

---

**Universidad de la República**  
**Centro Universitario Regional Noreste**  
**Sede Tacuarembó**  
**Ingeniería Forestal**

**Evaluación del efecto del sitio de crecimiento sobre las propiedades físicas y mecánicas del *Eucalyptus bosistoana* F. Muell. en Uruguay**

Nombre del autor:  
Mauricio De Carballo

Nombre del tutor:  
Dra. Marcela Ibañez

Nombre del co-tutor:  
Dr. Diego Passarella

Tacuarembó, 8 de setiembre de 2020

## RESUMEN

Las especies con mayor superficie de bosque plantado a nivel comercial en Uruguay son *Eucalyptus grandis*, *E. dunnii*, *E. globulus*, *Pinus taeda* y *P. elliottii*. El *Eucalyptus bosistoana* presenta potencial para su uso en madera sólida. A nivel mundial, el estudio y evaluación de dicha especie es escasa, por eso surge la necesidad de iniciar y profundizar el conocimiento y las oportunidades de utilizar la madera de *E. bosistoana* como materia prima para productos de madera sólida. Uno de los factores que afectan las propiedades de la madera es el sitio de crecimiento.

En este trabajo se plantea la determinación de las propiedades físicas (densidad básica) y mecánicas (flexión estática, compresión paralela a la fibra y dureza) de la madera de *E. bosistoana*. Las muestras serán obtenidas de tres sitios distintos. De cada sitio se disponen de tres trozas basales, de las cuales se extraerán entre dos a cinco probetas para cada tipo de ensayo. Los ensayos estarán basados en normas nacionales e internacionales (UNIT, ASTM y EN). Se empleará un diseño estadístico de muestreo para la extracción y tratamiento de muestras, mediante el cual se evaluará el efecto del sitio de crecimiento, considerado a partir de su clima y suelo, sobre las propiedades de la madera. Por otro lado, se evaluarán las correlaciones entre las propiedades físicas y mecánicas.

Este trabajo es parte de un estudio más amplio para caracterizar la especie *E. bosistoana* en Uruguay. Los resultados obtenidos contribuirán en la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas que se pueden obtener en distintas ubicaciones del territorio nacional.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	4
2. OBJETIVOS	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS	6
4. INSTALACIÓN Y TÉCNICAS DISPONIBLES PARA LA REALIZACIÓN DE LA PROPUESTA	9
5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	9
6. BIBLIOGRAFÍA	10

## 1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A nivel internacional, existen varios estudios sobre las propiedades de la madera del género *Eucalyptus*, aunque la información sigue siendo deficiente o inexistente para varias de las especies y sitios de plantación, este es el caso de *E. bosistoana* [1]. Dentro de los pocos estudios publicados con esta especie, se encuentra la evaluación de la sobrevivencia, contenido de extractivos en el duramen, durabilidad natural, entre otros [2]-[9].

Los estudios sobre el *E. bosistoana* destacan su alta densidad y durabilidad natural. La alta durabilidad es deseable para evitar procesos de impregnación que puedan contener elementos contaminantes que dan lugar a problemas ambientales, como por ejemplo el uso de Arseniato de Cobre Cromado (CCA) [4], [10]. Debido a esto, es recomendable establecer plantaciones forestales con especies naturalmente duraderas y evitar el uso de estos compuestos contaminantes. Cabe mencionar que, el *E. bosistoana* tiene una tasa de crecimiento adecuada, excelente rigidez y alta dureza. Estas características están relacionadas con las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

A nivel nacional, el *E. bosistoana* fue introducido a Uruguay en el año 1959 junto con otras especies para evaluar su adaptabilidad en el país [11]. Existen algunos trabajos con *E. bosistoana* donde se evaluaron la capacidad de brindar abrigo y sombra al ganado [12], [13], encontrándose que tuvo buena sobrevivencia (84%, en basalto), siendo la especie con mejor capacidad para brindar sombra y abrigo, sin embargo, la tasa de crecimiento inicial no es tan rápida como otras especies de *Eucalyptus* evaluadas. El *E. bosistoana* además presenta una buena aptitud melífera.

Hasta el momento existe un único estudio sobre las propiedades físicas y mecánicas de del *E. bosistoana* en Uruguay, donde se estudiaron árboles de 42 años de edad cultivados en la Estación Experimental Bernardo Rosengurtt de Bañado de Medina, Cerro Largo [11]. Los valores de densidad medidos se ubicaron entre 820 y 940 kg/m<sup>3</sup> (densidad aparente básica y corriente al 12 % de humedad, respectivamente), corroborando la alta densidad de esta especie. La resistencia a la compresión paralela al grano resultó de 66,19 N/mm<sup>2</sup>, mientras que de los ensayos de flexión estática se obtuvieron valores de 18.738 N/mm<sup>2</sup> para el MOE (Módulo de elasticidad) y de 146,2 N/mm<sup>2</sup> para el MOR (Módulo de rotura), para un contenido de humedad promedio de 15 % [11]. Resulta importante mencionar que se evaluaron árboles provenientes de solamente un sitio, siendo resultados que necesitan ser corroborados en otros sitios o regiones de Uruguay.

En tanto a la influencia de los factores de crecimiento sobre las propiedades de la madera de *Eucalyptus*, los estudios disponibles en la literatura muestran resultados que reflejan que los efectos son considerables [9]. Se describe la importancia de determinar la correlación entre sitio de crecimiento y propiedades de la madera, donde se menciona que la variación en las propiedades es el resultado de las diferencias en el genotipo de los árboles y los entornos en que crecen las plantas (sitio y clima).

A partir de estos antecedentes, y considerando la necesidad de continuar estudiando esta especie tanto en sus propiedades maderables como en su posible uso a nivel industrial, se plantea evaluar el efecto del sitio sobre las propiedades de la madera de *E. bosistoana*. Para esto, se realizará la caracterización de los distintos sitios donde se tomarán en cuenta las variables clima

y suelo. Los resultados, servirán para conocer la variabilidad de las propiedades físicas y mecánicas de esta especie dentro de Uruguay.

Así mismo, mediante la correlación entre las propiedades, se podrá cuantificar el grado de interdependencia de una propiedad por encima de otra, o establecer la similitud entre un conjunto de propiedades. Y por último, de acuerdo a los valores obtenidos para las distintas propiedades, se podrá indicar los potenciales usos a nivel comercial.

Este trabajo permitirá un enriquecimiento en la formación como futuro profesional ya que engloba distintas áreas de estudio con mayor profundización en la parte silvicultural y de propiedades tecnológicas de la madera. Esta integración es fundamental para adquirir conocimientos que serán provechosos en el ámbito laboral.

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1 Objetivo general:

Estudiar propiedades físicas y mecánicas de madera de árboles de *Eucalyptus bosistoana* F. Muell., cultivados en distintos sitios del Uruguay.

### 2.2 Objetivos Específicos:

1. Estudiar la densidad básica de *E. bosistoana* en individuos provenientes de tres sitios distintos.
2. Caracterizar las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión paralela a la fibra, a la flexión estática y a la dureza) en muestras de madera sin nudos de *E. bosistoana*, obtenidos en tres sitios distintos.
3. Caracterizar los sitios donde fueron cultivadas las muestras en función de las variables clima y suelo.
4. Analizar el efecto del sitio de cultivo con las propiedades físicas y mecánicas del *E. bosistoana*.
5. Estudiar el grado de correlación entre las propiedades físicas y propiedades mecánicas del *E. bosistoana*.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Antes de desarrollar los materiales y métodos a emplear resulta importante aclarar que en este trabajo, como ya fue mencionado, se trabajará con la variable sitio de crecimiento aunque sin considerar explícitamente la edad de los árboles. Esto se debe a que el material disponible no es adecuado para incorporar esta variable en el análisis. No considerar la variable edad implica que la posible variación en los resultados a obtener tendrán una parte que será explicada por la edad de los ejemplares, ya que los árboles tienen una determinada edad por sitio.

De igual manera, este trabajo sigue siendo útil y necesario para generar una base de datos general de las propiedades de la madera de *E. bosistoana* en diversos sitios de Uruguay, ya que como antecedentes existe solamente un estudio relacionado y en un solo sitio.

#### 3.1 Ubicación de los sitios

Los árboles de *E. bosistoana* evaluados correspondían a plantaciones comerciales de tres sitios, la Unidad Experimental INIA “Glencoe” (32°00'25.1"S; 57°08'05.9"O), en Paysandú, y dos localidades de Forestal Oriental - UPM, en Río Negro: El Chajá (32°28'14.17"S; 57°31'21.29" O) y García (32°49'17.04"S; 57°38'07.61"O). De cada sitio fueron extraídos tres árboles, de los cuales, se tomarán entre dos a cinco probetas sin nudos de cada troza basal. Estas probetas serán utilizadas para los ensayos de resistencia a flexión estática y compresión paralela a la fibra, como también para determinar la dureza y densidad de la madera.

#### 3.2 Actividades propuestas para alcanzar los objetivos específicos:

##### 1. Revisión bibliográfica:

Es la primera etapa del trabajo donde se busca información en distintas fuentes como Portal Timbó, revistas internacionales y nacionales, biblioteca de INIA, Google Scholar, entre otros, en tanto a la especie *E. bosistoana* y los estudios que se realizaron en general con un enfoque posterior más específico sobre las propiedades de la madera. También esta etapa consiste en la lectura de las normas a utilizar para los ensayos. Cabe destacar que en el transcurso del trabajo se mantendrá actualizado para un mayor aprovechamiento de la información.

##### 2. Preparación y acondicionamiento de probetas.

De los individuos proporcionados para este trabajo, se cortarán tablas para obtener las probetas sin nudos con las dimensiones correspondientes que se detallan para cada ensayo (según respectiva norma). A las muestras se les medirán el contenido de humedad y a partir de esas mediciones se determinará si requiere secado a estufa. Cabe mencionar, que a las muestras que requerirán secado en estufa, la temperatura será moderada (30-40 °C) para conservar la estabilidad dimensional e integridad de las muestras. Las probetas serán acondicionadas a 25 °C y 65% de humedad relativa ambiente, de tal manera de alcanzar el mismo contenido de humedad en todas ellas. Los ensayos a realizar están normalizados a las condiciones que se especifican en las normas ASTM D143 [14], D2395 [15] y D4761 [16].

##### 3. Propiedades físicas:

**Densidad:** Muestras de 50 x 50 x 150 mm según ASTM D2395 [15]. Se deben medir las dimensiones y la longitud real de la sección transversal. Determinaciones con aproximadamente un 12% de contenido de humedad y en condiciones de secado al horno. El procedimiento consiste en pesar la muestra en estado verde y determinar su volumen por inmersión. Luego se seca en horno a 103 °C hasta peso constante. Después de secar en el horno, se pesan las muestras y

mientras aún estén calientes, se sumergen en un baño de parafina caliente y se retira rápidamente para asegurar una capa delgada. Por último, se determina el volumen de la muestra recubierta de parafina por inmersión.

#### 4. Propiedades mecánicas:

Resistencia a la flexión estática: la norma que se utiliza como referencia es la ASTM D4761 [16]. Las dimensiones de las probetas serán de 25x25x410 mm. El ensayo será de flexión en tres puntos. La velocidad de aplicación de carga será de 1,3 mm/min. Estos ensayos se realizarán en el Laboratorio de Materiales de Facultad de Ingeniería (FING).

Resistencia a la compresión paralela a la fibra: Como lo describe la norma ASTM D143 [14], las probetas deben tener dimensiones de 25x25x100 mm. La velocidad de prueba es de 0.3 mm/min. Se utilizará la máquina de ensayos Shimadzu AGS-100 en laboratorios del CUT, al igual que los ensayos de dureza.

Se tendrá especial cuidado al preparar las muestras de prueba de compresión paralela a la fibra para garantizar que las superficies de la fibra sean paralelas entre sí y en ángulo recto con el eje longitudinal.

Dureza: Según norma ASTM D143 [14], las probetas deben tener dimensiones de 50 x 50 x 150 mm, con una velocidad de prueba de 6 mm/min la cual se debe aplicar continuamente durante toda la prueba.

Para la prueba se utiliza una esfera de 11.3 mm de diámetro. El área proyectada de la bola en la muestra de prueba es de 1 cm<sup>2</sup>. Se registra la carga a la que la bola ha penetrado hasta la mitad de su diámetro.

Se realizarán dos penetraciones en una superficie tangencial, dos en una superficie radial y una en cada extremo. La elección entre las dos superficies radiales y entre las dos superficies tangenciales será tal que dé un promedio razonable de la pieza. Las penetraciones deben estar lo suficientemente alejadas del borde para evitar la fractura o astillado.

#### 5. Caracterización de sitios

Para una adecuada caracterización de los sitios se deben tomar en cuenta características propias de cada región las cuales se resumen en el clima y suelo. Estas son los dos elementos fundamentales para lograr una caracterización precisa. En el clima, los datos a considerar son: temperaturas (medias mensual/anual), precipitaciones (medias mensual/anual), radiación, entre otras; aunque las dos primeras son las de mayor importancia. En tanto al suelo, se debe considerar las pendientes, la formación geológica característica, retención potencial de agua, la cual da una idea de cuánta agua se almacena considerando textura y estructura del suelo, índices CONEAT, etc.

Para realizar esta caracterización de los sitios de donde provienen los árboles a ensayar, se utilizarán artículos, revistas, estudios y plataformas de visualización. La información relacionada con el suelo (formación geológica, pendientes, tipos de suelos, etc) se utilizarán herramientas como el visor CONEAT del MGAP [17] y el visor del MVOTMA [18], además de otras herramientas como Google Earth Pro [19] y QGIS [20]. En tanto a la capacidad de retención de agua, se utilizará el mapa de agua potencialmente disponible en el suelo, de Califra y Molfino [21]. Por otro lado, para las variables del clima (como precipitaciones y temperaturas medias) se

utilizarán los datos de las estaciones de INIA de las zonas correspondientes a los sitios y el documento de Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009 [22], entre otros.

## 6. Análisis de resultados:

A partir de los ensayos se procederá al análisis de los mismos. Para esto, se cuenta con el asesoramiento de la Licenciada en Estadística (Mag.) Natalia Berberian. Para determinar si existe o no un efecto del sitio de crecimiento sobre las propiedades, se realizará el siguiente análisis estadístico. Se plantea definir como unidad muestral al árbol y como unidad de submuestreo a las probetas en cada uno de los árboles.

Se asume que la variable densidad depende del sitio, del árbol ubicado en cada sitio y en particular de las probetas analizadas. Entonces, se propone el siguiente modelo estadístico:

$$y_{ijk} = \mu + S_i + \underline{R_j} + \underline{M_{k(j)}} + \varepsilon_{ijk}$$

Siendo:  $y_{ijk}$  la variable densidad,  $\mu$  la media general,  $S_i$  un efecto fijo asociado al sitio  $i$ -ésimo,  $\underline{R_j}$  el efecto aleatorio de la repetición  $j$ -ésima de los árboles de un sitio,  $\underline{M_{k(j)}}$  el efecto aleatorio de la determinación (submuestra)  $k$ -ésima anidada en la  $j$ -ésima repetición de árbol y  $\varepsilon_{ijk}$  el error experimental asociado a cada unidad y se asume  $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma_\varepsilon^2)$

La densidad puede ser considerada como una variable explicativa de las restantes variables de interés (resistencia a la flexión estática, compresión paralela a la fibra y dureza), por lo tanto se incluirá como un componente adicional en el modelo de análisis:

$$y_{ijk} = \mu + S_i + \underline{R_j} + \underline{M_{k(j)}} + D_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Siendo:  $y_{ijk}$  la variable de respuesta de interés,  $\mu$  la media general,  $S_i$  un efecto fijo asociado al  $i$ -ésimo sitio,  $\underline{R_j}$  el efecto aleatorio de la repetición  $j$ -ésima de los árboles de un sitio,  $\underline{M_{k(j)}}$  el efecto aleatorio de la determinación (submuestra)  $k$ -ésima anidada en la  $j$ -ésima repetición de árbol,  $D_{ijk}$  es el efecto fijo de la densidad de cada unidad y  $\varepsilon_{ijk}$  el error experimental asociado a cada unidad y se asume  $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma_\varepsilon^2)$

Para estudiar una posible asociación entre las propiedades estudiadas se trabajará con el modelo de regresión lineal general que relaciona las variables a través de una función polinomial, como se presenta en la siguiente forma:

$$y_i = f(X_i, \beta) + \varepsilon_i$$

Siendo:  $f(X_i, \beta)$  cualquier función que pueda vincular las variables de interés.

Para una mejor visualización e interpretación de los resultados obtenidos, se realizarán gráficos de dispersión para analizar la correlación entre las propiedades estudiadas.

## 7. Redacción de informe

La última etapa del trabajo es la redacción del informe el cual detallará los resultados obtenidos, su discusión y las respectivas conclusiones, además de todo lo referido a antecedentes, técnicas, procedimientos, entre otros. Que aquí se presentaron. Los resultados podrán eventualmente ser presentados en congresos y reuniones científicas durante el desarrollo de este trabajo.



#### 4. INSTALACIÓN Y TÉCNICAS DISPONIBLES PARA LA REALIZACIÓN DE LA PROPUESTA

Ya se dispone de las trozas basales a estudiar. El corte y preparación de probetas será realizado en talleres de INIA o contratando a carpinterías, de acuerdo a necesidad.

Los procedimientos para acondicionar las probetas se realizarán en Laboratorios de la Sede Tacuarembó (CENUR-NORESTE), donde también se realizarán los ensayos de resistencia a la compresión paralela a la fibra con la utilización de la máquina Shimadzu AGS-100, además de los ensayos para determinar densidad y dureza. Por otro lado, los ensayos de resistencia a flexión estática, se llevarán a cabo en Laboratorios de Materiales de la Facultad de Ingeniería (FING) en Montevideo.

Los laboratorios anteriormente mencionados, cuentan con cámaras de acondicionamiento con temperatura y humedad del aire controladas, estufas de secado, balanzas analíticas, entre otros elementos complementarios para llevar a cabo los ensayos.

#### 5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividades	Período	Meses								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Revisión bibliográfica		X	X						X	X
Preparación y acondicionamiento de probetas			X	X	X					
Ensayos Props. Físicas					X	X				
Ensayos Props Mecánicas					X	X	X	X		
Caracterización de sitios		X	X	X	X					
Análisis de resultados					X	X	X	X		
Redacción del Informe									X	X

**Fecha estimada de finalización del trabajo final:** 15/05/2021

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Høibø and G. I. Vestøl, “Modelling the variation in modulus of elasticity and modulus of rupture of scots pine round timber,” *Can. J. For. Res.*, vol. 40, no. 4, pp. 668–678, 2010, doi: 10.1139/X10-021.
- [2] I. Nicholas and P. Millen, “Durable Eucalypt Leaflet Series *Eucalyptus bosistoana* Why grow durable eucalypts? Natural distribution in Australia Australian and New Zealand grown wood characteristics,” no. December, 2012.
- [3] Burgess, Jack. “Genetic Parameter Estimates for Growth Traits At Different Ages” 2015. University of Canterbury
- [4] Y. Li and C. Altaner, “Screening *Eucalyptus bosistoana* for heartwood,” *Spec. Wood Products Res. Partnersh.*, vol. New Zealan, no. August, 2016.
- [5] G. Mishra, D. A. Collings, and C. M. Altaner, “Physiological changes during heartwood formation in young *Eucalyptus bosistoana* trees,” *IAWA J.*, vol. 39, no. 4, pp. 382–394, 2018, doi: 10.1163/22941932-20170210.
- [6] Y. Li, L. A. Apiolaza, and C. Altaner, “Genetic variation in heartwood properties and growth traits of *Eucalyptus bosistoana*,” *Eur. J. For. Res.*, vol. 137, no. 4, pp. 565–572, 2018, doi: 10.1007/s10342-018-1125-0.
- [7] S. Salekin, E. G. Mason, J. Morgenroth, M. Bloomberg, and D. F. Meason, “Modelling the effect of microsite influences on the growth and survival of juvenile *Eucalyptus globoidea* (Blakely) and *Eucalyptus bosistoana* (F. Muell) in New Zealand,” *Forests*, vol. 10, no. 10, 2019, doi: 10.3390/f10100857.
- [8] C. Altaner and M. Sharma, “Technical Report Heartwood in *Eucalyptus bosistoana* Authors :,” no. March, 2019.
- [9] M. F. V. Rocha, T. R. L. A. Veiga, B. C. D. Soares, A. C. C. de Araújo, A. M. M. Carvalho, and P. R. G. Hein, “Do the growing conditions of trees influence the wood properties?,” *Floresta e Ambient.*, vol. 26, no. 3, 2019, doi: 10.1590/2179-8087.035318.
- [10] T. G. Townsend, H. Solo-Gabriele, T. Tolaymat, and K. Stook, “Impact of chromated copper arsenate (CCA) in wood mulch,” *Sci. Total Environ.*, vol. 309, no. 1–3, pp. 173–185, 2003, doi: 10.1016/S0048-9697(03)00047-0.
- [11] C. Mantero, H. O'Neill, A. Cardoso, and A. Castagna, “Propiedades físicas y mecánicas de la madera de una población de *Eucalyptus bosistoana* F. Muell. cultivada en Uruguay,” *Agrociencia Uruguay*, vol. 18, no. 1, pp. 65–74, 2014, doi: 10.2477/vol18iss1pp65-74.
- [12] G. Balmelli and F. Resquin, “Comportamiento de especies de *Eucalyptus* para sombra y abrigo en suelos sobre basalto,” *Rev. INIA*, pp. 25–27, 2005.
- [13] G. Balmelli and F. Resquin, “Evaluación productiva de especies de *Eucalyptus* en Zona 9, a los 13 años,” *INIA Ser. Act. Difusión*, vol. 535, pp. 9–12, 2008, [Online]. Disponible: [http://www.ainfo.inia.uy/consulta/busca?b=pc&id=8091&biblioteca=vazio&busca=forestacion&qFacets=\(forestacion\)](http://www.ainfo.inia.uy/consulta/busca?b=pc&id=8091&biblioteca=vazio&busca=forestacion&qFacets=(forestacion))

- [14] ASTM D143, “American Society for Testing and Materials- ASTM. D143-94: Standard methods of testing small clear samples of timber,” Am. Soc. Test. Mater. - ASTM. Annu. B. ASTM, vol. 94, no. Reapproved, p. 31, 1994, doi: 10.1520/D0143-09.2.
- [15] ASTM D2395-02, “Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials,” Test, vol. 93, no. Reapproved, pp. 1–9, 2008, doi: 10.1520/D2395-07AE01.2.
- [16] ASTM D4761, “Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural,” Test, vol. 30, no. 1, pp. 14–22, 2011, doi: 10.1520/D4761-13.2.
- [17] Visualizador de RENARE. Consultado: 5/09/20. Disponible en: <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/coneat/>
- [18] Visualizador de MVOTMA. Sistema de Información Ambiental. Consultado: 5/09/20. Disponible en: <https://www.dinama.gub.uy/visualizador/>
- [19] Google Earth. Consultado: 5/09/20. Disponible en: [https://www.google.es/intl/es\\_es/earth/](https://www.google.es/intl/es_es/earth/)
- [20] QGIS (Software Libre). Consultado: 5/09/20. Disponible en: <https://qgis.org/es/site/about/index.html>
- [21] J. H. Molfino & A. Califra, “Agua disponible de las tierras del Uruguay”. Segunda aproximación. División Suelos y Aguas. MGAP. 2001.
- [22] J. Castaño-Sánchez, M. Ceroni, J. Furest, R. Aunchayna, M. Bidegain. (2011). Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009. INIA. Serie Técnica N° 193. 34 p.