

# Propiedades físicas y potencial de aprovechamiento de la madera de *Eucalyptus urophylla × E. camaldulensis* en función de la altura del fuste

## Physical properties and utilization potential of *Eucalyptus urophylla × E. camaldulensis* wood as a function of stem height

Laura Patricia Chaparro Aguilera<sup>1,2\*</sup>, Ulises Riveros Insfrán<sup>1</sup>, Delia Ramírez Haedo<sup>1</sup>, Felicia Zárate Céspedes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

<sup>2</sup>Sistema Nacional de Investigadores de Paraguay, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Asunción, Paraguay.

### RESUMEN

Las plantaciones forestales con el género *Eucalyptus* se encuentran ampliamente difundidas debido a la versatilidad de las especies e híbridos derivados agrupados en este taxón. Paraguay posee más de 200.000 hectáreas plantadas, predominantemente con eucalipto, y la industria forestal nacional emplea como materia prima un elevado porcentaje de madera proveniente de especies exóticas. Para optimizar el aprovechamiento de estos recursos forestales, es fundamental caracterizar las propiedades físicas de la madera según su posición en el fuste. Con el objetivo de determinar las propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus urophylla × E. camaldulensis* a diferentes alturas del fuste y establecer su potencial de aprovechamiento, se obtuvieron muestras de madera al 25, 35, 45 y 55% de la altura total de individuos de siete años provenientes de una plantación comercial de Caazapá. Se determinó el contenido de humedad según norma UNE EN 13183-1, el peso específico aparente verde y básico según norma NP núm. 115, y el coeficiente de anisotropía según norma NP núm. 116. El ANOVA al 5% de significancia y el análisis de regresión demostraron que el nivel de altura de muestreo fue significativo para el coeficiente de anisotropía y el peso específico aparente básico, respectivamente. Estos hallazgos sugieren que la madera puede ser clasificada para su aprovechamiento en la industria de la celulosa y en productos estructurales según la altura de obtención del material.

**Palabras claves:** densidad, contenido de humedad, industria forestal, Eucalipto, anisotropía.

### ABSTRACT

Forest plantations with the *Eucalyptus* genus are widely distributed due to the versatility of species and derived hybrids grouped in this taxon. Paraguay has more than 200,000 hectares planted, predominantly with eucalyptus, and the national forest industry uses a high percentage of wood from exotic species as raw material. To optimize the utilization of these forest resources, it is essential to characterize the physical properties of wood according to its position in the stem. With the objective of determining the physical properties of *Eucalyptus urophylla × E. camaldulensis* wood at different stem heights and establishing its utilization potential, wood samples were obtained at 25, 35, 45, and 55% of the total height from seven-year-old individuals from a commercial plantation in Caazapá. Moisture content was determined according to UNE EN 13183-1 standard, green and basic apparent specific weight according to NP No. 115 standard, and anisotropy coefficient according to NP No. 116 standard. ANOVA at 5% significance and regression analysis demonstrated that the sampling height level was significant for the anisotropy coefficient and basic apparent specific weight, respectively. These findings suggest that wood can be classified for utilization in the pulp industry and in structural products according to the height of material extraction.

**Keywords:** density, moisture content, forest industry, eucalyptus, anisotropy.

\*Autor para correspondencia:  
[laura.chaparro@agr.una.py](mailto:laura.chaparro@agr.una.py)

**Conflictos de interés:**  
No existe ningún tipo de conflicto a declarar.

**Contribución de autores:**  
Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales a la concepción y diseño de este estudio, al análisis e interpretación de los datos, revisión del manuscrito y aprobación de la versión final. Todos los autores asumen la responsabilidad del contenido del manuscrito.

**Financiamiento:**  
Ninguna.

**Disponibilidad de datos:**  
Todo el conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio está disponible mediante solicitud al autor de correspondencia. El conjunto de datos no está públicamente disponible dada su confidencialidad.

**Historial:**  
Recibido: 23-05-2025;  
Aceptado: 01-10-2025;  
Publicado: 12-12-2025.

**Editor responsable:**  
Arnaldo Esquivel-Fariña   
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

**Licencia:**  
Artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0

## INTRODUCCIÓN

En el mundo, se disponen de 4.060 millones de hectáreas de bosque, de las cuales 131 millones corresponden a plantaciones forestales. Sudamérica posee la mayor superficie de plantaciones donde predominan especies introducidas (FAO, 2020). Las especies del género *Eucalyptus* son nativas de Australia y ampliamente cultivadas en América del Sur. La madera de estas especies y sus híbridos poseen cualidades que permiten su utilización como materia prima en la industria papelera, constructora, energética (carbón, leña) (Telles et al., 2018). Ciertas especies son ampliamente utilizadas para la extracción de aceites esenciales a partir de sus hojas, con aplicaciones medicinales, industriales y en perfumería (Vitti y Brito, 2003). La madera del híbrido *Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis* se destaca por sus usos con fines energéticos (Fioravante Reis y Paludzyszyn Filho, 2011; Barreiros, Ribeiro, Dias, Gouvea, Reis y Silva, 2021), por lo que es objeto de estudios de caracterización de sus propiedades físicas y químicas considerando factores como la edad de las plantaciones y del sitio, entre otros.

La madera posee determinadas propiedades, que se agrupan en químicas, anatómicas, físicas y mecánicas. El conocimiento de estas permite una adecuada clasificación en función del uso final que se le desea conferir al material. Las propiedades físicas se agrupan en contenido de humedad, peso específico (real y aparente), hinchamiento, contracción, entre otras (Suirezs y Berger, 2009). La determinación y el conocimiento de estas propiedades es fundamental, especialmente en plantaciones jóvenes debido a la necesidad de aprovechar la materia prima en estadios tempranos para obtener diversos tipos de productos o a fin de evaluar la incidencia del espaciamiento de las plantaciones en la madera, entre otros factores (Hsing, Paula y Paula, 2016).

Entre las propiedades físicas más importantes para la caracterización de la madera se encuentran la contracción, la densidad y el contenido de humedad. La contracción es la disminución del volumen de madera al perder el agua higroscópica, por debajo del punto de saturación de las fibras, hasta el estado anhidro. Es un parámetro que permite conocer la estabilidad dimensional de la materia prima en sus planos de corte (tangencial, longitudinal y radial), así como el coeficiente de retráctilidad o contracción de la madera (Suirezs y Berger, 2009). El valor de la variación dimensional de los planos tangenciales y radiales de la madera es utilizado para calcular el coeficiente de anisotropía del material. El coeficiente se asocia a una escala que permite clasificar la madera de acuerdo con su tendencia a sufrir deformaciones y grietas, cualidades de interés de acuerdo al uso que se otorgará al material (Calvo et al., 2007).

Por otro lado, el peso específico o densidad es una de las cualidades más importantes de la madera; a partir de esta es posible clasificar la materia prima en madera pesada, liviana o muy liviana, lo que a su vez se traduce en la capacidad de trabajabilidad de esta. Además, esta propiedad está estrechamente asociada con otras características físicas y mecánicas de la madera, lo que sugiere la calidad o el uso que se le puede atribuir

al material (Suirezs y Berger, 2009). La densidad de la madera, así como otras propiedades, se ve influenciada por el sitio en el cual se desarrolla la especie (Labbé, Droppelmann, Balocchi y Peredo, 2013); incluso en una misma especie, estas características pueden expresarse de diferente manera como consecuencia de la variación del sitio de cultivo (Calvo et al., 2007).

El contenido de humedad de la madera es la cantidad de agua que constituye su estructura. Es una cualidad que influye en la materia prima en términos de calidad, aplicaciones y comportamiento de la madera ante eventos como la resistencia al ataque de agentes biológicos, sus propiedades físicas y mecánicas, la elaboración de productos y rendimiento de celulosa, entre otros (Suirezs y Berger, 2009).

Según datos publicados en el año 2021 por el Instituto Forestal Nacional (INFONA), Paraguay posee una extensión de 206.470,33 hectáreas de plantaciones, predominantemente de especies del género *Eucalyptus*. El mismo ente refiere, en datos relativos al censo de industrias forestales del año 2022, que el mayor porcentaje de materia prima utilizada proviene de especies exóticas, con 68% del total y el resto corresponde a especies nativas con diversas aplicaciones. Estos datos respaldan la importancia del conocimiento de las propiedades tecnológicas de la madera para su aprovechamiento comercial óptimo.

El conocimiento de las propiedades físicas de una especie cultivada en un sitio específico permite orientar sus usos y aplicaciones en el desarrollo de nuevos productos, así como la toma de decisiones silviculturales para maximizar el beneficio económico de las plantaciones según su localización. En este contexto, y considerando la importancia del eucalipto en Paraguay, el objetivo de la investigación fue determinar las propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis* a diferentes alturas del fuste y establecer su potencial de aprovechamiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un rodal puro coetáneo de *Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis*, denominado comercialmente como VM01 e instalado en el año 2015. El rodal se encuentra ubicado en la estancia Curuzú, distrito de Coronel Maciel, departamento de Caazapá, Paraguay, donde la temperatura mínima media anual es de 21,8 °C y la máxima de 40,6 °C; la humedad relativa media de 70,5% y la precipitación de 1.495 mm/año (DINAC, 2022). La densidad inicial de plantación fue de 1.315 árboles ha<sup>-1</sup>, con un espaciamiento de 4 m × 1,9 m, manejados con la finalidad de producción de biomasa energética sin podas ni raleos.

Se obtuvieron los valores del diámetro a la altura del pecho (DAP) medidos en 675 árboles del rodal (Tabla 1). Los datos fueron registrados en la aplicación Inventree®, exportados a formato Excel para su procesamiento y agrupados para la determinación de la distribución de frecuencias y clases diamétricas. Conforme a estos datos, fueron talados seis individuos de *E. urophylla* × *E. camaldulensis* representativos de diferentes clases diamétricas.

**Tabla 1.** Variables dendrométricas iniciales de los individuos de *Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis* VM01 seleccionados para el estudio. Caazapá, 2022.

Individuos	1	2	3	4	5	6
DAP (cm)	18,1	17,4	18,6	11,6	21,3	18,8
Altura total (m)	22,50	22,4	23,4	16,5	21,35	23,6
Clases diamétricas						
[LI – LS]	11,4 – 13,4		15,6 – 19,7		19,8 – 21,8	
(cm)		11,6		18,2		21,3
Fr (%)		8		48		1,2

Donde: DAP: diámetro a la altura del pecho, ht: altura total, LI: límite inferior, LS: límite superior, Fr: frecuencia relativa

**Tabla 2.** Descripción del diseño experimental de parcelas divididas. Caazapá, 2022.

Diseño	Completamente al azar en parcelas divididas	
Factor	Nivel	Descripción
<b>Parcela principal</b>		
Material genético	<i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	6 individuos evaluados
<b>Subparcela</b>		
Posición longitudinal	4 niveles	Porcentaje de la altura total del fuste (%ht)
	Nivel 1	25%
	Nivel 2	35%
	Nivel 3	45%
	Nivel 4	55%

Se utilizó un diseño completamente al azar dispuesto en parcelas divididas. La Tabla 2 presenta la descripción del experimento.

De cada individuo se extrajeron secciones transversales de acuerdo al método de división del fuste según Hohenadl (Prodan, Peters, Cox, y Real, 1997) en las proporciones establecidas de la altura total de cada árbol en metros. Las muestras fueron identificadas y codificadas en campo, embaladas y remitidas al Laboratorio de Calidad de Madera y Derivados de la Carrera de Ingeniería Forestal, FCA/UNA. En carpintería, las rodelas fueron descortezadas y preparadas, tras lo cual se extrajeron las probetas para las determinaciones analíticas correspondientes.

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado para cada parámetro evaluado, utilizando una balanza analítica Shimadzu UX6200H con precisión de 0,01 g.

#### Determinación del peso específico aparente verde y básico

Se determinó según norma paraguaya NP núm. 115 (Maderas: Método de determinación del peso específico aparente) (INTN, 1974). El volumen se determinó por el método de inmersión en agua. El peso específico aparente verde se calculó empleando la ecuación (1):

$$P_E = \frac{P_s}{V_s} \quad (1)$$

Siendo

$P_E$ : Peso específico aparente verde ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$P_s$ : Peso de la probeta en estado verde (g)

$V_s$ : Volumen de la probeta en estado verde o saturado ( $\text{cm}^3$ )

Una vez determinado el volumen de las probetas en estado verde, estas fueron colocadas en estufa a temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , hasta la obtención del peso constante, para el cálculo del peso específico aparente básico fue utilizada la ecuación (2):

$$P_{Eb} = \frac{P_a}{V_s} \quad (2)$$

Siendo

$P_{Eb}$ : Peso específico aparente básico ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$P_a$ : Peso de la probeta en estado anhidro (g)

$V_s$ : Volumen de la probeta en estado verde o saturado ( $\text{cm}^3$ )

#### Determinación de la humedad por el método de secado en estufa

Se realizó según norma europea UNE EN 13183-1 (Determinación de contenido de humedad en madera aserrada por el método de secado en estufa), aplicando la ecuación (3):



$$\omega = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

Siendo:

$\omega$ : Contenido de humedad expresado en %

$m_i$ : masa inicial de la probeta (g)

$m_0$ : masa anhidra de la probeta (g)

### Determinación de coeficiente de anisotropía de la contracción

Para la determinación del coeficiente de anisotropía, fueron extraídos de las secciones transversales prismas rectangulares en los cuales se identificaron los planos tangenciales, radiales y longitudinales. Se empleó la norma paraguaya NP núm. 116 (Maderas: Método de determinación de contracción) (INTN, 1974).

La contracción tangencial total se calculó según la ecuación (4):

$$C_{tt} = \frac{dvt - dsht}{dvt} \times 100 \quad (4)$$

Siendo

$C_{tt}$ : Contracción tangencial en estado verde ( $CH > 30\%$ ) al estado anhidro ( $CH = 0\%$ ), en porcentaje

$d_{vt}$ : Dimensión tangencial en estado verde ( $CH > 30\%$ ) (cm).

$d_{sht}$ : Dimensión tangencial en estado anhidro (cm).

La contracción radial total se calculó según la ecuación (5)

$$C_{rt} = \frac{dvr - dshr}{dvr} \times 100 \quad (5)$$

Siendo

$C_{rt}$ : Contracción en el sentido radial en estado verde ( $CH >$

$30\%$ ) al estado anhidro ( $CH = 0\%$ ), en porcentaje

$d_{vr}$ : Dimensión radial de la probeta en estado verde ( $CH > 30\%$ ) (cm).

$d_{shr}$ : Dimensión radial en estado anhidro (cm).

Con los valores de contracción radiales y tangenciales fue calculado el coeficiente de Anisotropía (Ac) con la ecuación (6):

$$Ac = \beta_t / \beta_r \quad (6)$$

Siendo

$Ac$  = Anisotropía de la contracción

$\beta_t$  = Contracción tangencial

$\beta_r$  = Contracción radial

El procesamiento de datos se realizó utilizando el software estadístico InfoStat®. Los datos se sometieron a las pruebas F y t, así como al análisis de varianza ANOVA. Cuando se identificó interacción entre los factores (posición longitudinal y clasificación diamétrica), se compararon mediante la prueba de Tukey. Se propusieron modelos de regresión para aquellos parámetros que presentaron diferencias significativas respecto al porcentaje de altura del fuste, considerando un nivel de significancia del 5%.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las propiedades físicas evaluadas, analizando los efectos de la altura de muestreo sobre cada parámetro y discutiendo sus implicaciones para el aprovechamiento potencial de la madera.

#### Determinación del peso específico aparente verde

El análisis de la varianza para el parámetro peso específico aparente verde se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Promedios de Peso específico aparente verde ( $g \text{ m}^{-3}$ ) en muestras de madera de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus camaldulensis* de 7 años. Caazapá, 2022.

Clases diamétricas A [LI – LS]	Nivel de altura (% altura total) B				Promedio total o marginal
	25	35	45	55	
11,4 – 13,4	1269,59 a	1329,69 a	1264,76 a	1357,04 a	1305,27 A
15,6 – 19,7	1012,55 a	1021,22 a	1031,11 a	1039,77 a	1026,16 A
19,8 – 21,8	1083,22 a	1119,31 a	1119,2 a	1128,8 a	1112,63 A
Tratamientos	Valor F (5%)	Contrastes	Valor F (5%)	Regresión	Valor T (5%)
A	23,23*	Lineal	F=2,34 ns	Constante	ns
B	1,24 <sup>ns</sup>	Cuadrático	F=2,1x10 <sup>-3</sup> ns	Pendiente	ns
A*B	0,39 <sup>ns</sup>	Cúbico	F=1,37 <sup>ns</sup>		
CV(%)	5,42				

Obs.: Medias con letras mayúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para comparaciones de medias entre clases diamétricas.

Medias con letras minúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para interacciones Clases diamétricas y Nivel de altura (% altura total).

LI: Límite inferior de la clase diamétrica. LS: Límite superior de la clase diamétrica. A: Factor clase diamétrica. B: Factor altura.

AB: Interacción entre factores. Valor F: Estadístico de prueba. Valor T: Estadístico de prueba.

"ns": no significativo.

\*: significativo.

CV (%): coeficiente de variación del modelo de ANOVA.

## Determinación del peso específico aparente básico

Según el ANOVA, el factor altura de muestreo mostró efecto significativo sobre el peso específico aparente básico; el análisis de contrastes se presenta en la Tabla 4.

El análisis de regresión para el factor nivel de altura se presenta en la Figura 1.

La recta representa una relación directa entre la altura del fuste y el peso específico aparente básico de la madera. Es decir, por cada 10% de incremento en la altura del individuo, el peso específico aparente básico presentará un patrón de aumento de 12,6 g cm<sup>-3</sup>. Un patrón de incremento longitudinal similar fue observado por Labbé et al. (2013) en maderas de *E. globulus*, donde observaron

un incremento de la densidad desde la base hasta el ápice de los individuos estudiados, hallazgo coherente con los resultados de este trabajo.

Suirezs y Berger (2009) determinaron una clasificación de las maderas de acuerdo con rangos de densidades aparentes básicas, considerando maderas livianas a aquellas con densidades comprendidas entre 351 y 550 g cm<sup>-3</sup>, y maderas semipesadas a aquellas con densidades entre 551 y 750 g cm<sup>-3</sup>. De acuerdo con estos autores y con los valores obtenidos en este trabajo, se podría clasificar la madera de *Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis* obtenida en la zona de Caazapá como madera liviana a semipesada, resultado que concuerda con lo reportado en la bibliografía para otras especies de eucalipto (Monteoliva, Barotto y Fernández, 2015; Gauna et al. 2022).

**Tabla 4.** Promedios de Peso específico aparente básico (kg m<sup>-3</sup>) en muestras de madera de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis* de 7 años. Caazapá, 2022.

		Nivel de altura (% altura total) B				Promedio total o marginal
Clases diamétricas A [LI – LS]		25	35	45	55	
11,4 – 13,4	574,54 a	567,06 a	592,26 a	620,33 a	588,55 A	
15,6 – 19,7	487,01 b	479,84 b	497,88 b	518,9 b	495,91 B	
19,8 – 21,8	513,84 b	530,24 b	532,07 b	547,56 b	530,93 B	
Tratamientos	Valor F (5%)	Contrastes	Valor F (5%)	Regresión	Valor T (5%)	
A	15,79*	Lineal	F=11,97*	Constante	10,66*	
B	4,55*	Cuadrático	F=1,64 <sup>ns</sup>	Pendiente	1,15 <sup>ns</sup>	
A*B	0,32 <sup>ns</sup>	Cúbico	F=0,05 <sup>ns</sup>			
CV(%)	4,55	r <sup>2</sup> =0,1162				

Obs.: Medias con letras mayúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para comparaciones de medias entre clases diamétricas.

Medias con letras minúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para interacciones Clases diamétricas y Nivel de altura (% altura total).

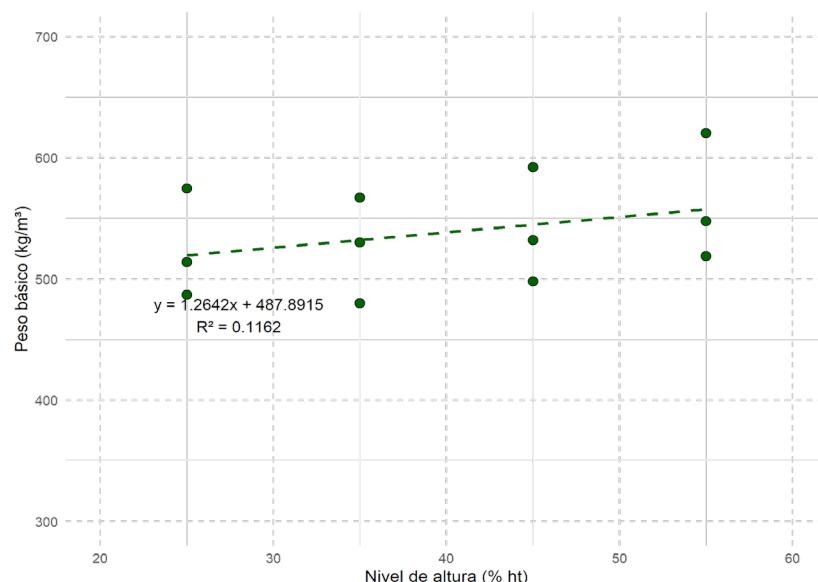
LI: Límite inferior de la clase diamétrica. LS: Límite superior de la clase diamétrica. A: Factor clase diamétrica. B: Factor altura.

AB: Interacción entre factores. Valor F: Estadístico de prueba. Valor T: Estadístico de prueba.

"ns": no significativo.

\*: significativo.

CV (%): coeficiente de variación del modelo de ANOVA.



**Figura 1.** Regresión de la variable peso específico aparente básico en función a la altura del fuste de individuos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis* de 7 años. Caazapá, 2022.

El peso específico aparente básico, o densidad básica, es una propiedad importante para catalogar la calidad de la biomasa energética (Brun et al., 2018; da Cunha et al., 2021). Los trabajos de caracterización con fines de aprovechamiento energético están bien desarrollados en eucalipto; tal es así que Brun et al. (2018) evaluaron este parámetro en la madera de tres materiales genéticos de *Eucalyptus* sp. de 4,5 años de edad, obteniendo valores de 490, 500 y 550 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente.

Barbosa et al. (2023) determinaron un valor medio de 483 g cm<sup>-3</sup> para la madera de *E. urophylla* × *E. camaldulensis* de seis años de edad bajo manejo de rebrotes. Quinhones (2011) evaluó las características físicas de la madera de *E. urophylla* × *E. camaldulensis* de siete años de edad, obteniendo una media de 560 g cm<sup>-3</sup> para el peso específico aparente básico del material; por su parte, Barreiros et al. (2021) obtuvieron un promedio de 492 g cm<sup>-3</sup> para clones del mismo híbrido de edad media de siete años, clasificando la madera como apropiada para fines energéticos. Lima et al. (2020) evaluaron dicha propiedad en clones de *Eucalyptus* spp. y sugirieron que materiales con densidades mayores a 500 g cm<sup>-3</sup> son ideales para la producción de carbón. Los valores de 588,55, 495,91 y 530 g cm<sup>-3</sup> obtenidos son coherentes con la literatura disponible.

Es importante mencionar que a mayor peso específico aparente básico se espera mayor poder de combustión; sin embargo, elevadas densidades básicas de la madera ocasionan mayores dificultades en el proceso inicial de quema directa del combustible, por lo que se sugiere un intervalo de densidades comprendido entre 650 y 800 g cm<sup>-3</sup> para maderas medias a duras (Barreiros et al., 2021). A criterio similar llegaron Protásio et al. (2021) a partir de estudios de parámetros de calidad de la madera de *Eucalyptus* spp., concluyendo que maderas con densidades básicas menores o iguales a 500 g cm<sup>-3</sup> no son recomendables como materia prima para la obtención de carbón con fines siderúrgicos.

Por otro lado, en la evaluación tecnológica de la madera como materia prima para la obtención de celulosa kraft se utiliza la densidad básica como un parámetro importante de calidad, junto con otras propiedades como la química del material y la edad de las plantaciones, entre otros (Doldán, Fariña y Tarigo, 2008; de Morais, Longue Júnior, Colodette, Morais y Jardim, 2017). De Morais et al. (2017) determinaron que densidades básicas entre 460 y 480 g cm<sup>-3</sup> son indicadores adecuados para la madera de clones de *E. grandis* y *E. urograndis* con edades comprendidas entre uno y ocho años con fines de pulpado.

Valores mayores a 570 g cm<sup>-3</sup> indican un decrecimiento en la capacidad de pulpado por el método kraft de maderas de eucalipto según Doldán et al. (2008), quienes evaluaron las densidades básicas de cinco especies de *Eucalyptus* spp. de edades comprendidas entre ocho y 10 años, obteniendo valores distribuidos en rangos desde 423 hasta 559 g cm<sup>-3</sup>; a su vez, determinaron el promedio de rendimiento bruto de celulosa más elevado de 54,5% para *E. globulus* a una densidad básica media de 520 g cm<sup>-3</sup> del material.

Si bien la densidad básica de la madera es un parámetro sumamente importante al momento de evaluar la calidad de un material genético con fines energéticos o de pulpado, esta característica debe ir acompañada de otras determinaciones como capacidad calorífica, tenor de carbono fijo, caracterización química, rendimiento de pulpado y propiedades papeleras, entre otras, según el objetivo de la plantación.

### Determinación del coeficiente de anisotropía

El coeficiente de anisotropía se obtiene al calcular el cociente entre la contracción del plano tangencial de la madera y la contracción en el plano radial de la misma, y es un parámetro que permite conocer la estabilidad

**Tabla 5.** Promedios de Coeficiente de Anisotropía (Ac) en muestras de madera de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis* de 7 años. Caazapá, 2022.

Clases diamétricas A [LI – LS]	Nivel de altura (% altura total) B				Promedio total o marginal
	25	35	45	55	
11,4 – 13,4	1,96 a	2,37 a	1,9 a	1,59 a	1,95 A
15,6 – 19,7	1,96 a	1,75 a	1,66 a	1,44 a	1,70 A
19,8 – 21,8	1,88 a	2,01 a	1,63 a	1,7 a	1,81 A
Tratamientos	Valor F (5%)	Contrastes	Valor F (5%)	Regresión	Valor T (5%)
A	0,93 <sup>ns</sup>	Lineal	F=9,22*	Constante	11,37*
B	4,16*	Cuadrático	F=1,66 <sup>ns</sup>	Pendiente	-2.75*
A*B	0,80 <sup>ns</sup>	Cúbico	F=1,61 <sup>ns</sup>		
CV(%)	16,76	r <sup>2</sup> =0,4309			

Obs.: Medias con letras mayúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para comparaciones de medias entre clases diamétricas.

Medias con letras minúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para interacciones Clases diamétricas y Nivel de altura (% altura total).

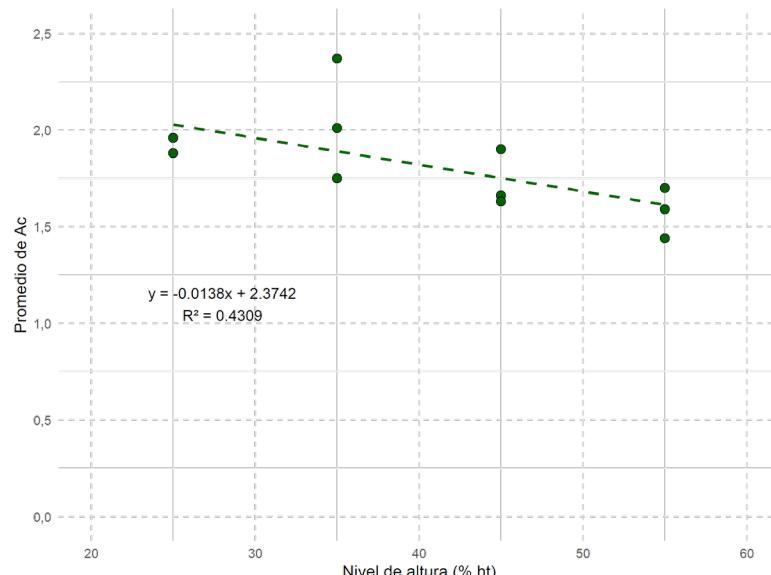
LI: Límite inferior de la clase diamétrica. LS: Límite superior de la clase diamétrica. A: Factor clase diamétrica. B: Factor altura.

AB: Interacción entre factores. Valor F: Estadístico de prueba. Valor T: Estadístico de prueba.

"ns": no significativo.

\*: significativo.

CV (%): coeficiente de variación del modelo de ANOVA.



**Figura 2.** Regresión de la variable Coeficiente de Anisotropía (Ac) en función a la altura del fuste de individuos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis* de 7 años. Cazapá, 2022.

dimensional de la madera, información importante para aplicaciones estructurales y para la industria del mobiliario.

Suirezs y Berger (2009) establecen que valores de anisotropía entre 1,2 y 1,5 son considerados excelentes para usos donde no se permiten alabeos; de 1,6 a 1,9 la madera es considerada normal; y presenta limitaciones en sus aplicaciones cuando el valor de anisotropía es mayor a 2,0. Los valores del coeficiente de anisotropía de la contracción de la madera presentaron efectos significativos según los niveles de altura de muestreo en el análisis ANOVA. Los datos se reportan en la Tabla 5.

El análisis de regresión para el factor nivel de altura se presenta en la Figura 2.

La recta representa la tendencia inversa entre la altura del fuste y el coeficiente de anisotropía de la madera. Por cada 10% de incremento en la altura del individuo, el coeficiente de anisotropía presenta un patrón de disminución de 0,11. Calvo et al. (2007) encontraron variaciones del coeficiente de anisotropía de la madera en función de la altura del fuste en ejemplares de *Eucalyptus grandis* de 17 años cultivados en Argentina, donde el coeficiente presentó una tendencia decreciente al aumentar la altura, hallazgo congruente con los resultados de este trabajo.

Cardoso, Cagno, Cárdenas y Gatto (2013) establecen una clasificación de la madera según sus coeficientes de anisotropía: en general, valores mayores a 2 sugieren maderas inestables o con dificultades según las aplicaciones del material.

Considerando los valores obtenidos en la determinación del coeficiente de anisotropía, se puede considerar que la madera de *Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis* de siete años es normal a inestable en términos de estabilidad dimensional (Suirezs y Berger, 2009). Por su

parte, del análisis de regresión, se observa una tendencia de disminución del coeficiente de anisotropía con la altura, lo que sugiere que la madera podría incrementar su estabilidad dimensional con la altura del fuste. Este hecho debe corroborarse realizando ensayos físico-mecánicos en la madera obtenida de las zonas más elevadas del fuste.

### Contenido de humedad de la madera

Según el análisis de la varianza, el nivel de altura no fue una fuente significativa de variación para el contenido de humedad, los contrastes se presentan en la Tabla 6.

El contenido de humedad está estrechamente relacionado con el peso inicial de la madera cosechada (Omonte, Sáez-Carrillo, Ananías y Valenzuela-Hurtado, 2019). Desde el punto de vista tecnológico, este parámetro se relaciona con la densidad, el almacenamiento y el transporte de la misma, entre otros factores. La resistencia del material frente al ataque de organismos xilófagos se ve asociada con la presencia de agua dentro de la madera (Doldán, 2003).

Los valores de contenido de humedad mayores a 100% en las muestras estudiadas sugieren que la madera de esta especie posee elevada saturación en su estado verde. En la industria, el contenido de humedad inicial de la madera es un factor importante en la toma de decisiones del proceso de secado, ya que el material es propenso a sufrir deformaciones, entre otros fenómenos, dificultando su aprovechamiento final (Touza y Pedras Saavedra, 2002).

**Tabla 6.** Promedios de Contenido de humedad (CH%) en muestras de madera de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* de 7 años. Caazapá, 2022.

Clases diamétricas [LI – LS]	Nivel de altura (% altura total)				Promedio tota- le o marginal
	25	35	45	55	
11,4 – 13,4	115,16 a	126,45 a	123,59 a	116,34 a	120,39 A
15,6 – 19,7	102,04 a	102 a	101,56 a	95,56 a	100,29 A
19,8 – 21,8	115,81 a	116,21 a	106,56 a	105,78 a	111,09 A
Tratamientos	Valor F (5%)	Contrastes	Valor F (5%)	Regresión	Valor T (5%)
A	29,04*	Lineal	F=1,17 ns	Constante	ns
B	0,82ns	Cuadrático	F=1,11ns	Pendiente	ns
A*B	0,32ns	Cúbico	F=0,19ns		
CV(%)	11,02				

Obs.: Medias con letras mayúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para comparaciones de medias entre clases diamétricas.

Medias con letras minúsculas en común no son significativamente diferentes ( $p<0,05$ ), para interacciones Clases diamétricas y Nivel de altura (% altura total).

LI: Límite inferior de la clase diamétrica. LS: Límite superior de la clase diamétrica. A: Factor clase diamétrica. B: Factor altura.

AB: Interacción entre factores. Valor F: Estadístico de prueba. Valor T: Estadístico de prueba.

"ns": no significativo.

\*: significativo.

CV (%): coeficiente de variación del modelo de ANOVA.

## CONCLUSIONES

Se determinaron el contenido de humedad, el peso específico aparente verde, el peso específico aparente básico y el coeficiente de anisotropía de la madera de *Eucalyptus urophylla* × *E. camaldulensis* VM01 de siete años obtenida en el distrito de Coronel Maciel, departamento de Caazapá. El factor altura de muestreo fue significativo para los parámetros físicos coeficiente de anisotropía y peso específico aparente básico.

Los valores de peso específico aparente básico obtenidos mostraron que esta especie resulta adecuada para su uso en la industria de obtención de carbón y presenta potencial para el aprovechamiento con fines de extracción de celulosa según la altura. El coeficiente de anisotropía mostró una reducción a medida que se incrementó la altura del fuste.

A partir de estos resultados se podrían ampliar los estudios de determinación de las propiedades físico-mecánicas para explorar posibles aplicaciones estructurales de la madera proveniente de las zonas superiores de los individuos.

## AGRADECIMIENTOS

A la empresa Felber Forestal por la provisión de las muestras evaluadas en este trabajo. A los Ing. For. Oscar Vera y Armando Barúa por el apoyo en el muestreo.

## REFERENCIAS

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2002). *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. Norma UNE EN 13183-1:2002*. Madrid, España: AENOR, 8 p. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0027392>

Barbosa dos Santos Júnior, C., De Mendoza, Z. M. dos S. H., dos Santos Elias, M. P., De Matos, S. E.,

Borges, P. H. de M., Morais y P. H. de M. (2023). Características tecnológicas do híbrido "Urocum" em regime de talhadia. *Brazilian Journal of Development*, 9(4), 13918-13928. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n4-095>.

Barreiros, R. M., Ribeiro, G. P., Dias, K. B., Gouvea, C. F., Reis, A. M. F. y Silva, G. C. (2021). *Potencialidade energética da madeira de três espécies de eucalipto*. São Paulo: Editora Científica Digital, p. 146-164. <https://dx.doi.org/10.37885/210203332>.

Brun, E. J., Bersch, A. P., Pereira, F.A., Agostinho, S. D., de Barba, Y. R. y Dorini Junior, J. R. (2018). Diameter structure in a community of shrub-tree Caatinga, municipality of Floresta, state of Pernambuco, Brazil (en linea). *Floresta*, 48(1), 87-92. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i1.51673>

Calvo, C. F., Cotrina, A. D., Cuffre, A. G., Ott, M., Piter, J. C., Stefani, P. M., Torran, E. A. y Vivian, A. (2007). Propiedades de hincharimiento y contracción en la madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina. *Revista Madeira Arquitetura & Engenharia*, 8(20), 59-69. [https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/75599/CONICET\\_Digital\\_Nro.00e584ae-4c45-4472-9fe5-a103e8f8be33\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/75599/CONICET_Digital_Nro.00e584ae-4c45-4472-9fe5-a103e8f8be33_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Cardoso, A., Cagno, M., Cárdenas, P. y Gatto, F. (2013). Contracción, hincharimiento y peso específico aparente demaderadeeucaliptocolorado(*Eucalyptustereticornis* Smith). *INNOTECH*, 8(1), 5-12. [https://silo.uy/vufind/Record/LATU\\_48f0b3addecdd21f0452904d0b1e5010](https://silo.uy/vufind/Record/LATU_48f0b3addecdd21f0452904d0b1e5010)

da Cunha, T. Q. G., Santos, A. C., Novaes, E., Hansted, A. L. S., Yamaji F. M. y Sette, C. R. (2021). *Eucalyptus expansion in Brazil: energy yield in new forest frontiers*. *Biomass and Bioenergy*, 144, 105900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>.

de Morais, P. H. D., Longue Júnior, D., Colodette, J. L., Morais, E. H. D. C. y Jardim, C. M. (2017). Influência da idade de corte de clones de *Eucalyptus grandis* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na composição química da madeira e polpação kraft. *Ciencia Florestal*, 27(1), 237-248. <https://doi.org/10.5902/1980509826462>.

- DINAC (Dirección Nacional de Aeronáutica Civil). (2022). *Anuario meteorológico 2022*. Asunción: DINAC, 79 p.
- Doldán, J. (2003). *Indicadores de calidad de madera Eucalyptus grandis de Río Negro, Uruguay: contenido de humedad, densidad, contracción y largo de fibras*. Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales LATU-JICA (1998-2003). Montevideo, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, 42 p. (Informe de Investigación Series Forestales, nº 9). [https://catalogo.latu.org.uy/opac\\_css/index.php?lvi=notice\\_display&id=3867](https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvi=notice_display&id=3867)
- Doldán, J., Fariña, I. y Tarigo, F. (2008). Utilización de *Eucalyptus* spp. alternativas de plantaciones uruguayas para pulpa Kraft. *INNOTEC*, (3), 30-34. <https://doi.org/10.26461/03.04>
- Telles, P. E., Paludzyszyn Filho, E., Magalhães Esteves, W. L. y Burigo Vandresen, P. (2018). *Melhoramento genético de eucaliptos subtropicais: contribuições para a espécie Eucalyptus badjensis*. Colombo: Embrapa Florestas <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020*. Roma: FAO. <https://doi.org/doi.org/10.4060/ca8753es>
- Fioravante Reis, C. A. y Paludzyszyn Filho, E. (2011). *Estado da arte de plantios com espécies florestais de interesse comercial para o Mato Grosso*. Colombo: Embrapa Florestas. 65 p. (Documentos, 215). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/898075/1/Doc215.pdf>
- Gauna, J. M., Raffaeli, N., Harrand, L., Tonello, M. L., Harrand, L., Ciro, M. A... Barotto, A. J. (2022). *Potencial de especies, clones puros e híbridos de eucaliptos para elaboración de carbón vegetal*. In *Jornadas Forestales de Entre Ríos* (36, 2022, Concordia, Argentina). <https://www.researchgate.net/publication/364348131>
- Hsing, T. Y., Paula, N. F. y Paula, R.C. (2016). Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. *Ciência Florestal*, 26(1), 273-283.
- INFONA (Instituto Forestal Nacional). (2022). *Departamento de Industria Forestal. Actualización del Censo de Industrias Forestales*. Asunción: INFONA, 5 p. <https://nube.infona.gov.py/index.php/s/bXZ3PeiPwBggL3L?path=%2FCENSO%20DE%20INDUSTRIAS%20FORESTALES#pdfviewer>
- INTN (Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología, Paraguay). (1974). *Método de determinación del peso específico aparente. Norma NP nº 115:1974*. Asunción : INTN. <https://normas.intn.gov.py/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=138>
- INTN (Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología, Paraguay). (1974). *Método de determinación de contracción. Norma NP nº 116:1974*. Asunción: INTN. <https://normas.intn.gov.py/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=139>
- Labbé, R., Doppelmann, F., Balocchi, C. y Peredo, M. (2013). Variación de la densidad de la madera y rendimiento pulpable en clones de *eucalyptus globulus* evaluado con espectroscopía de infrarrojo cercano. *Bosque* 34(3), 263-272. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000300002>.
- Lima, M. D. R., Barros Junior, U. O., de Assis, M. R., de Melo, I. C. N. A., de Figueiredo, I. C. R., Protásio, T. P. y Trugilho, P. F. (2020). Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, 48(128), e3302. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04>
- Monteoliva, S. E., Barotto, A. J. y Fernández, M. E. (2015). Anatomía y densidad de la madera en *Eucalyptus*: variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 114(2), 209-217. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/62448>
- Omonte, M., Sáez-Carrillo, K., Ananías, R. A. y Valenzuela-Hurtado, L. (2019). Variación del contenido de humedad verde y de la densidad básica de la madera en árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 21(3), 413-424. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2019005000313>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. (1997). *Mensura forestal*. San José, Costa Rica, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 586 p. <https://hdl.handle.net/11324/15038>
- Protásio, T. P., Lima, M. D. R., Scatolino, M. V., Silva, A. B., de Figueiredo, I. C. R., Hein, P. R. G. y Trugilho, P. F. (2021). Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. *Renewable Energy*, 164, 34-45. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>
- Quinhones, R. (2011). *Relações entre as características da madeira de Eucaliptus sp. e as do carvão produzido a diferentes temperaturas finais de carbonização* (Tesis Ph D.) Lavras: Universidade Federal de Lavras, 79 p.
- Suirezs, M. T. y Berger, G. (2009). *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Posadas, Misiones, Argentina: EdUNaM, 58 p.
- Touza, M. y Pedras Saavedra, F. (2002). Una propuesta industrial de secado de madera de eucalipto blanco (*Eucalyptus globulus*) de Galicia. *Productos y Tecnología CIS-Madera*, 8, 28-36. [https://www.researchgate.net/publication/289460836\\_Una\\_propuesta\\_Industrial\\_de\\_Secado\\_de\\_Madera\\_de\\_Eucalipto\\_blanco\\_Eucalyptus\\_globulus\\_de\\_Galicia](https://www.researchgate.net/publication/289460836_Una_propuesta_Industrial_de_Secado_de_Madera_de_Eucalipto_blanco_Eucalyptus_globulus_de_Galicia)
- Vitti, A. M. S. y Brito, J. O. (2003). Óleo essencial de eucalipto. *Documentos florestais* (17), 1-26. <https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistoricoexterno/DocumentsFlorestaisNumero17.pdf>

