se discute la relación entre los valores de MOE y MOR con la densidad al contenido de humedad de las probetas al momento del ensayo.



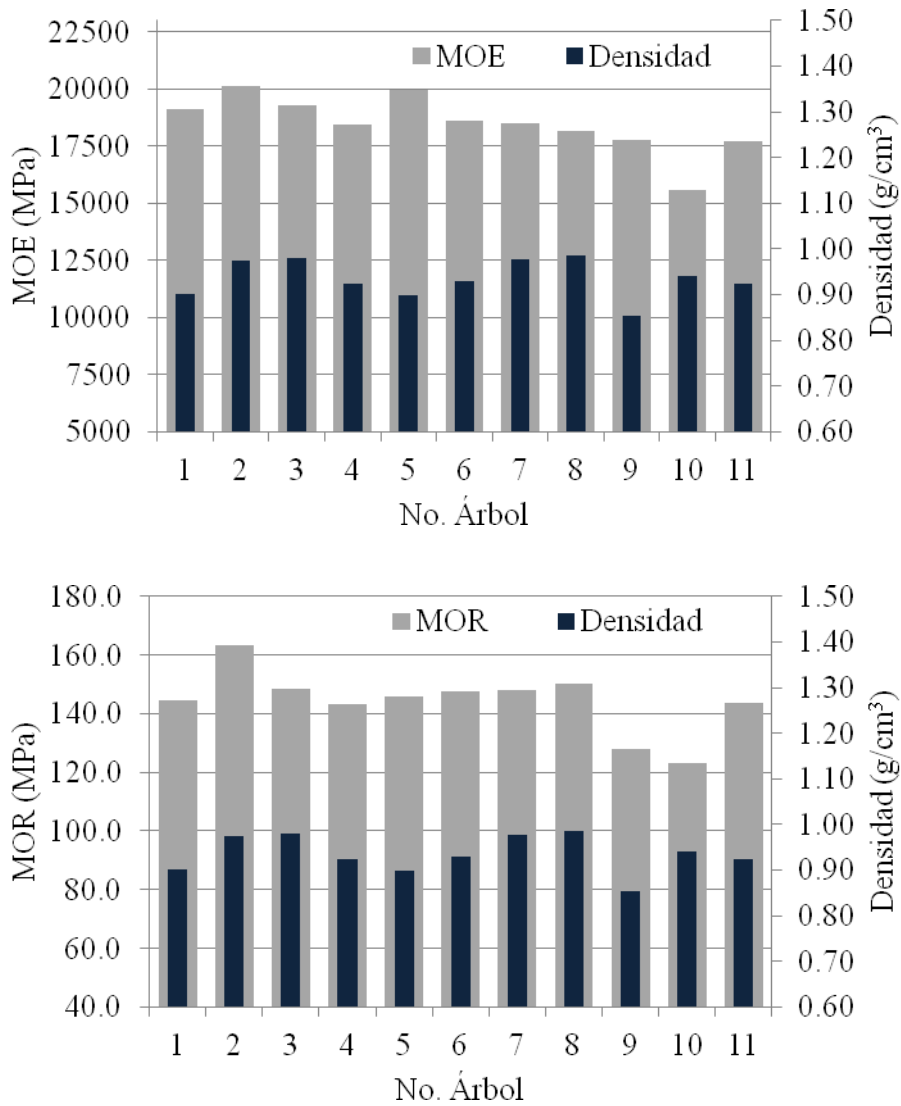


Para los valores de MOE no se observa una correlación clara de que aumente con la densidad. Por otro lado, parece existir una correlación más alta entre los valores de MOR y densidad.

#### **4.4.4. Comportamiento del MOE y MOR en relación con la densidad por árbol**

Al comparar los valores de resistencia y densidad por árbol, tampoco se observa una relación notoria, siendo menos clara en el caso del MOE. En el gráfico del MOR, los árboles que presentan mayor densidad (2, 3, 7 y 8) son los que soportaron mayores cargas de rotura.

Gráfico 10. Relación entre los valores de resistencia y la densidad por árbol



En el último gráfico se destaca el árbol 2 con un valor de MOR igual a 163.1 MPa; y los árboles 9 y 10 que presentan los menores valores de resistencia a la rotura con 128.0 y 123.2 MPa, respectivamente.

#### **4.4.5. Valores de MOE y MOR corregidos al 12% de contenido de humedad**

Para obtener los valores se corrige por un factor de ajuste citado por Bootle (1983). Para el módulo de elasticidad por cada punto porcentual de cambio en el contenido de humedad se ajusta un 2% el valor; y para el módulo de rotura un 4%.

Cuadro 20. Descriptores de MOE y MOR corregido para un contenido de humedad de 12%							
Propiedad	Media	n	Desvío	CV	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
MOE (MPa)	19668	96	2215	11.26	19224	20111	2.25
MOR (MPa)	160.8	96	15.8	9.83	157.7	164.0	1.97

Comparando los valores, al 12%, encontrados en la bibliografía, el valor de MOE (21000 MPa) es mayor al límite superior hallado en este trabajo; mientras que el MOR (163 MPa) está incluido dentro del intervalo que se presenta en la tabla.

Según la clasificación de Bootle (1983), considerando el valor de MOR la madera se encuentra en la categoría SD1 que representa la de mayor resistencia. Mientras que para el valor de MOE, se clasifica en una categoría menor, SD2.

#### **4.5. ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA AL GRANO**

El contenido de humedad promedio de las probetas al momento del ensayo es de 15.69%.

En general la forma de ruptura fue similar en todas las probetas, como se muestra en la figura 25. Se destaca que algunas probetas tuvieron una ruptura similar a la de tipo “shearing” mencionada en la norma ASTM utilizada (Figura 26).



Fig. 25 Forma tipo de ruptura en compresión paralela al grano

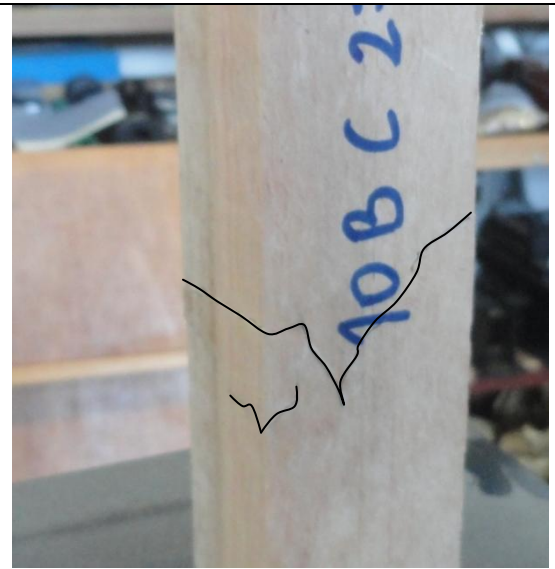


Fig. 26 Ruptura tipo “shearing” en compresión paralela

En el cuadro 21 se presenta el valor medio de compresión paralela al contenido de humedad promedio de las probetas al momento del ensayo.

Cuadro 21. Descriptores de compresión paralela al grano (MPa), al 15.7% de contenido de humedad promedio						
Media	n	Desvío	CV %	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
66.19	85	7.02	10.61	64.69	67.68	2.26

El rango de las observaciones realizadas en cada probeta va desde 49.69 a 80.24 MPa.

El coeficiente de variación obtenido es menor a 18%, valor de referencia presentado por Kretschmann (2010) para el ensayo de compresión paralela

#### 4.5.1. Variación de la compresión paralela entre y dentro de árboles

La variación que existe dentro de cada árbol es, en algunos casos, menor que entre árboles, mientras que en otros se da lo contrario (ver Cuadro 22).

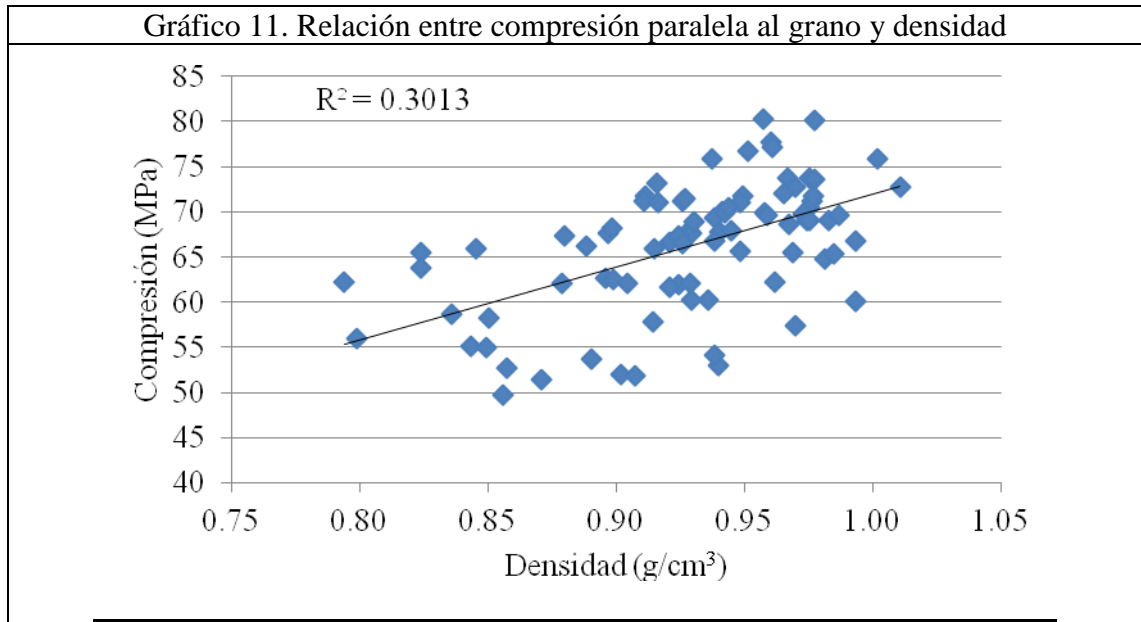
Cuadro 22. Variación de los valores de compresión paralela al grano entre y dentro de árboles (MPa)				
Árbol	Media	n	Desvío	CV (%)
1	68.30	10	4.29	6.28
2	71.56	10	5.10	7.13
3	72.05	6	6.40	8.88
4	69.95	5	1.59	2.27
5	71.06	1	-	-
6	66.86	6	2.48	3.71
7	71.27	9	4.39	6.16
8	68.09	8	3.59	5.27
9	59.62	12	6.03	10.11
10	58.52	9	5.10	8.71
11	60.54	9	7.18	11.87
Media	67.07			
Desvío	5.11			
CV (%)	7.61			

El árbol 3 es el que presenta una mayor resistencia a la compresión paralela, con un valor de 72.05 MPa; mientras que el árbol 10 se observó el menor valor de resistencia, siendo de 58.52 MPa.

Del árbol 5 se ensayó sólo una probeta, debido a la dificultad de obtener más probetas, por la menor disponibilidad de material y defectos que poseía.

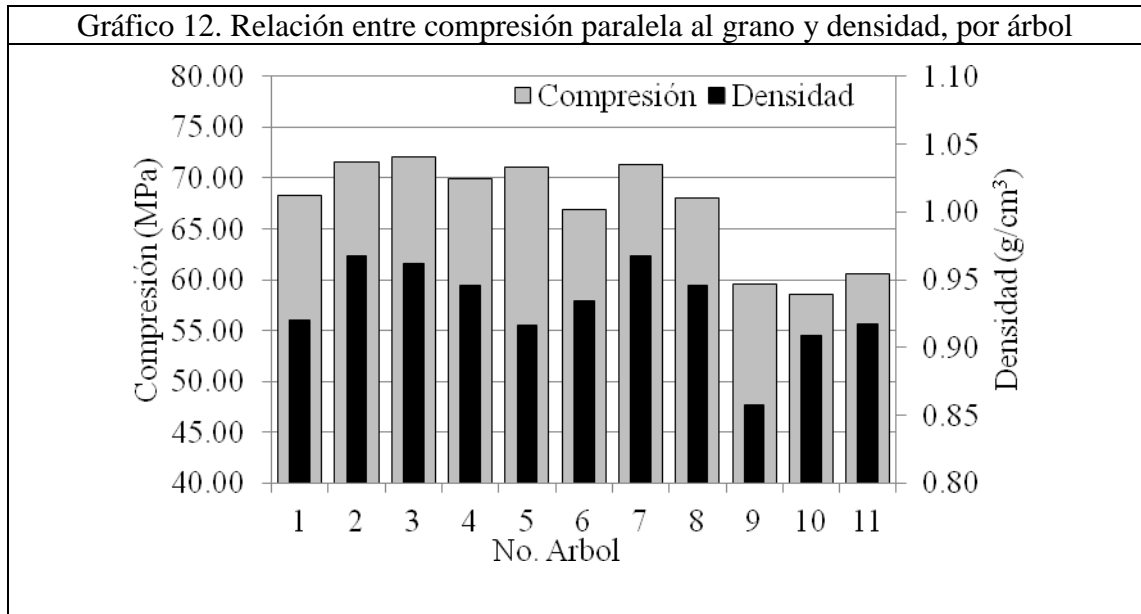
En el siguiente grafico se muestra la dispersión de los valores de compresión paralela según la densidad al contenido de humedad de las probetas al momento de ser ensayadas.





Según lo que muestra el gráfico existe una leve tendencia de aumento del valor de compresión con la densidad de las probetas. Sin embargo se observó probetas con densidad alta que presentaron valores relativamente bajos de compresión.

En general los árboles que tienen mayor densidad son los que presentan mayor resistencia a la compresión paralela, como se observa en los árboles 2, 3 y 7. Aunque por otro lado, el árbol 9, a pesar de tener una densidad menor que el árbol 10, tuvo una mayor resistencia.



#### 4.5.2. Compresión paralela al grano corregida al 12% de CH

Los valores obtenidos en el ensayo se corrigieron para un contenido de humedad de 12% utilizando un factor de ajuste de 6% más por cada punto porcentual de disminución de CH. Se presentan los valores en el siguiente cuadro.

Media	n	Desvío	CV %	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
80.86	85	8.88	10.98	78.97	82.75	2.33

Si se compara el valor hallado con el citado en la bibliografía (Bootle, 1983), se observa que es mayor al único valor encontrado.

Según la clasificación de Bootle (1983), presentada en la revisión bibliográfica, la madera se encuentra en la categoría SD1, siendo esta la de mayor resistencia a la compresión paralela.

#### 4.6. ENSAYO DE DUREZA

El contenido de humedad promedio de las probetas ensayadas fue de 15.4 %

La media de dureza Janka en la cara radial es mayor que en la tangencial. A su vez los valores en el sentido perpendicular al grano fueron mayores que paralelo a este, donde el límite superior del intervalo de confianza de la cara transversal, es menor que los límites inferiores de las otras caras.

Se destaca que el coeficiente de variación (CV) es menor al de referencia para valores de resistencia citado en Coronel (1996); así como también es menor al CV que cita Kretschmann (2010), (20%) para dureza radial y tangencial.

Cara	Media	n	Desvío	CV %	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
Tangencial (MPa)	136.59	85	18.50	13.55	132.66	140.52	2.88
Radial (MPa)	142.65	85	18.53	12.99	138.71	146.58	2.76
Transversal (MPa)	127.42	85	14.91	11.70	124.25	130.58	2.49

Los rangos hallados para cada caso fueron de 91.25 – 177.55 MPa para la cara tangencial, 96.95 – 189.10 MPa para la cara radial y 86.00 – 166.50 MPa para la transversal.

##### 4.6.1. Variación de la dureza Janka entre y dentro de árboles

En la siguiente tabla se muestran los valores medios de dureza por árbol, junto con el CV y el número de probetas ensayadas (No.).

Árbol	n	Tangencial		Radial		Transversal	
		Media	CV %	Media	CV %	Media	CV %
1	10	127.37	6.27	136.37	7.32	122.53	6.10
2	9	151.80	6.28	154.77	5.00	136.11	5.02
3	7	133.61	7.60	140.50	6.35	118.98	7.71
4	6	138.36	10.48	145.89	7.01	131.26	10.96
5	7	111.81	7.22	118.80	7.73	109.48	7.97
6	6	132.14	7.88	140.61	7.63	130.13	6.49
7	9	164.79	6.44	174.24	5.29	149.61	8.00
8	7	144.22	8.53	145.14	8.80	135.81	6.28
9	8	113.30	10.51	117.61	12.42	108.63	11.00
10	10	133.68	7.97	141.33	10.46	124.21	7.27
11	6	148.92	7.91	149.31	3.18	134.03	4.83

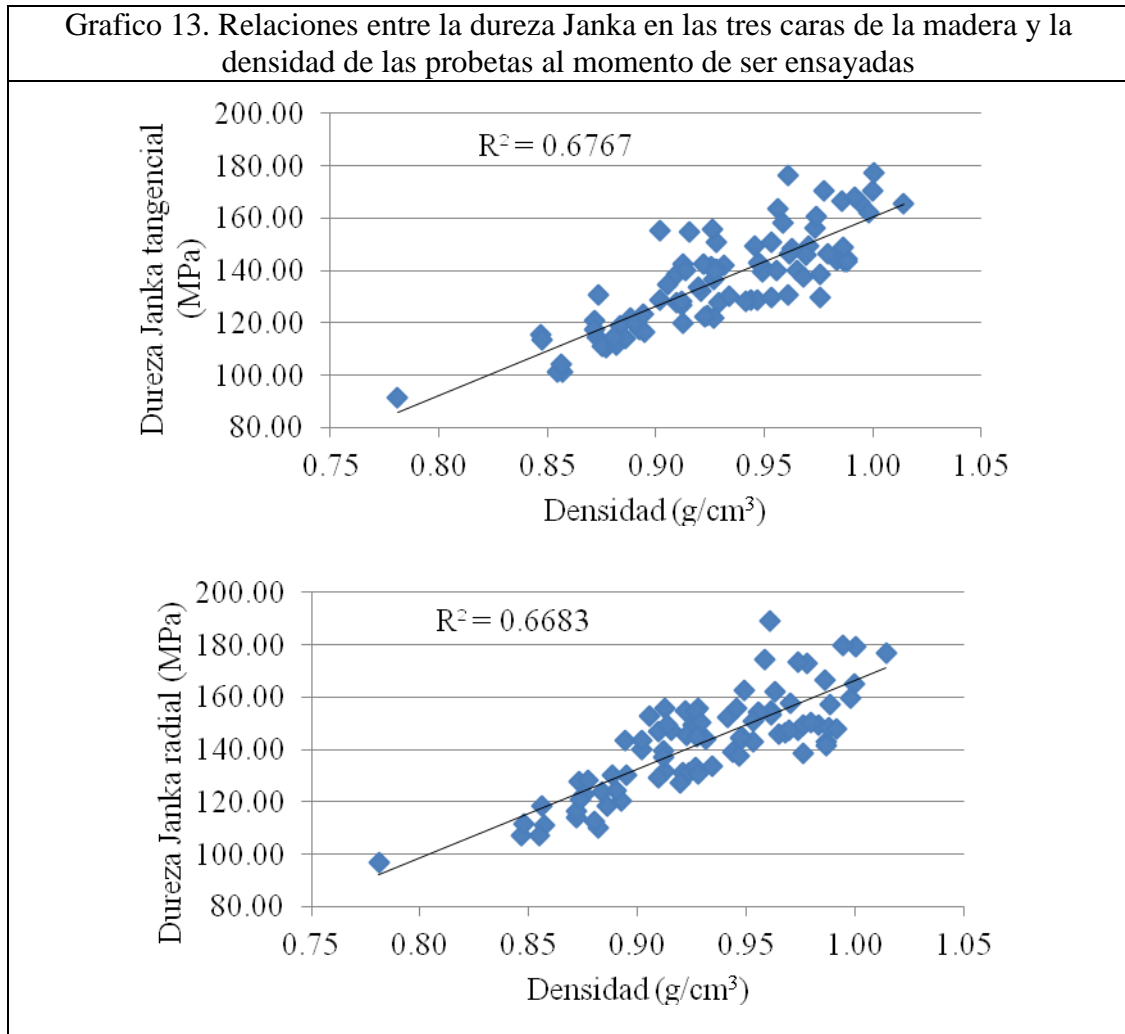
El árbol 7 es el que presenta la mayor media para las tres caras, siendo los árboles 5 y 9 los que tienen los menores valores de dureza.

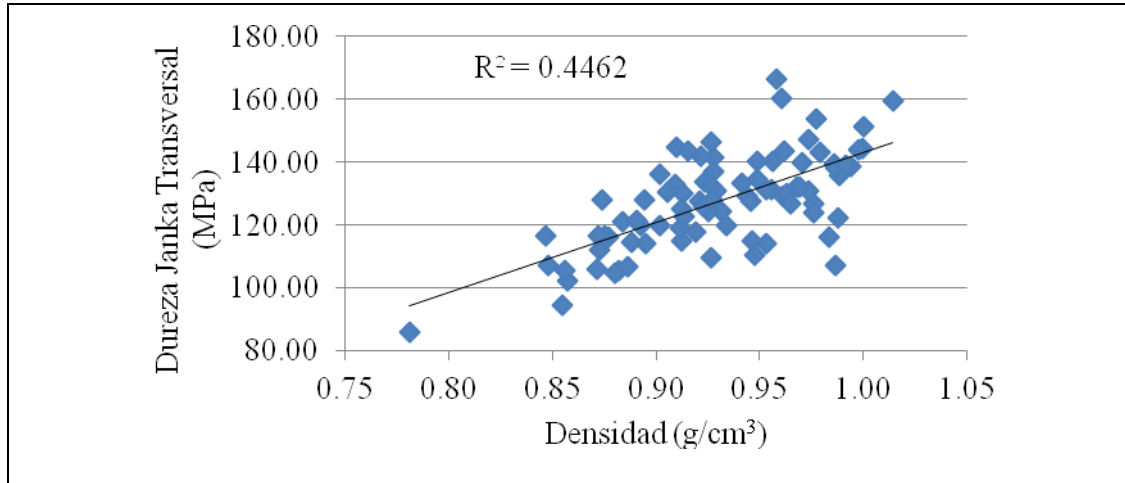
En el cuadro 26, se muestra la media de dureza de los 11 árboles, su desvío estándar y CV.

	Tangencial	Radial	Transversal
Media	136.36	142.23	127.34
Desvío	15.87	15.65	12.18
CV %	11.64	11.01	9.57

Si se compara los valores de CV de las tablas anteriores, se observa que en la mayoría de los casos la variación entre árboles es mayor que la que existe dentro de árboles.

#### 4.6.2. Variación de dureza Janka con la densidad de las probetas ensayadas

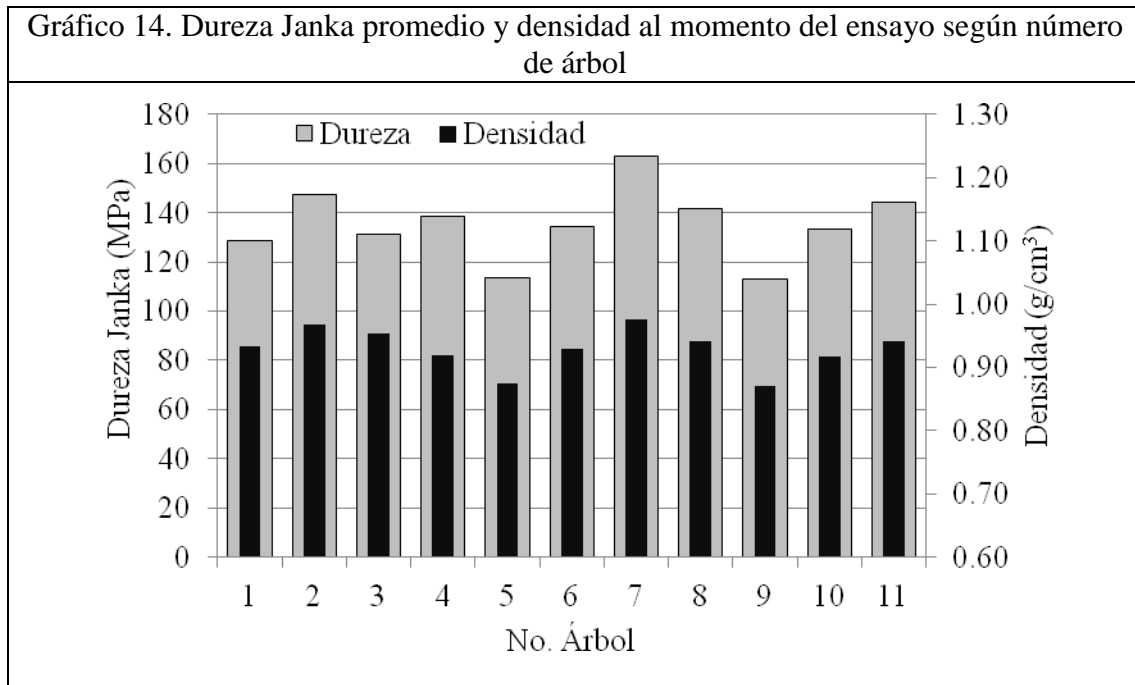




En general se puede decir que para las tres caras, existe una tendencia de aumento de la dureza con la densidad. Se destaca que algunos valores, aunque presentan una densidad alta, el valor de dureza es bajo; y viceversa.

#### 4.6.3. Dureza y densidad por árbol

Para comparar los valores por árbol se toma un valor promedio de dureza en las tres caras (tangencial, radial y transversal), y se grafica en conjunto con la densidad.



Se observa que los árboles que presentan un mayor promedio de densidad, también poseen un valor más alto de dureza. Por el ejemplo el árbol 7 con una densidad de  $0.97 \text{ g/cm}^3$ , presenta una dureza de 162.88 MPa.

#### **4.6.4. Dureza Janka ajustada al 12% de contenido de humedad**

Utilizando los factores de ajustes citados por Bootle (1983), se corrigió cada uno de las observaciones realizadas en cada probeta ensayada. Para dureza tangencial y radial el ajuste es de 2.5% más, por cada punto porcentual que disminuye el contenido de humedad; para dureza transversal el factor es 4%.

Cuadro 27. Dureza Janka (MPa) en las tres caras, para un contenido de humedad de 12%							
Dureza Janka	Media	n	Desvío	CV %	Li (95%)	Ls (95%)	Precisión (%)
Tangencial	148.64	85	20.46	13.77	144.29	152.99	2.93
Radial	155.23	85	20.46	13.18	150.88	159.58	2.80
Transversal	145.36	85	17.28	11.89	141.68	149.03	2.53

Si se compara con el valor de bibliografía, el promedio de dureza Janka radial y tangencial al 12% obtenido a partir del ajuste, 15.19 kN, es mayor que el citado en Bootle (1983), de 13 kN.

Considerando la clasificación de García y García, citada por Coronel (1996), se puede considerar a la especie en estudio como madera muy dura, ya que los valores de dureza Janka son mayores a  $1000 \text{ kg/cm}^2$ .

Dureza Janka	Media ( $\text{kg/cm}^2$ )
Tangencial	1516.16
Radial	1583.30
Transversal	1482.65

#### 4.7. RESULTADOS RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Cuadro 28. Resumen de las propiedades físicas y mecánicas del <i>Eucalyptus bosistoana</i>								
	n	Media	Desvío	CV (%)	Límite inf. (95%)	Límite sup. (95%)	Precisión (%)	
<b>Propiedades Físicas.</b>								
Densidad Aparente básica (g/cm <sup>3</sup> )	122	0.82	0.0565	6.86	0.81	0.83	1.22	
Densidad Aparente Corriente (g/cm <sup>3</sup> )	124	0.94	0.0661	7.04	0.93	0.95	1.24	
Contracción Lineal (%)	Tangencial	118	12.02	1.01	8.43	11.84	12.20	1.52
	Radial	118	6.45	0.64	9.93	6.33	6.56	1.79
	Longitudinal	120	0.17	0.10	54.75	0.16	0.19	9.80
Contracción Volumétrica (%)	118	17.69	1.24	7.03	17.47	17.92	1.27	
<b>Propiedades Mecánicas al 15%</b>								
Flexión Estática (MPa)	Módulo elástico	97	18738	2156	11.50	18309	19167	2.29
	Módulo de rotura	97	146.2	13.1	8.97	143.6	148.8	1.79
Compresión Paralela (MPa)	85	66.19	7.02	10.61	64.69	67.68	2.26	
Dureza Janka (MPa)	Tangencial	85	136.59	18.50	13.55	132.66	140.52	2.88
	Radial	85	142.65	18.53	12.99	138.71	146.58	2.76
	Transversal	85	127.42	14.91	11.70	124.25	130.58	2.49
<b>Propiedades Mecánicas corregidas al 12%</b>								
Flexión Estática (MPa)	Módulo elástico	96	19668	2215	11.26	19224	20111	2.25
	Módulo de rotura	96	160.8	15.8	9.83	157.7	164.0	1.97
Compresión Paralela (MPa)	85	80.86	8.88	10.98	78.97	82.75	2.33	
Dureza Janka (MPa)	Tangencial	85	148.64	20.46	13.77	144.29	152.99	2.93
	Radial	85	155.23	20.46	13.18	150.88	159.58	2.80
	Transversal	85	145.36	17.28	11.89	141.68	149.03	2.53



## 5. CONCLUSIONES

Respecto a las propiedades físicas la madera de *Eucalyptus bosistoana* estudiada, se vio que la contracción de la misma es alta, lo que es común en maderas de alta densidad.

A partir de la experiencia obtenida se observó que es una madera difícil de secar, debido al tiempo que insumió el acondicionamiento en las cámaras de climatización. A pesar de esto, se observaron muy pocos defectos en el material.

Los valores de resistencia obtenidos, se encontraron en las categorías más altas de las clasificaciones utilizadas. La madera de la especie se clasifica como muy dura y de alta resistencia a la flexión estática y compresión paralela al grano.

Dadas las características que presenta la madera se sugiere su uso principalmente para pisos interiores (“parquet”), “decks” y durmientes debido a la alta dureza. Es también una especie que podría sustituir a maderas importadas de monte nativo como “curupay”, “lapacho”, “quebracho”, comúnmente utilizadas en carpintería rural.

Actualmente se da más importancia al uso de materiales más amigables con el ambiente. Se han encontrado antecedentes que resaltan la alta durabilidad natural de la madera en estudio, por lo que podría recomendarse para su uso como columnas sustituyendo maderas tratadas con productos químicos como CCA. Se invita al estudio de esta propiedad, para continuar con la caracterización de la madera de *E. bosistoana*.

Sería de interés también conocer el comportamiento silvícola de las especie en distintas zonas del país, con diferentes características climáticas y edafológicas.

De la misma forma que se encontraron en este trabajo resultados de esta especie, introducida hace muchos años y muy poco estudiada, es de nuestro interés motivar a los lectores al estudio de la madera de otras especies en la misma situación; impulsando la diversificación de especies para uso forestal.

## **6. RESUMEN**

Este trabajo tiene por objetivo la caracterización de la madera de *Eucalyptus bosistoana*, a través del estudio de las propiedades físicas (densidad aparente básica y corriente, y contracción) y mecánicas (flexión estática, dureza Janka y compresión paralela al grano). Se trabajó con 11 árboles de 42 años pertenecientes a una cortina forestal ubicada en la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt (Bañados de Medina, Cerro Largo). Para la realización de los ensayos de densidad aparente, contracción, flexión estática y dureza Janka se utilizaron las normas uruguayas, UNIT. Para el ensayo de compresión paralela se utilizó la norma norteamericana, ASTM. Se encontró que la densidad aparente básica de la especie es de  $0.82 \text{ g/cm}^3$  y la densidad aparente corriente es de  $0.94 \text{ g/cm}^3$ . Se clasifica la madera como de alta contracción presentando un valor volumétrico de 17.69%. Respecto a las propiedades mecánicas con un contenido de humedad promedio de 15%, la madera es de gran resistencia con valores de 66.19 MPa para la compresión paralela al grano y de 18738 MPa y de 146.2 MPa, MOE y MOR respectivamente, en flexión estática. Para estas propiedades se realizaron las correcciones al 12%, utilizando los factores de ajuste que corresponden.

Palabras clave: *Eucalyptus bosistoana*; Densidad aparente básica y corriente; Contracción; Flexión estática; Compresión paralela; Dureza Janka.

## 7. SUMMARY

This work aims to characterize the wood of *Eucalyptus bosistoana*, through the study of physical (density and shrinkage) and mechanical (static bending, Janka hardness and compression parallel to grain) properties. The material used for the test was eleven trees of 42 years old belonging to a forest curtain located at the Experimental Station Bernardo Rosengurtt (Baños de Medina, Cerro Largo). For physical properties, static bending and Janka hardness was used the uruguayan standards, UNIT. To carry out parallel compression test was followed American standards, ASTM. It was found that the basic density of the specie is of 0.82 g/cm<sup>3</sup> and 0.94 g/cm<sup>3</sup> for the density at a moisture content of 12%. The wood is classified as high shrinkage, with a value of 17.69%. Respect to the mechanical properties is of great strength. At an average moisture content of 15%, the value for compression parallel to grain is 66.19 MPa. For static bending, MOE and MOR are 18738 MPa and 146.2 MPa, respectively. To this properties it was performed a correction to 12% using the corresponding adjustment factors.

Keywords: *Eucalyptus bosistoana*; Density; Shrinkage; Static bending; Compression parallel to grain; Janka hardness.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM. 2009. Standard test methods for small clear specimens of timber. D143 – 09. Pennsylvania, US. 31 p.
2. BAKER, R. T.; SMITH, H. G. 1912. A research on the eucalypts especially in regard to their essential oils (en línea). Tasmania, Government Printer. 82 p. Consultado 31 ene. 2012. Disponible en <http://chestofbooks.com/health/aromatherapy/Eucalyptus-Essential-Oils/46-Eucalyptus-Bosistoana.html>
3. BALMELLI, G.; RESQUIN, F. 2005. Comportamiento de especies de Eucalyptus para sombra y abrigo en suelos sobre basalto. In: Día de Campo Producción Animal, Pasturas y Forestal (2005, Tacuarembó). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 21-26 (Actividades de Difusión no. 431).
4. BOAS, I. H. 1947. The commerical timbers of australia; their properties and uses. Melbourne, Government Printer. 344 p.
5. BOLAND, D. J.; BROOKER, M. I. H.; CHIPPENDALE, G. M.; HALL, N.; HYLAND, B. P. M.; JOHNSTON, R. D.; KLEINIG, D. A.; McDONALD, M. W.; TURNER, J. D. 2006. Forest trees of Australia. 5<sup>th</sup>. ed. Collingwood, CSIRO. 736 p.
6. BOOTLE, K. R. 1983. Wood in Australia; types, properties and uses. Sydney, McGraw-Hill. 443 p.
7. BRINK, M. 2008. Eucalyptus cloeziana F. Muell (en línea). Wageningen, PROTA (Plant Resources or Tropical Africa). s.p. Consultado 18 ene. 2012. Disponible en [http://database.prota.org/PROTAhtml/Eucalyptus%20cloeziana\\_En.htm](http://database.prota.org/PROTAhtml/Eucalyptus%20cloeziana_En.htm).
8. BRUSSA, C. 1994. Eucalyptus; especies de cultivo de más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p.
9. CORONEL, O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas; aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Santiago del Estero, El Liberal. pt. 1, 187 p.
10. \_\_\_\_\_. 1996. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas; aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Santiago del Estero, El Liberal. pt.2, 335 p.

11. CPBR. 2006. Eucalyptus of Australia. 3<sup>rd</sup>. ed. Collingwood, CSIRO. 1 DVD.
12. DADSWELL H. E. 1972. The anatomy of eucalypt woods. Melbourne, CSIRO. 28 p. (Forest Products Laboratory. Division of Applied Chemistry Technological Paper no. 66)
13. DE VASTEY, J. 1962. Estudios de propagación de especies forestales por estacas. Tesis Magister Agriculturae. Turrialba, Costa Rica, IICA. 67 p.
14. DEPARTMENT OF EMPLOYMENT, ECONOMIC DEVELOPMENT AND INNOVATION. s.f. Timber answers; timber properties and uses – a reference centre. (en línea). Queensland. s.p. Consultado 26 ene. 2012. Disponible en [http://www.timberanswers.com/Detailed.aspx?Record\\_ID=19912](http://www.timberanswers.com/Detailed.aspx?Record_ID=19912)
15. DUARTE, J. C.; STURION, J.; RIOYEI, A.; HIGA, R.; YUKIO, J. 2000. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo, Embrapa Florestas. 114 p. (Embrapa Florestas. Documentos no. 38).
16. \_\_\_\_\_; RIOYEI, A.; BRITO, J.; HIGA, R. 2002. Fichas de caracterização silvicultural e da madeira de espécies e procedencias de eucalipto plantadas experimentalmente em Guaíba-RS. Colombo, Embrapa Florestas. 44 p. (Embrapa Florestas. Documentos no. 72)
17. FAO. 1956. El eucalipto en la repoblación forestal. Roma. FAO. 431 p. (Colección FAO: Estudio de silvicultura y productos forestales no. 11).
18. FOREST AND WOOD PRODUCTS AUSTRALIA. 2012. Wood solutions; Coast Grey Box - Eucalyptus bosistoana. (en línea). Melbourne, FWPA. Consultado 26 ene. 2012. Disponible en <http://www.woodsolutions.com.au/Wood-Species/species-coast-grey-box>.
19. FORESTRY AND TIMBER BUREAU. 1957. Forest trees of Australia. Canberra, Government Printing Office. 230 p.
20. HARRIS, S; KEVIN, T. 2001. Farm forestry species for the Corangamite region. (en línea). Melbourne, Department of Primary Industries. Consultado 26 ene. 2012. Disponible en <http://www.dpi.vic.gov.au/forestry/private-land-forestry/species-selection-guides/farm-forestry-species-corangamite-region>

21. INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS. 2007. Método de ensayo para la determinación de los módulos de elasticidad y rotura en ensayo de flexión estática en maderas. UNIT 1137:2007. Montevideo. 8 p.
22. \_\_\_\_\_. 2008a. Determinación de la Dureza Janka en maderas. UNIT 364:2008. Montevideo. 4 p.
23. \_\_\_\_\_. 2008b. Ensayo de determinación de la densidad aparente en maderas. UNIT 237:2008. Montevideo. 10 p.
24. \_\_\_\_\_. 2008c. Maderas; determinación de la contracción. UNIT 363:2008. Montevideo. 8 p.
25. KOLLMAN, F.; COTÉ, W. 1984. Principles of wood science and technology. 2<sup>nd</sup>. ed. Berlin, Springer Verlag. v. 1, 592 p.
26. KRALL, J. 1970. Fundamentos para nuevas introducciones de Eucalyptus en el Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). Boletín no. 113. 22 p.
27. \_\_\_\_\_. 1997. Silvo pastoreo en la región de basalto. Forestal-Sociedad de Productores Forestales del Uruguay (Montevideo). 2 (6): 15-18.
28. KRETSCHMANN, D. E. 2010. Mechanical properties of wood. In: Ross, R. J. ed. Wood handbook; wood as an engineering material. Madison, WI, USDA Forest Service. pp. 1-46
29. MANTERO, C.; GARCÍA, C.; RODRÍGUEZ, P.; ESCUDERO, R.; PRIORE, E.; MENÉNDEZ, P. 2007. Potencialidad para la producción de aceites esenciales en especies de *Eucalyptus* cultivadas en Uruguay. Agrociencia (Montevideo). 11 (2): 17-23.
30. MILLEN, P. 2011. NZ Dryland forests initiative: a market focused durable eucalypt R&D project. Blenheim, NZDFI. 17 p.
31. NGUYEN, M. N.; LEICESTER, R. H.; WANG, C. 2008. Embedded corrosion of fasteners in timber structures. Highett, CSIRO. 107 p. (Forest and Wood Products Australia. Manual no. 6),
32. PEZO, J. A. 2007. Mahild drying technologies. Nürtingen, MAHILD. 661 p.
33. POU, R. 1981. Perspectivas de la producción forestal con fines energéticos. In: Seminario Nacional sobre Agroenergía en Uruguay (1º., 1981, Montevideo).

Trabajos presentados. Montevideo, Oficina del IICA. pp. 195-208 (Serie Ponencias, resultados y recomendaciones de eventos no. 233).

34. SIMBERLOFF, D.; REJMÁNEK, M. 2011. Encyclopedia of biological invasions. London, University of California Press. 764 p. (Encyclopedias of the Natural World no. 3)
35. TUSET, R.; DURÁN, F. 2007. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización; aserrado de maderas. 2<sup>a</sup>. ed. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 1, 370 p.
36. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2008. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. 2<sup>a</sup>. ed. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 2, 503 p.
37. UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA (URUGUAY). FACULTAD DE AGRONOMÍA. 1979. Introducción de varias especies del género eucaliptus. In: Jornadas Forestales (2<sup>a</sup>., 1979, Cerro Largo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 39-40.