

Propiedades físicas y mecánicas de la madera de una población de *Eucalyptus bosistoana* F. Muell. cultivada en Uruguay

Mantero Carlos¹, O'Neill Hugo², Cardoso Andrea², Castagna Andrés³

¹Departamento de Producción Forestal y Tecnología de la Madera, Facultad de Agronomía, Garzón 780, 12900, Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: cmantero@fagro.edu.uy

²Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

³Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

Recibido: 17/7/13 Aceptado: 13/11/13

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo la caracterización de la madera de *Eucalyptus bosistoana*, a través del estudio de las propiedades físicas (densidad 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 (Bañado de Medina, Cerro Largo). Para la realización de los ensayos de densidad aparente, contracción, flexión estática y dureza Janka se siguió lo prescrito en 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 g cm⁻³ y la densidad aparente corriente es de 0,94 g cm⁻³. Se clasifica la madera como de alta contracción con un valor volumétrico de 17,83 %. 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 % de contenido de humedad, utilizando factores de ajuste apropiados.

Palabras clave: densidad, contracción, flexión estática, compresión paralela, dureza Janka

Summary

Physical and Mechanical Properties of Wood From a Population of *Eucalyptus bosistoana* F. Muell. Grown in Uruguay

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 42 years old trees from a forest shelter belt located at the Experimental Station Bernardo Rosengurtt (Bañado de Medina, Cerro Largo). For physical properties, static bending and Janka hardness Uruguayan UNIT standards were used, while American ASTM standards were followed to carry out compression parallel to grain tests. It was found that the species basic density is 0.82 g cm⁻³ and 0.94 g cm⁻³ for the density at a moisture content of 12 %. The wood was classified as high shrinkage, with a volumetric value of 17.83 %. Regarding the mechanical properties the wood 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. These properties were corrected to 12 % moisture content using appropriate adjustment factors.

Keywords: density, shrinkage, static bending, parallel to grain compression, Janka hardness

Introducción

En 1959, en la Estación Experimental Bernardo Rosenfurt de la Facultad de Agronomía, se realizó un ensayo de introducción de varias especies del género *Eucalyptus* con el objetivo del estudio de su adaptación, comportamiento y crecimiento (Facultad de Agronomía, 1979). Desde ese entonces se piensa en *Eucalyptus bosistoana* como una de las especies promisorias para adaptarse a las condiciones ambientales de Uruguay.

Krall (1970) teniendo en cuenta las condiciones ambientales del lugar de origen, menciona que la especie sería apropiada para plantar en zonas bajas no anegadas de la cuenca de la Laguna Merín, en los departamentos de Rocha, Treinta y Tres y Cerro Largo. Posteriormente, Krall (1997), recomienda el uso de esta especie para sistemas agroforestales y la obtención de madera para carpintería rural. Sin embargo, su investigación quedó relegada frente a otras especies con objetivos de producción distintos, no favoreciendo la diversificación de especies forestales y otros usos tanto maderables como no maderables.

A partir de 2005 comienza una política nacional de diversificación de especies utilizadas en plantaciones, 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 (Mantero *et al.*, 2008; INIA, 2012). Actualmente en Uruguay no existen plantaciones comerciales de *E. bosistoana*, aunque sí se puede encontrar cultivada en cortinas y montes de abrigo (Brussa, 1994).

Balmelli y Resquin (2005) 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 Bañado 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.

Entre los posibles usos no maderables, se estudió la producción de aceites esenciales a partir de *E. bosistoana* que resultó ser una de las especies más promisorias por su alto rendimiento en aceite y alto porcentaje de 1-8 cineol. (Mantero *et al.*, 2007).

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. En este contex-

to surge la inquietud de conocer más sobre la especie, dado las características que puede presentar para producir madera de calidad para la industria de elaboración mecánica, y también, como forma de generar antecedentes sobre las propiedades físicas y mecánicas de *E. bosistoana* para trabajos futuros.

Las propiedades que se estudiarán son: propiedades físicas -densidad aparente (básica, corriente) y contracción (radial, tangencial, longitudinal, volumétrica)-, y propiedades mecánicas en pequeñas probetas libres de defectos: dureza Janka (transversal, tangencial, radial) y flexión estática y compresión (paralela). 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.

Materiales y métodos

Los árboles evaluados pertenecían a una cortina mo- noespecífica 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. Fueron apeados en febrero de 2011. La madera utilizada para los ensayos se obtuvo de 11 árboles. Por cada árbol se obtuvieron cuatro tabloncillos de una troza mayor a un metro de largo que incluyera por lo menos 0,50 m a cada lado del diámetro a 1,30 m (DAP), con un espesor de 0,075 m (Figura 1).

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 podía obtener, optimizan-

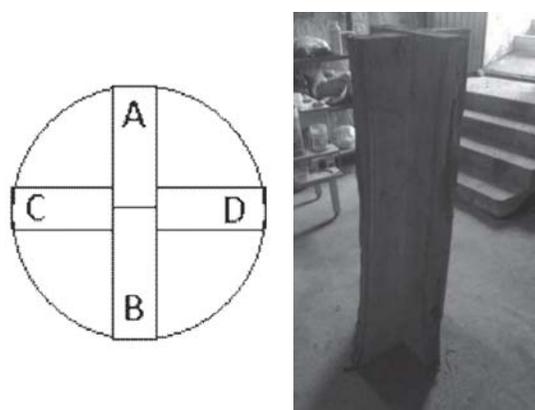


Figura 1. Esquema de obtención de tabloncillos en sección transversal y reconstrucción de la troza a partir de los tabloncillos.

do el uso del mismo. Para esto se tuvo en cuenta diferentes factores como: ancho del tablón, rajaduras, grietas, posición de la médula. En cuanto a esta última, se obtuvieron 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. Las pre-probetas de flexión estática, compresión paralela y dureza Janka se colocaron en cámara de climatización en condiciones de humedad de equilibrio de 12 %, las pre-probetas de contracción se sumergieron en agua para ser saturadas. A partir de las pre-probetas se obtuvieron las probetas definitivas para los distintos ensayos.

Ensayo de densidad aparente

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

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 determinó con micrómetro, ya que es la utilizada para el ensayo de contracción.

Para las determinaciones se utilizaron los siguientes instrumentos y equipos: calibre digital Mitutoyo; apreciación 0,01 mm, micrómetro digital SONY DZ-501; apreciación 0,0005 mm, estufa de circulación forzada Yamato DK 600, balanza Mettler Toledo PG-503-S (apreciación: 0,001g).

Densidad aparente corriente

Para poder obtener el 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 por pesada directa de las probetas. Por otro lado, el volumen de las probetas se corrigió al 12 % mediante el CCV hallado.

Ensayo de contracción

Para la determinación de la contracción radial, tangencial y longitudinal se siguieron los procedimientos prescritos en la norma UNIT 363:2008 (UNIT, 2008c). Las pre-probetas se sumergieron en agua durante cinco semanas para saturarlas. Una vez saturadas se cortaron las probetas definitivas, obteniéndose tres y dos réplicas para las probetas tangenciales-radiales y longitudinales respectivamente. 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, para tener una mejor estimación del punto de saturación de las fibras (PSF). Para cada condición se registró el peso de las probetas con el fin de obtener los contenidos de humedad de las mismas. La estimación del PSF se hizo a partir de las rectas de mejor ajuste construidas con los valores de contracción a cada contenido de humedad. Se consideró como valor de PSF la intersección de la recta con el eje Ox. Los contenidos de humedad promedio para las cinco medidas realizadas se presentan en el Cuadro 1.

El equipamiento utilizado fue el siguiente: estufa Yamato DK 610 y estufa Yamato DK 600, balanza Mettler Toledo PG-503-S (apreciación: 0,001g) y micrómetro digital SONY DZ-501; apreciación 0,0005 mm.

Debido al desconocimiento del comportamiento en secado de la madera de la especie, se decidió utilizar un proceso lento y cauteloso para evitar defectos que inutilizaran las probetas. En el proceso de disminución de contenido de humedad se utilizó una estufa apagada. Hasta la segunda medida la estufa permaneció cerrada y sin aire forzado por 11 días. Lo mismo ocurrió para la tercera medida, durante nueve días. Posteriormente, en la etapa de secado hasta la cuarta medida, se le agregó movimiento de aire y la

Cuadro 1. 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

puerta de la estufa se mantuvo abierta durante 4 h por día. Para llevar las probetas a estado anhidro, primero se abrió la puerta de forma permanente durante siete 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 dejó en esas condiciones hasta llegar a estado anhidro.

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: 0,001 g), micrómetro digital SONY DZ-501; apreciación 0,0005 mm. Para el cálculo de la contracción volumétrica se utilizó la fórmula planteada por Kollmann y Coté (1984), Pezo (2007), distinta a la citada en UNIT (2008c):

donde: C_{vol} = contracción volumétrica, C_{tg} = contracción tangencial y C_{long} = contracción longitudinal.

Ensayo de flexión estática

Para este ensayo se siguieron los procedimientos prescritos en la norma UNIT 1137:2007 (UNIT, 2007a). Las dimensiones de las probetas utilizadas fueron de 25 mm × 25 mm × 400 mm. Las pre-probetas de flexión estuvieron ocho semanas en la cámara de climatización Nihon Freezer, en condiciones controladas de humedad relativa y temperatura. Estas se fueron variando gradualmente para evitar producir defectos en la madera, ya que se desconocía el comportamiento de la misma. Se fue controlando la humedad de las probetas, utilizando algunas de ellas como testigo y pesándolas cada una semana. 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 una temperatura de 20 °C, de modo que el CHE fuera de 12 %. Permanecieron allí durante 13 semanas.

Una vez que las pre-probetas alcanzaron la humedad promedio estimada de 12,88 %, se cortaron llevándolas a las dimensiones finales, y se colocaron, nuevamente, en cámara de climatización OKUNO durante una semana más, hasta ser ensayadas. Las condiciones del ensayo fueron las siguientes: ensayo de 3 puntos. Aplicación de carga central en la 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 los apoyos inferiores de 350 mm. Se utilizó un extensómetro o deflectómetro digital colocado en la tra-

versa de la máquina universal, para medir su desplazamiento y considerar ese valor como la deformación de la probeta y poder calcular el MOE. Para el cálculo del contenido de humedad y densidad de las probetas ensayadas, se cortaron probetas más chicas de las probetas utilizadas en el ensayo, de las zonas no afectadas por la falla en la rotura, según los procedimientos que indican las normas UNIT 223 -1:2007 y UNIT 237:2008 (UNIT, 2007b; UNIT, 2008b).

Equipamiento utilizado: máquina universal Minebea NMB TG-50kN, con celda de carga de 50kN. Cámara de climatización OKUNO. Cámara de climatización NIHON. Extensómetro o deflectómetro digital MITUTOYO de 50 mm de capacidad y una apreciación de 0.01mm

Ensayo de compresión paralela al grano

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

Las pre-probetas obtenidas para realizar este ensayo, estuvieron en cámara de climatización durante 24 semanas. Con 15% de contenido de humedad (CH) se decidió llevarlas a las dimensiones finales. Debido a los defectos ocasionados en el secado de las probetas, algunas de ellas fueron descartadas. Las probetas definitivas fueron 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. El equipamiento utilizado en el ensayo fue el siguiente: cámara de climatización OKUNO. Cámara de climatización NIHON. Máquina Universal Minebea NMB AL-250 kN, con una celda de carga de 250 kN de capacidad. Luego de realizado el ensayo se obtuvo un prisma para la determinación del contenido de humedad y la densidad aparente de cada probeta.

Ensayo de dureza Janka

Este ensayo se realiza bajo las determinaciones de la norma UNIT 364:2008 (UNIT, 2008a). La preparación de las probetas se realiza en el mismo tiempo que para las del ensayo de compresión. Condiciones del ensayo: velocidad de aplicación de carga: 6 mm/min. El equipamiento utilizado para este ensayo fue el siguiente: cámara de climatiza-

ción OKUNO. Cámara de climatización NIHON. Máquina Universal Minebea NMB TG-50kN, con celda de carga de 50kN.

Análisis de datos

Se realiza una descripción estadística de los datos, presentando valores medios, desvío estándar y coeficiente de variación; además se calcularon los intervalos de confianza (95 %) para las medias generales de las propiedades en estudio. La precisión de los valores presentados se calculó como la semi-amplitud del intervalo de confianza expresada como porcentaje de la media.

Resultados y discusión

En el Cuadro 2 se presenta el resumen de resultados de las propiedades estudiadas.

Densidad aparente básica

La media de la densidad aparente básica es de $0,82 \text{ g cm}^{-3}$, con un intervalo de $\pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, con un 95 % de confianza. Este valor es cercano al citado por Dadswell (1972) ($0,78$ a $0,98 \text{ g cm}^{-3}$); aunque difiere de Duarte *et al.* (2002), que menciona un valor de $0,68 \text{ g cm}^{-3}$ para madera de árboles de siete años cultivados en Brasil. Esta diferencia podría deberse a que en el trabajo de Duarte *et al.* (2002) los árboles muestreados eran más jóvenes.

Densidad aparente básica según posición de la madera en el radio

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. La variación para las tres posiciones es similar (Figura 2).

Cuadro 2. Resumen de las propiedades físicas y mecánicas de *Eucalyptus bosistoana*.

		n	Media	Desvío	CV (%)	Límite inf. (95%)	Límite sup. (95%)	Precisión (%)
Propiedades Físicas								
Densidad Aparente básica (g/cm^3)		122	0,82	0,0565	6,86	0,81	0,83	1,22
Densidad Aparente Corriente (g/cm^3)		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
Propiedades Mecánicas al 15 %								
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
	Tangencial	85	136,59	18,50	13,55	132,66	140,52	2,88
Dureza Janka (MPa)	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
Propiedades Mecánicas corregidas al 12 %								
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
	Tangencial	85	148,64	20,46	13,77	144,29	152,99	2,93
	Dureza Janka (MPa)	Radial	85	155,23	20,46	13,18	150,88	159,58
Transversal		85	145,36	17,28	11,89	141,68	149,03	2,53

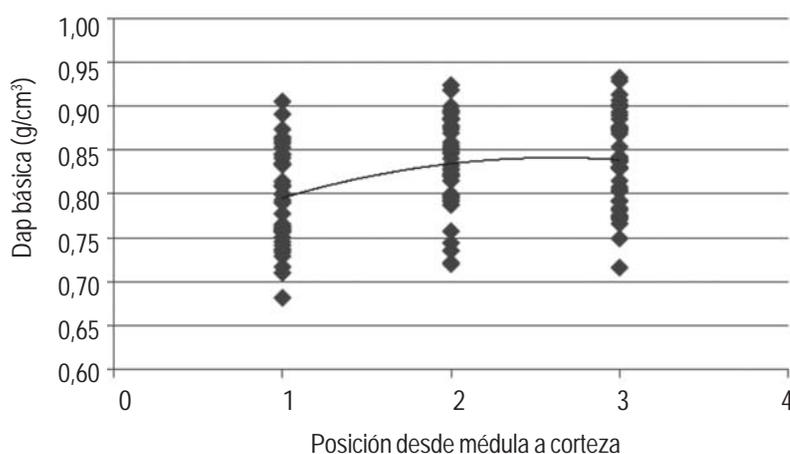


Figura 2. Dap básica según posición de la madera en el radio.

Densidad aparente corriente

El valor medio de densidad al 12 % de contenido de humedad fue de $0,94 \text{ g cm}^{-3}$ con un intervalo de $\pm 0,01$ para 95 % de confianza. Los valores extremos obtenidos fueron de $1,06 \text{ g cm}^{-3}$ y $0,77 \text{ g cm}^{-3}$, superior e inferior respectivamente. El intervalo de confianza hallado está incluido en el rango de densidad corriente más amplio ($0,90$ a $1,20 \text{ g cm}^{-3}$) reportado por Brink (2008). El resto de los datos encontrados en la literatura son más altos y con rangos más amplios que los encontrados en este trabajo: Boas (1947) ($0,99$ a $1,20 \text{ g cm}^{-3}$), Bootle (1983) ($1,10 \text{ g cm}^{-3}$), Boland *et al.* (2006) ($0,99$ a $1,19 \text{ g cm}^{-3}$), Nguyen *et al.* (2008) ($1,11 \text{ g cm}^{-3}$) y DEEDI (s.f.) ($1,09$ a $1,10 \text{ g cm}^{-3}$).

Contracción

En el Cuadro 3, se ve que la contracción tangencial es la mayor de las lineales, llega casi al doble de la contracción radial.

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 % (Figuras 3 y 4).

Las rectas presentadas en el Cuadro 3 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. Según el coeficiente de contracción volumétrica, se clasifica 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 (Villière, 1953). El coeficiente de contracción volumétrica es similar al que presenta el Forest and Wood Products Australia (0,42) (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 reportados por Boas (1947) y Bootle (1983).

Relación entre contracción radial y tangencial

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de contracción radial y tangencial y el coeficiente de anisotropía encontrados a lo largo del radio y totales. La posición 1 es la más cercana a la médula, la 2 es la posición intermedia y la 3 la más cercana a la corteza.

Cuadro 3. Rectas teóricas de contracción (β), PSF y Coeficiente de contracción.

Contracción	% Contracción = $a \times \% \text{humedad} + b$	R^2	PSF (%)	Coef. de contracción (% β / % 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

Figura 3. Contracción radial, tangencial y volumétrica en función del contenido de humedad (CH%) y línea de tendencia.

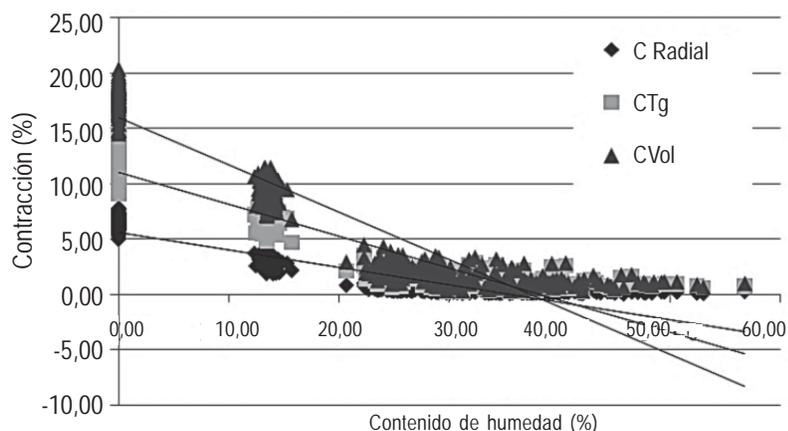
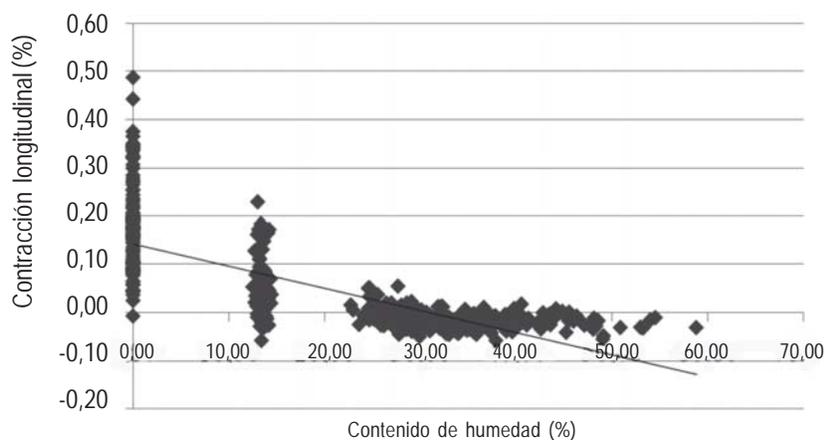


Figura 4. Contracción longitudinal en función del CH (%) y línea de tendencia.



Cuadro 4. Contracción (b) radial, tangencial y coeficiente de anisotropía según posición desde médula (1) a corteza (3).

	1	2	3	Total
β longitudinal	0,18	0,16	0,18	0,17
β tangencial	12,48	12,12	11,52	12,02
β radial	6,56	6,54	6,25	6,45
β tang/ β rad	1,9	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). Se destaca que toda la madera tiene un coeficiente de contracción en el mismo rango de clasificación.

Contracción volumétrica según posición desde médula a corteza

En la Figura 5 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.

La Figura 6 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.

Flexión estática

El contenido de humedad de las probetas ensayadas fue en promedio de 14,5 %. También se presentan valores de módulo de elasticidad (MOE) y módulo de rotura (MOR) corregidos al 12 %. Los coeficientes de variación para estas propiedades son menores a 16 %, valor de referencia

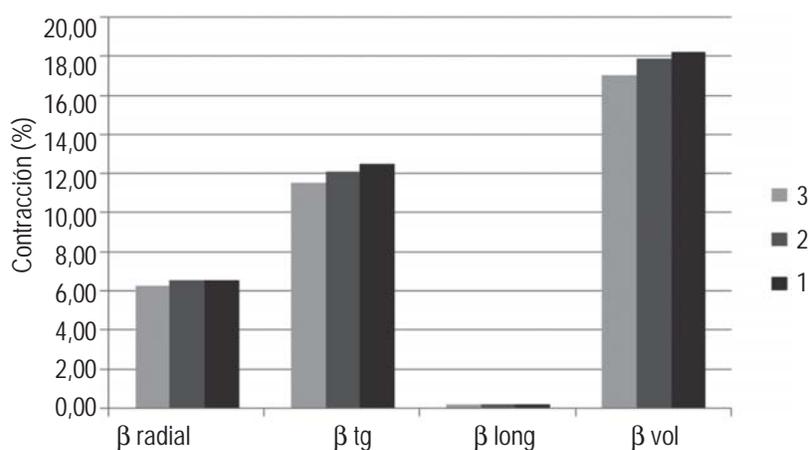


Figura 5. Contracción lineal y volumétrica según posición desde médula a corteza en cada dimensión.

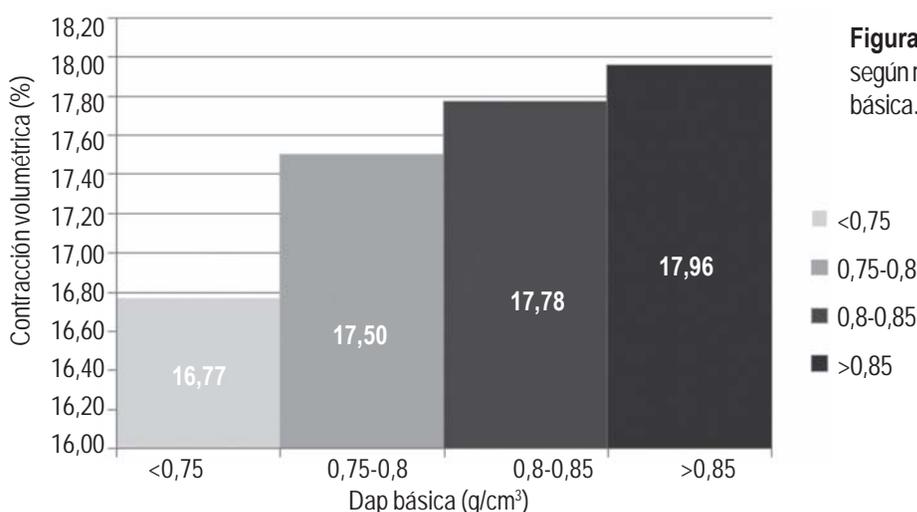


Figura 6. Contracción volumétrica según rangos de Densidad aparente básica.

que presenta Coronel (1996) para valores de resistencia en latifoliadas. El rango total de valores a la humedad de ensayo para MOE fue de 12792 a 23374 MPa, y de 109,1 a 172,3 MPa para los valores de MOR.

Entre los antecedentes bibliográficos 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.

Comparando los valores, al 12 %, encontrados en la bibliografía, el valor de MOE (21000 MPa) es mayor al límite superior del intervalo de confianza hallado en este trabajo para valores corregidos al 12 % CH; mientras que el MOR (163 MPa) está incluido dentro del intervalo de confianza que se presenta en el Cuadro 2.

Según la clasificación usada por Bootle (1983), considerando el valor de MOR, la madera en estudio se encuentra en la categoría que representa la de mayor resistencia (SD1). Mientras que para el valor de MOE se clasifica en una categoría menor (SD2). FWPA (2012) clasifica la madera de *E. bosistoana* en el grupo SD1, tanto para MOE como MOR.

Ensayo de compresión paralela al grano

El contenido de humedad promedio de las probetas al momento del ensayo fue de 15,69 %. El rango de las observaciones realizadas 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. 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 (ver valores en Cuadro 2).

Si se compara con el valor hallado en la literatura (Bootle, 1983) se observa que es mayor al único valor encontrado, de 73 MPa en madera ensayada al 12 % CH. Según la clasificación utilizada por Bootle (1983), la madera se encuentra en la categoría SD1, siendo esta la de mayor resistencia a la compresión paralela.

Ensayo de dureza Janka

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), de 20 % para dureza radial y tangencial. 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.

Dureza Janka ajustada al 12 % de contenido de humedad

Utilizando los factores de ajuste citados por Bootle (1983), se corrigió cada una 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 %. Si se compara con el valor encontrado en la literatura, 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 citada por Coronel (1996), se puede considerar la especie en estudio como de madera muy dura, ya que los valores de dureza Janka son mayores a 1000 kg cm⁻².

Conclusiones

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

altas pero se encuentran en niveles que permiten trabajar con la madera con razonable estabilidad dimensional.

Se podría desarrollar su uso para pisos interiores (parqué) y exteriores (decks), durmientes, postes y columnas, construcciones rurales, carpintería de obra y otros usos donde se necesite alta resistencia. Podría sustituir maderas importadas muy utilizadas cuya disponibilidad está disminuyendo rápidamente, en especial por consideraciones ambientales. Es necesario conocer más sobre su durabilidad natural, comportamiento al secado y otras propiedades físico mecánicas, químicas y térmicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio Tecnológico del Uruguay el apoyo brindado a través de la utilización de laboratorio y equipos.

Bibliografía

- ASTM. 2009. ASTM D143-09: Standard test methods for small clear specimens of timber. Pennsylvania: ASTM International. 31p.
- Balmelli G, Resquin F. 2005. Comportamiento de especies de Eucalyptus para sombra y abrigo en suelos sobre basalto. En: Día de Campo: producción animal, pasturas y forestal. Montevideo: INIA. pp. 21-26. (Actividades de Difusión; 431).
- Boas IH. 1947. The commercial timbers of Australia: their properties and uses. Melbourne: Government Printer. 344p.
- Boland DJ, Brooker MIH, Chippendale GM, Hall N, Hyland BPM, Johnston R D, Kleinig, DA, McDonald MW, Turner JD. 2006. Forest trees of Australia. 5th. ed. Collingwood: CSIRO. 736p.
- Bootle KR. 1983. Wood in Australia: types, properties and uses. Sydney: McGraw-Hill. 443p.
- Brink M. 2008. *Eucalyptus cloeziana* F. Muell [En línea]. Wageningen: PROTA. Consultado 18 enero 2012. Disponible en: http://database.prota.org/PROTAhtml/Eucalyptus%20cloeziana_En.htm.
- Brussa C. 1994. Eucalyptus: especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo: Hemisferio Sur. 328p.
- Coronel E. 1996. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas: aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Tomo 2. Santiago del Estero: El Liberal. 335p.
- Coronel E. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas: aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Tomo 1. Santiago del Estero: El Liberal. 187p.
- Dadswell HE. 1972. The anatomy of Eucalypt woods. Melbourne: CSIRO. 28p. (Forest Products Laboratory. Division of Applied Chemistry Technological Paper; 66)
- DEEDI. s.f. Timber answers: timber properties and uses – a reference centre [En línea]. Queensland. Consultado 26 enero 2012. Disponible en: http://www.timberanswers.com/Detailled.aspx?Record_ID=19912.
- Duarte JC, 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. 44p. (Embrapa Florestas; 72).

- Facultad de Agronomía.** 1979. Introducción de varias especies del género *Eucalyptus*. En: Segundas Jornadas Forestales; 1 - 2 diciembre 1979; Cerro Largo; Uruguay. Montevideo: Facultad de Agronomía. pp. 39 - 40.
- FWPA.** 2012. Wood solutions: Coast Grey Box - *Eucalyptus bosistoana* [En línea]. Melbourne: FWPA. Consultado 26 enero 2012. Disponible en: <http://www.woodsolutions.com.au/Wood-Species/species-coast-grey-box>.
- INIA.** 2012. Programa Nacional de Investigación producción forestal [En línea]. Montevideo: INIA. Consultado 31 enero 2012. Disponible en: <http://www.inia.org.uy/online/site/31704411.php>
- Kollman F, Coté W.** 1984. Principles of wood science and technology. 2nd. ed. Vol. 1. Berlin : Springer Verlag, 592p.
- Krall J.** 1997. Silvopastoreo en la región de basalto. *Forestal*, 2(6): 15 - 18.
- Krall J.** 1970. Fundamentos para nuevas introducciones de *Eucalyptus* en el Uruguay. *Boletín (Facultad de Agronomía)*, 113: 22p.
- Kretschmann DE.** 2010. Mechanical properties of wood. En: Ross RJ. [Ed.]. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison: USDA. pp. 1 - 46
- Mantero C, Loza-Balbuena I, San Román D, Rego G, Blanco M, Durán V, Mariño M.** 2008. Complejo forestal celulósico-maderero. En: Cadenas de valor (I) carnes, lácteos, granos, maderas, automotriz, farmacéutica, TIC's, energías renovables. Montevideo: Gabinete productivo. pp. 91-115.
- 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.
- Nguyen MN, Leicester RH, Wang C.** 2008. Embedded corrosion of fasteners in timber structures. Highett: CSIRO. 107p. (Forest and Wood Products Australia : 6).
- Pezo JA.** 2007. Mahild drying technologies. Nürtingen: MAHILD. 661p.
- Tuset R, Durán F.** 2008. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. 2a. ed. Vol. 2. Montevideo: Hemisferio Sur. 503p.
- UNIT.** 2008a. UNIT 364: 2008: Determinación de la Dureza Janka en maderas. Montevideo: UNIT. 4p.
- UNIT.** 2008b. UNIT 237: 2008: Ensayo de determinación de la densidad aparente en maderas. Montevideo: UNIT. 10p.
- UNIT.** 2008c. UNIT 363: 2008: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. Maderas: determinación de la contracción. Montevideo: UNIT. 8p.
- UNIT.** 2007a. UNIT 1137:2007: Método de ensayo para la determinación de los módulos de elasticidad y rotura en ensayo de flexión estática en maderas. Montevideo : UNIT. 8p.
- UNIT.** 2007b. UNIT 223 -1-: 2007. Contenido de humedad en la madera. Determinación por el método de secado en estufa. Montevideo: UNIT. 6p.
- Villière A.** 1953. Séchage des bois. Paris: Dunod. 364 p.