

Influencia del raleo sobre el módulo de elasticidad y ruptura en *Eucalyptus grandis*

Cueto Guillermo¹, O'Neill Hugo², Rachid Cecilia³, Ohta Sadaaki², Resquin Fernando³

¹Farm & Forestry Management Services (FMS). Cartagena 1557, 11500, Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: guillec77@hotmail.com

²Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU). Avenida Italia 6201, 11500, Montevideo, Uruguay.

³Programa de Producción Forestal, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Tacuarembó. Ruta 5 km 386, 45000, Tacuarembó, Uruguay.

Recibido: 2/9/12 Aceptado: 4/3/13

Resumen

El presente trabajo está enfocado en *Eucalyptus grandis*, principal especie del género plantada en Uruguay para obtener madera sólida. El objetivo del mismo es evaluar la incidencia de la intensidad del raleo sobre el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR). El monte seleccionado se ubica en el departamento de Tacuarembó y fue plantado sobre suelo arenoso en el año 1989, con semilla proveniente de Bañado de Medina (Uruguay). El ensayo fue diseñado con parcelas al azar, con dos repeticiones y tres tratamientos: A) raleo fuerte con 272 árboles/ha remanentes, B) raleo medio con 352 árboles/ha remanentes y C) sin raleo, con 1280 árboles/ha. El raleo fue realizado en el año 1994, cuando el monte tenía cinco años y las evaluaciones se efectuaron cuando el monte alcanzó los 19 años de edad. De cada tratamiento se seleccionaron los 10 individuos promedio de diámetro a la altura del pecho (DAP) para obtener las tablas y probetas libres de defecto a ensayar. Las variables analizadas fueron el MOE y el MOR de tablas con dimensiones comerciales y probetas libres de defectos. No se observaron diferencias significativas en las variables analizadas.

Palabras clave: raleo, propiedades de madera, *Eucalyptus grandis*

Summary

Thinning Influence on the Modulus of Elasticity and Rupture in *Eucalyptus grandis*

This article is focused on *Eucalyptus grandis* - main species of the genus planted in Uruguay for solid wood. The objective is to evaluate the impact of the intensity of thinning on modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR). The plantation analyzed is located in the department of Tacuarembó, and was planted on sandy soil in 1989, with seed from Bañado de Medina (Uruguay). The trial was designed with random plots with two replications and three treatments: A) intense thinning with 272 remaining trees / ha, B) medium thinning with 352 remaining trees / ha and C) un-thinned with 1280 remaining trees / ha. Thinning was conducted in 1994, when the forest was five years old, and assessments were made when the plantation was 19. From each treatment 10 individual trees were selected, with average diameter at breast height (DBH) in order to obtain defect-free specimens to be tested. The variables studied were the MOE and MOR of boards with commercial dimensions and defect-free specimens. There were no significant differences between treatments.

Key words: thinning, wood properties, *Eucalyptus grandis*

Introducción

El comportamiento de las plantaciones forestales, sometidas a diferentes tipos de manejo, puede ocasionar alteraciones en la calidad de la madera que influirá en el producto final y consecuentemente en su valor comercial. En la búsqueda de maderas de calidad superior que atiendan las exigencias de un mercado que crece anualmente, las plantaciones comerciales se manejan con diferentes intensidades de poda y raleo, que varían según la región y la especie. Según Lima (2010), en general se pueden modificar o controlar los factores que afectan la cantidad y calidad de la madera, por medio de los tratamientos silviculturales. Entre los manejos silviculturales que posibilitan la alteración de las condiciones y tasas de crecimiento de los árboles se destacan la aplicación de fertilizantes y el raleo. De acuerdo con Arango y Tamayo (2008) un raleo temprano en *Eucalyptus grandis* realizado en forma sistemática proporciona un ritmo relativamente rápido y más constante de crecimiento, permitiendo así la formación de madera más uniforme.

Sin embargo, para el género *Eucalyptus*, poco se conoce sobre la influencia del raleo citada sobre las características mecánicas de la madera, las cuales tienen gran importancia por determinar la calidad del material para usos estructurales. El módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR) son dos parámetros normalmente evaluados en los ensayos de flexión estática, siendo el módulo de elasticidad de mayor importancia para la caracterización tecnológica de la madera, pues representa la resistencia del material sometido a una fuerza aplicada perpendicularmente al eje longitudinal de la madera (Lima y García, 2005). Según Silva (2003), el MOE indica resistencia y capacidad de deformación, permitiendo calificar de esta forma la madera para fines estructurales.

Warren *et al.* (2009) observaron una relación entre densidad de árboles y MOE, obteniendo valores superiores de MOE (de árboles en pie) a mayores densidades de plantación comparando poblaciones de 714 vs. 1250 para *E. cloeziana*, *E. pilularis* y *E. dunnii* de seis años. También comprobaron que las densidades mayores a 1250 árboles no presentaron diferencias significativas respecto a esta característica. Cruz *et al.* (2003), estudiando la flexión estática y la compresión paralela al grano en trozas de 10 clones de híbridos de eucalipto, verificaron que existen diferencias estadísticas entre clones, obteniendo de modo general, valores mayores en las trozas superiores.

Para el caso de coníferas, los antecedentes muestran tendencias más claras. Laserre *et al.* (2004) observaron que para densidades de plantación de 833 árboles/ha, los valores de MOE fueron menores que para densidades de 2500 árboles/ha para *Pinus radiata* de 11 años. Las mismas tendencias fueron observadas para *Picea sitchensis* y *Tsuga heterophylla* entre 38 y 70 años de edad (Wang *et al.*, 2001) y *Criptomeria japonica* de 41 años (Wang y Ko, 1998). Por otro lado, Grabianowski *et al.* (2004) no obtuvieron diferencias significativas para MOE entre una población de 27 años de *Pinus radiata* raleada (100 árboles/ha) y otra sin raleo (625 árboles/ha). Sin embargo comprobaron diferencias respecto a parcelas con exposición a los vientos predominantes, presentando mayor MOE aquellas parcelas menos expuestas independientemente de su densidad.

A nivel nacional se ha estudiado la variación de las propiedades físico mecánicas, en sentido radial y axial en diferentes zonas del país, pero no se ha analizado cómo aquellas pueden ser afectadas por las medidas silviculturales. El objetivo de este trabajo es evaluar la incidencia de la intensidad del raleo sobre el MOE y el MOR.

Materiales y métodos

El monte seleccionado para este estudio fue plantado en octubre de 1989, sobre suelo arenoso (CONEAT 7.32). Es un rodal de *Eucalyptus grandis* con semilla proveniente de Bañado de Medina y se encuentra ubicado en el departamento de Tacuarembó (Cuadro 1).

El diseño experimental del ensayo fue un diseño de parcelas al azar y está compuesto por tres tratamientos, con dos repeticiones, siendo estos tratamientos: raleo fuerte, raleo medio y sin raleo o testigo. Las características del ensayo se describen en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Caracterización agroclimática de Tacuarembó. Caracterización agroclimática del INIA. Serie histórica, período 1980-2009.

Características	Valores
Precipitación media total anual	1426,6 mm
Temperatura máxima media	23,5 °C
Temperatura mínima media	13,1 °C
Temperatura media	18,3 °C
Humedad relativa ambiente media	72%
Días con heladas agrometeorológicas	42 días
Heliofanía media real	6,9 h/día

Cuadro 2. Principales características del ensayo.

Tratamientos	Superficie de cada tratamiento	N° de árboles	Superficie de parcela interna	N° de árboles a muestrear	Densidad árboles/ha
Raleo fuerte	40 x 40 m	40	25 x 25 m	17	272
Raleo medio	40 x 40 m	60	25 x 25 m	22	352
Testigo	40 x 40 m	210	25 x 25 m	80	1280

Cuadro 3. Árboles seleccionados de cada tratamiento.

Tratamiento	Parcela	Número árbol	Altura total (m)	DAP (cm)	Promedio DAP (cm)
Fuerte	1	F	45,9	44,8	43,8
Fuerte	1	D	39,8	44,4	
Fuerte	1	C	41,2	46,2	
Fuerte	1	G	37,6	41,3	
Fuerte	1	P	37,7	43,5	
Fuerte	4	79	44,4	46,6	40,3
Fuerte	4	83	40,4	39,4	
Fuerte	4	110	47,5	45,6	
Fuerte	4	146	46,7	39	
Fuerte	4	151	45,5	47,2	
Medio	3	553	41	38,1	
Medio	3	579	45,3	42,1	
Medio	3	623	46,2	42	
Medio	6	253	37,8	37,7	
Medio	6	290	42,9	43	
Medio	6	317	40,1	42,4	27,6
Medio	6	319	41,2	39	
Medio	6	328	41,6	42,5	
Medio	6	361	45,6	39,4	
Medio	3	575	45,2	37,2	
Testigo	2	287	37,1	27,6	
Testigo	2	329	38,8	29,6	
Testigo	2	330	25	28,4	
Testigo	2	350	33,4	29,5	
Testigo	2	387	34,8	27,4	
Testigo	5	719	26,1	27,4	
Testigo	5	725	40,8	28,7	
Testigo	5	734	38,7	26,9	
Testigo	5	832	37,4	25,5	
Testigo	5	701	23,1	24,5	

En octubre del 2008 se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de todos los individuos, para calcular las variables dasométricas de cada uno de los tratamientos. Con esos datos se seleccionaron 10 individuos de

la clase diamétrica más frecuente para apearlos y extraer las muestras de madera (Cuadro 3).

Una vez apeados los 10 árboles de DAP promedio por tratamiento, se procedió a confeccionar, dentro de las 24

horas inmediatas al corte, las tablas de dimensiones comerciales (50 mm de espesor, 150 mm ancho y 3200 mm de largo) de la segunda troza. Las tablas obtenidas fueron clasificadas en tres categorías, según las diferentes ubicaciones del radio A, B y C (Figura 1). En total se obtuvieron las 30 tablas de los tratamientos con raleo y 18 tablas del tratamiento testigo, para los cálculos de densidad, MOE y MOR.

Las tablas fueron acondicionadas y secadas a la intemperie hasta llegar al 14% de humedad. Luego se llevaron a dimensiones finales de dos tipos: tablas medianas 35,5 mm x 84 mm x 1500 mm y tablas grandes 45,5 mm x 154,7 mm x 2600 mm para su posterior ensayo.

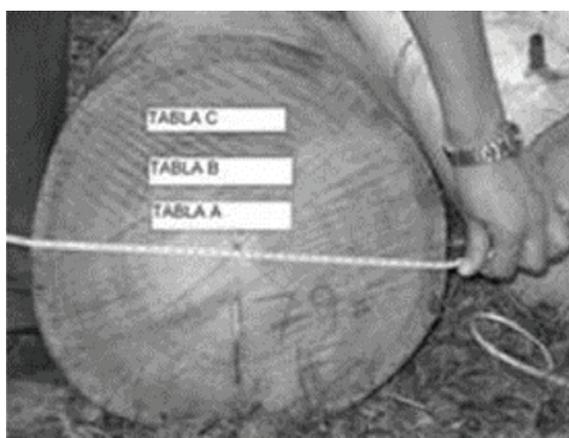


Figura 1. Ubicación de tablas de tamaño comercial.

Tablas A Cercana a la médula, principalmente madera juvenil.
Tablas B Madera intermedia entre el duramen y la albura.
Tablas C Cercana a la corteza, albura, madera adulta.

Determinación del MOE y del MOR en ensayo de flexión sobre tablas

El módulo de elasticidad y de rotura fueron determinados en la máquina universal marca Minebea, modelo AL-250 kNB. Las piezas fueron sometidas a un esfuerzo de flexión de cuatro puntos, como se muestra en la Figura 2. La carga

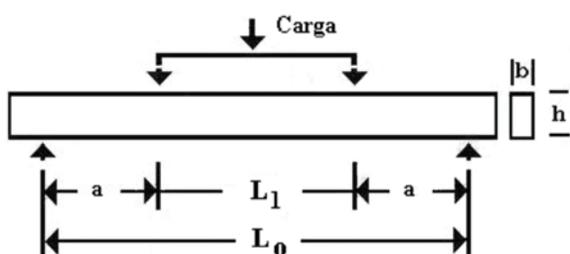


Figura 2. Esquema de ensayo de flexión estática cuatro puntos en máquina universal.

se realizó sobre el canto con menor cantidad de defectos; dejando en el canto inferior sometido a esfuerzo de tensión aquellos defectos como nudos, bolsas de quino, etc., obteniendo de esta forma el valor de MOR más crítico de las vigas ensayadas.

El ensayo se realizó según la norma ASTM (American Society for Testing and Materials) (ASTM, 1998) D 198. Las condiciones de ensayo para el cálculo del MOR fueron las siguientes:

- Celda de carga de 250 kN
- Aplicación de carga sobre el canto de la tabla
- Velocidad de ensayo constante de 20 mm/min

Para el cálculo de desplazamiento se utilizó un extensómetro digital conectado a un amplificador y este al PC de la máquina universal.

Para las tablas grandes

- Dos puntos de aplicación de carga a 860 mm
- Distancia entre apoyos de 2600 mm (span)

Para las tablas medianas

- Dos puntos de aplicación de carga a 500 mm
- Distancia entre apoyos de 1500 mm (span)

El MOE y el MOR fueron determinados mediante el mismo ensayo de flexión estática. Los cálculos fueron obtenidos en forma automática por el software de la Máquina Universal. Una vez finalizado el ensayo se verificaron los valores, utilizando las siguientes fórmulas:

$$MOE_{4p} = \frac{\Delta P(L_0 - L_1) \cdot (2 \cdot L_0^2 + 2 \cdot L_0 \cdot L_1 - L_1^2)}{48 \cdot I \cdot \Delta y}$$

Donde:

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

L_0 : Distancia entre apoyos inferiores (span)

L_1 : Distancia entre apoyos superiores de carga

I : Momento de inercia

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

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

Donde:

I : Momento de inercia

b : Ancho de la tabla

h : Altura de la tabla

$$MOE_{4p} = \frac{3.P.(l-a)}{2.b.h^2}$$

Donde:

P: Carga máxima

l: Distancia entre apoyos inferiores (span)

a: Distancia desde el apoyo inferior al punto de carga superior más próximo

b: Ancho de la tabla

h: Altura de la tabla

Determinación del MOE y del MOR en pequeñas probetas libres de defectos

A partir de las tablas ensayadas en flexión estática, se confeccionaron pequeñas probetas libres de defectos. En total se obtuvieron 30 probetas de los tratamientos con raleo y 17 tablas del tratamiento testigo, para los cálculos de densidad, MOE y MOR., las que fueron acondicionadas en cámara climatizada en las condiciones de 20 °C de temperatura y de 65% de humedad relativa, para lograr una humedad de equilibrio en las mismas del orden del 12%.

El ensayo de flexión estática se realizó sobre probetas de 25 x 25 x 400 mm, en la Máquina Universal de Ensayos, marca Minebea KN 50 utilizando una celda de carga de 50 kN de capacidad, ejerciendo la carga en la cara radial y en el centro de la probeta (Figura 3).

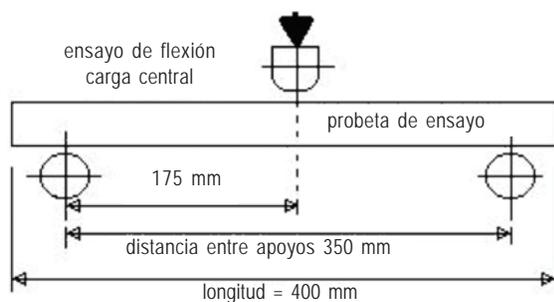


Figura 3. Esquema y ensayo de flexión estática en tres puntos en máquina universal.

Para el ensayo se utilizaron las normas JIS (Japan Industrial Standard) Z 2101-1994 (JIS, 1994a) y JIS Z 2113-63 «Method of Bending Test for Wood» (JIS, 1994b).

Las condiciones del ensayo fueron:

- Un punto central de aplicación de carga
- Aplicación de carga en dirección tangencial (cara radial)
- Velocidad constante de 3 mm/min
- Celda de carga 50 kN
- Distancia entre apoyos de 350 mm (span)

Se utilizó un extensómetro digital (en la línea neutra para medir el desplazamiento) conectado a un amplificador y este al PC de la máquina universal para determinar MOE.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo del MOE y del MOR en pequeñas probetas fueron las siguientes:

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

Donde:

ΔP : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional

l: Distancia entre apoyos inferiores (span)

b: Ancho de la probeta

h: Altura de la probeta

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

$$MOE_{3p} = \frac{3.P.l}{2.b.h^2}$$

Donde:

P: Carga máxima

l: Span

b: Ancho de la probeta

h: Altura de la probeta

Análisis estadístico

El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} + \delta_{ijk} + \gamma_{ijkl}$$

i = 1,2,3 (tratamientos)

j = 1,2 (repeticiones)

Donde:

Y_{ij}: variable de respuesta evaluada en el *i*-ésimo tratamiento y la *j*-ésima repetición

μ : media general

α_i : efecto del *i*-ésimo tratamiento

ε_{ij} : error asociado al *i*-ésimo tratamiento y *j*-ésima repetición

δ_{ijk} : error de submuestreo

γ_{ijkl} : error de la probeta dentro de la troza

Para detectar diferencias entre tratamientos se realizaron los análisis de varianza y un test de TUKEY de comparación de medias a través del programa SAS/STAT.

Resultados y discusión

Los valores de MOE y MOR encontrados en este estudio, son similares a los encontrados por Gonçalves *et al.* (2009) (Cuadros 4 y 5).

Cuadro 4. Media de MOE de tablas de tamaño comercial y probetas libres de defecto por tratamiento.

Tratamiento	Densidad Básica Aparente (g/cm ³)*	MOE tablas (Mpa) *	MOE probetas (Mpa) *
Fuerte	0,425	11059	11283
Medio	0,378	10882	11339
Testigo	0,395	10964	11221
C. V. (%)	19,3	17,8	15,7

* no se observaron diferencias significativas con p valor 0,05.

Cuadro 5. Media de MOR de tablas de tamaño comercial y probetas libres de defecto por tratamiento.

Tratamiento	MOR tablas (MPa) *	MOR probetas (MPa) *
Fuerte	45,9	71,8
Medio	44,6	71,3
Testigo	45,3	72,6
C.V. (%)	22,2	14,2

* no se observaron diferencias significativas con p valor 0,05.

Pérez del Castillo y Venturino (2003), encontraron un valor promedio de MOR de 54 MPa para *E. grandis* en la zona de Río Negro (18 años) y 53 MPa para la zona de Rivera (16 años), origen Bañado de Medina. O'Neill *et al.* (2004), obtuvieron un valor promedio de MOE de 11609 MPa para tablas de tamaño comercial y de 11584 MPa para pequeñas probetas, considerando el promedio de la segunda troza. En el mismo trabajo, obtuvieron un valor para MOR promedio de 49 MPa para tablas, y 81,4 MPa para probetas, en la misma especie y origen considerando el promedio de la segunda troza. En un estudio similar realizado por O'Neill *et al.* (2006) para *E. grandis* de la zona centro del Uruguay, los autores encontraron un valor promedio de MOE de 11588 MPa para tablas de tamaño comercial y de 13266 MPa para pequeñas probetas, considerando el promedio de la segunda troza. En el mismo trabajo para MOR en tablas y probetas en la misma espe-

cie y origen obtuvieron un valor promedio de 42,7 MPa para tablas, y 84 MPa para probetas, considerando el promedio de la segunda troza.

El análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre tratamientos respecto a MOE y MOR, considerando el promedio de las tablas por tratamiento y la ubicación de las mismas. Esto indica que el raleo no tuvo un efecto significativo en el promedio de las tablas, para las propiedades mecánicas ensayadas. Si bien los antecedentes observados para el género son contradictorios entre sí respecto a la influencia de la densidad poblacional sobre el MOE (Warren *et al.*, 2009), los mismos son basados en observaciones realizadas a edades tempranas y medias de la plantación. Estudios realizados por Harris (2007) sugieren que la densidad básica de los árboles dominantes provenientes de plantaciones con densidades poblacionales contrastantes no fue significativa, sin embargo hubo diferencias entre los árboles suprimidos y dominantes independientemente de su densidad de plantación.

Los resultados arrojados por el presente trabajo implicarían en principio que no se generan condicionantes para las propiedades mecánicas analizadas en la toma de decisiones de largo plazo respecto a la severidad de raleo dentro del rango de densidades estudiado, favoreciendo aquellas decisiones que promueven el crecimiento. Sin embargo, estudios complementarios deben ser realizados tomando en cuenta efectos sobre características anatómicas de la madera.

Tomando en cuenta la caracterización de madera realizada por el LATU en base al JAS (Japan Agricultural Standard) un 97,5% de las tablas ensayadas superarían el límite de 7850 MPa de MOE (límite superior de la categoría E70) ubicándolas dentro de la categoría E90 o superior. Esta categorización hace que un 97,5% de las tablas o vigas sean aptas para el uso estructural en la construcción.

Conclusiones

No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos con respecto a MOE y MOR, considerando el promedio de las tablas por tratamiento. Esto indica que el raleo no tuvo un efecto significativo en el promedio de las tablas para las propiedades mecánicas ensayadas (considerando un cinco por ciento de error). Las intervenciones (raleos) realizadas al rodal no influyeron sobre el MOE y MOR medido en probetas libres de defectos. Es necesario complementar este estudio considerando aspectos fisiológicos y las posibles consecuencias sobre los rasgos anatómicos de la madera teniendo en cuenta un rango más amplio de edades.

Bibliografía

- Arango B, Tamayo L. 2008. Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 45: 87-99.
- ASTM. 1998. D 198-98: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. En: Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken: ASTM. pp. 59-77.
- Cruz C, Lima J, Muniz G. 2003. Variações dentro das arvores e entre clones das propriedades físicas e mecânicas da madeira de híbridos de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, 64(1): 34-47.
- Gonçalves F, Silva Oliveira J, Della R, Cardoso R. 2009. Estudo de algumas propriedades mecânicas da madeira de em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, 33(5): 501-509.
- Grabianowski M, Manley B, Walker J. 2004. Impact of stocking and exposure on outerwood acoustic properties of *Pinus radiata* in Eyrewell Forests. *New Zealand Journal of Forestry*, 49: 13-17.
- Harris FC. 2007. The effect of competition on stand, tree, and wood growth and structure in subtropical *Eucalyptus grandis* plantations [Tesis de doctorado]. Lismore: Southern Cross University. 185 p.
- JIS. 1994a. Z 2101-1994 General Rules for Testing Wood. Tokyo: JSA.
- JIS. 1994b. Z 2113-63 Method of Bending Test for Wood. Tokyo: JSA.
- Laserre JP, Mason EG, Watt M. 2004. The influence of initial stocking on corewood stiffness in a clonal experiment of 11-year-old *Pinus radiata* D.Don. *New Zealand Journal of Forestry*, 49: 18-23.
- Lima I. 2010. Variação da densidade aparente e resistência a compressão paralela as fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden. *Revista Árvore*, 34(3): 551-559.
- Lima I, García N. 2005. Influência do desbaste em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. *Revista Instituto Florestal*, 17(2): 151-160.
- O'Neill H, Tarigo F, Cardenas P, Olivera C, Tarigo J, García G. 2006. Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del centro del Uruguay. Montevideo: Dirección General Forestal, Sociedad de Productores Forestales, Asociación de Industriales de la Madera, Facultad de Agronomía, INIA, LATU Sector Productos Forestales. 55p. (Informe; 6).
- O'Neill H, Tarigo F, Iraola P. 2004. Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del norte del Uruguay. Montevideo: Dirección General Forestal, Sociedad de Productores Forestales, Asociación de Industriales de la Madera, LATU Sector Productos Forestales. 44p. (Informe; 4).
- Pérez del Castillo A, Venturino A. 2003. Resumen de propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* de distintas zonas del Uruguay. Montevideo: LATU, JICA. 31p. (Informe de Investigación; 14).
- Silva J. 2003. Influencia dos tratamentos silviculturais na qualidade da Madeira. *Revista da Madeira*, 75: 1-10.
- Wang X, Ross RJ, McClellan M, Barbour MJ, Erickson JR, Forsman JW, McGinnis GD. 2001. Nondestructive evaluation of standing trees with stress wave methods. *Wood and Fiber Science*, 33: 522-533.
- Wang SY, Ko CY. 1998. Dynamic modulus of elasticity and bending properties of large beams of Taiwan-grown Japanese cedar from different plantation spacing sites. *Journal of Wood Science*, 44: 62-68.
- Warren E, Smith RGB, Apiolaza LA, Walker JCF. 2009. Effect of stocking on juvenile wood stiffness for three *Eucalyptus* species. *New Forests*, 37: 241-250.