

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN AXIAL Y
RADIAL DE LA ANATOMÍA Y DENSIDAD DE LA MADERA DE *Eucalyptus*
grandis W. Hill ex Maiden**

por

Eugenia CAMPÓN-VIÑA

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO
URUGUAY
2024

PAGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directoras:

Dra. Marcela Ibáñez

Ing. Agr. MSc. Valentina Benítez

Dra. Ana Paula Coelho

Tribunal:

Dra. Ana Paula Coelho

Dra. Ludmila Profumo

Ing. Agr. Sebastián Quagliotti

Fecha: 13 de diciembre de 2024

Estudiante:

Eugenia Campón-Viña

DEDICATORIA

A mi familia, mi apoyo y mi mayor inspiración.

A mis padres, por su amor incondicional, sus consejos y por estar siempre a mi lado. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

A mis hermanos, por ser mis compañeros de vida, mis cómplices, por escucharme y alentarme en cada momento difícil.

A mi abuela Mecha, por su amor y comprensión; te tengo presente en cada paso que doy y sé que estarías muy feliz con este logro.

A mi abuela Isabel, quien me escuchó y me brindó su apoyo durante todo el camino, y a mi abuelo Manolo, quien siempre ocupará un lugar especial en mi corazón.

A mis tíos y primos, por su apoyo constante y su cariño, siempre a mi lado.

A todos ustedes, quienes hicieron posible cada palabra de esta tesis,
con todo mi corazón, gracias.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por darme su apoyo incondicional en cada momento. Este logro es tanto mío, como de ustedes.

A Nacho y a su familia, que me acompañaron y me dieron fuerzas a lo largo de este camino.

A Fiorella, quien siempre estuvo dispuesta a escucharme y me motivó a seguir adelante.

A la Dra. Marcela Ibáñez, a la Ing. Agr. MSc. Valentina, mis tutoras y a la Dra. Ana Paula Coelho, mi cotutora, por darme la oportunidad de trabajar con ellas. Agradezco su guía en cada intercambio compartido, así como todo el conocimiento que me brindaron y que ha sido esencial para la realización de este trabajo.

A la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurt, especialmente a Rodrigo Martínez y a Mauricio Cáceres, por su valiosa ayuda en el apeo de los árboles necesarios para este estudio.

Al Centro Universitario de Tacuarembó (CUT), por permitirme utilizar sus laboratorios y a Ximena Pintos, quien me brindó su apoyo en la molienda de la madera y la remoción de los extractivos.

A la Facultad de Agronomía y a todos los docentes que, a lo largo de los años, contribuyeron con su conocimiento a mi formación profesional, permitiéndome llegar hasta aquí. Un agradecimiento especial al Departamento Forestal, en donde siempre encontré colaboración y apoyo y en particular a Julia Sáenz, a Agustina Sergio, a Andrés Baietto, a Iván Rizzo y a Fernando López por su ayuda.

Al Ing. Agr. MSc. Joaquín Dutour y al Ing. Agr. PhD Pablo González Barrios, por su significativa colaboración.

A Camila Barreira y a Stephanie Colombo, por su valiosa ayuda en la revisión y corrección de formato.

A mis amigos y a todas las personas que de alguna u otra manera colaboraron para que esta tesis se realice.

A todos, mi más profundo agradecimiento.

TABLA DE CONTENIDO

PAGINA DE APROBACIÓN.....	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN.....	9
SUMMARY	10
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo general	11
1.1.2 Objetivos específicos	11
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 SECTOR FORESTAL A NIVEL MUNDIAL	12
2.2 SECTOR FORESTAL EN URUGUAY	12
2.2.1 Evolución del sector.....	12
2.2.2 Distribución de plantaciones	14
2.3 EUCALYPTUS GRANDIS.....	15
2.3.1 Introducción al género	15
2.3.2 Taxonomía y descripción botánica	15
2.3.3 Distribución natural y requerimientos de la especie.....	16
2.3.4 Presencia de la especie en Uruguay.....	17
2.4 ANATOMÍA DE LA MADERA	18
2.4.1 Anatomía macroscópica del xilema secundario	20
2.4.2 Anatomía microscópica del xilema secundario	20
2.5 PARED CELULAR Y QUÍMICA DE LA MADERA	28
2.5.1 Celulosa.....	30
2.5.2 Hemicelulosa	31
2.5.3 Lignina	31
2.5.4 Extractivos y cenizas	32
2.5.5 Valores promedio y variación de la composición química	33
2.6 DENSIDAD APARENTE BÁSICA DE LA MADERA	34
2.6.1 Densidad real y aparente	34
2.6.2 Factores que influyen sobre la densidad aparente	35

3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
3.1	ETAPA DE CAMPO.....	41
3.1.1	Descripción del sitio	41
3.1.2	Selección de árboles.....	42
3.2	ETAPA DE LABORATORIO	42
3.2.1	Obtención de probetas.....	42
3.2.2	Anatomía	43
3.2.3	Química	45
3.2.4	Densidad aparente básica	57
3.3	ANÁLISIS DE DATOS.....	60
3.3.1	Caracterización dendrométrica de árboles en estudio.....	60
3.3.2	Anatomía	60
3.3.3	Química	61
3.3.4	Densidad aparente básica	61
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1	CARACTERIZACIÓN DENDROMÉTRICA DE ÁRBOLES EN ESTUDIO	62
4.2	ANATOMÍA	63
4.2.1	Estadística descriptiva.....	63
4.2.2	Variación respecto a la altura y posición radial.....	65
4.3	QUÍMICA	70
4.3.1	Estadística descriptiva.....	70
4.4	DENSIDAD APARENTE BÁSICA	72
4.4.1	Estadística descriptiva.....	72
4.4.2	Variación respecto a la altura y posición radial.....	73
5	CONCLUSIÓN	78
6	PERSPECTIVAS DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	79
7	BIBLIOGRAFÍA	80

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.

Tabla 1 Análisis de la anatomía de la madera	20
Tabla 2 Dimensiones promedio de fibras en <i>E. grandis</i> según distintos autores.....	25
Tabla 3 Variación de las dimensiones de las fibras en dirección médula-corteza de <i>E. grandis</i>	26
Tabla 4 Variación de las dimensiones de las fibras en dirección base-copa de <i>E. grandis</i>	27
Tabla 5 Componentes químicos de la madera	30
Tabla 6 Composición química promedio y desvío estándar de <i>E. grandis</i> según distintos autores	33
Tabla 7 Factores determinantes de la densidad de la madera.....	36
Tabla 8 Valores promedio de densidad aparente básica de <i>E. grandis</i>	37
Tabla 9 Tipo de variación radial y axial de la densidad en <i>E. grandis</i> según diferentes autores	39
Tabla 10 Diámetros de interés por árbol	63
Tabla 11 Estadística descriptiva de la longitud, ancho y espesor de la pared celular de <i>E. grandis</i>	63
Tabla 12 Dimensiones promedio de fibras en <i>E. grandis</i>	65
Tabla 13 Variabilidad de las fibras en dirección médula-corteza de <i>E. grandis</i>	66
Tabla 14 Promedios de los distintos componentes de la madera relativos al peso seco	70
Tabla 15 Composición química promedio y desvío estándar de <i>E. grandis</i>	71
Tabla 16 Valores promedio de Dab de <i>E. grandis</i>	73
Tabla 17 Tipo de variación radial y axial de la densidad en <i>E. grandis</i>	75

Figura No.

Figura 1 <i>E. grandis</i> (Myrtaceae) - a) Hábito arbóreo; b) Corteza	15
Figura 2 Disco de madera de <i>E. grandis</i>	16
Figura 3 Área de distribución natural de <i>E. grandis</i>	16
Figura 4 Distribución plantaciones <i>E. grandis</i> (incluidos híbridos y clones) y <i>E. saligna</i> en Uruguay, año 2021	17
Figura 5 Corte transversal de <i>E. grandis</i>	19
Figura 6 Porosidad difusa, disposición y agrupación de vasos en sección transversal de <i>E. grandis</i>	21
Figura 7 Sección tangencial y macerado de <i>E. grandis</i>	22
Figura 8 Sección tangencial y radial de <i>E. grandis</i>	23
Figura 9 Corte transversal donde se observan traqueidas vasicéntricas alrededor de los vasos.....	23
Figura 10 Sección transversal de <i>E. grandis</i>	24
Figura 11 Representación esquemática de la pared celular vegetal a cuatro niveles	29
Figura 12 Ubicación del rodal bajo estudio en la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurtt	41

Figura 13 Discos, probetas y subprobetas.....	43
Figura 14 Macerado de E.grandis.....	45
Figura 15 Obtención de insumos para procesamiento químico.....	46
Figura 16 Procesamiento de contenido de humedad	47
Figura 17 Extracción con etanol.....	49
Figura 18 Procedimiento para determinar lignina soluble	51
Figura 19 Procedimiento para determinar lignina insoluble	53
Figura 20 Procedimiento para determinar holocelulosa	55
Figura 21 Procedimiento para determinar cenizas.....	57
Figura 22 Proceso para determinar densidad aparente básica a partir de madera saturada de agua	59
Figura 23 Estadística descriptiva de diferentes alturas de los árboles en estudio	62
Figura 24 Ancho promedio según posición radial en E. grandis.....	68
Figura 25 Longitud promedio según posición radial en E. grandis.....	69
Figura 26 Espesor promedio según posición radial en E. grandis.....	69
Figura 27 Densidad aparente básica promedio según altura en E. grandis.....	74
Figura 28 Densidad aparente básica promedio según posición radial en E. grandis.....	77

RESUMEN

El género *Eucalyptus*, reconocido a nivel mundial por su rápido crecimiento y capacidad de adaptación, es predominante en Uruguay, donde representa el 72% de las plantaciones. Dentro de este género, *Eucalyptus grandis* destaca sus ventajas en el contexto nacional y se espera que continúe expandiéndose gracias a su adaptabilidad y estabilidad frente al cambio climático. Por lo tanto, el estudio de sus propiedades anatómicas, químicas y físicas es fundamental, ya que este conocimiento no sólo profundiza la comprensión de las características de la especie, sino que también facilita la identificación de sus posibles usos y promueve un aprovechamiento más eficiente, maximizando su valor agregado.

El presente trabajo realizado en el departamento de Cerro Largo, Uruguay, tuvo como objetivo general comparar la anatomía y la densidad aparente básica de la madera sana de árboles de *Eucalyptus grandis* de 30 años en diferentes posiciones radiales y alturas del fuste, así como caracterizar su composición química y dendrométrica. Los objetivos específicos incluyeron: realizar una caracterización dendrométrica de los árboles estudiados, comparar la anatomía de la madera sana de *E. grandis* a lo largo del radio y a diversas alturas del fuste, caracterizar su composición química mediante estadística descriptiva y evaluar la variación de la densidad aparente básica de la madera a nivel radial y con la altura del fuste.

En un rodal de la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurtt -EEBR de la Facultad de Agronomía, se seleccionaron al azar cinco árboles sanos, sin rajaduras y de diámetros similares. Se midieron distintas alturas (tocón, primera rama y total) y el diámetro a cada metro hasta alcanzar 8 cm de diámetro con corteza en punta fina. Con motosierra se obtuvieron discos a 0,5 m, 1 m y 1,5 m de cada árbol, obteniendo 15 muestras en total. En laboratorio se extrajeron cuatro probetas por disco y luego cada una se seccionó en cuatro subprobetas desde la médula hacia la corteza, identificadas según su ubicación radial y uso metodológico: anatomía, química o densidad.

Dendrométricamente los árboles presentaron un promedio de 25,84 m de altura total, 9,41 m hasta la primera rama, 0,21 m de altura del tocón. El DAP promedio fue de 25,96 cm, con una disminución progresiva del diámetro a medida que aumentaba la altura. A nivel anatómico, las fibras presentaron un promedio de 986,310 μm de longitud, 21,100 μm de diámetro y 3,484 μm de espesor de pared celular. Con diferencias significativas según la posición radial, aumentando desde la médula a la corteza, sin variaciones significativas en función de la altura o en la interacción entre altura y posición radial. En química los promedios obtenidos fueron: 7,571% de contenido de humedad, 6,255% de extractivos, 2,044% de lignina soluble, 28,317% de lignina insoluble, 73,293% de holocelulosa y 0,310% de cenizas. La densidad aparente básica promedio fue de 0,413 g/cm^3 , disminuyendo con la altura y aumentando radialmente en sentido médula hacia la corteza, sin interacción significativa entre altura y posición radial.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, anatomía cuantitativa de la madera, química de la madera, densidad aparente básica de la madera

SUMMARY

The *Eucalyptus* genus, recognized worldwide for its rapid growth and adaptability, is predominant in Uruguay, where it accounts for 72% of all plantations. Among its species, *Eucalyptus grandis* stands out for its advantages in the national context and it is expected to continue expanding due to its ability to thrive in diverse conditions and its stability in the face of climate change. Consequently, studying its anatomical, chemical, and physical properties is essential; this knowledge not only deepens the understanding of the species' characteristics but also aids in identifying potential uses and promotes more efficient utilization, thereby maximizing its added value.

This study, conducted in the Cerro Largo department of Uruguay, aimed to compare the anatomy and basic apparent density of healthy wood from 30-year-old *Eucalyptus grandis* trees at different radial positions and trunk heights, as well as to characterize their chemical composition and dendrometric features. The specific objectives included: performing dendrometric characterization of the studied trees, comparing the anatomy of healthy wood across the radius and at different trunk heights, characterizing its chemical composition using descriptive statistics and evaluating variations in basic apparent density radially and with trunk height.

In a stand at the Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurtt (EEBR) of the Faculty of Agronomy, five healthy trees with similar diameters and no cracks were randomly selected. Various heights (stump, first branch, and total) were measured, along with diameter measurements taken every meter until reaching 8 cm at the thin end. Discs were collected from each tree at heights of 0.5 m, 1 m, and 1.5 m, resulting in a total of 15 samples. In the laboratory, four samples per disc were extracted, and each was then sectioned into four subsamples from pith to bark, identified according to their radial location and methodological use: anatomy, chemistry, or density.

Dendrometrically, the trees averaged 25.84 m in total height, 9.41 m to the first branch, and 0.21 m in stump height. The average diameter at breast height - DBH was 25.96 cm, showing a progressive decrease in diameter with increasing height. In terms of anatomy, fibers had an averaged length of 986.310 μm , a diameter of 21.100 μm , and a cell wall thickness of 3.484 μm , with significant differences based on radial position -these increased from pith to bark- without significant variations based on height or interaction between height and radial position. Chemically, the averages obtained were: 7.571% moisture content, 6.255% extractives, 2.044% soluble lignin, 28.317% insoluble lignin, 73.293% holocellulose, and 0.310% ash. The average basic apparent density was measured at 0.413 g/cm³, decreasing with height while increasing radially from pith to bark, without significant interaction between height and radial position.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, quantitative anatomical wood features, wood chemical properties, basic apparent density of wood

1 INTRODUCCIÓN

El género *Eucalyptus* es uno de los más cultivados a nivel mundial entre las latifoliadas, debido a su rápido crecimiento, versatilidad de usos y notable adaptabilidad a diversos entornos (Zhou et al., 2024). Dentro del género, una de las especies más plantadas es *Eucalyptus grandis* (Da Cunha et al., 2021). A su vez, en Uruguay, el 72% del área forestada de bosques plantados corresponde a este género, siendo *Eucalyptus grandis* una de las especies predominantes (Uruguay XXI, 2023b).

Dada la importancia del género y más específicamente de la especie *Eucalyptus grandis* a nivel mundial y nacional es que se decide estudiarla, utilizando muestras de árboles de 30 años provenientes de la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurt -EEBR de la Facultad de Agronomía, ubicada en Bañados de Medina, departamento de Cerro Largo. Esta investigación abarca el análisis de la anatomía, química y propiedades físicas de la madera, contribuyendo a actualizar y generar nuevos datos sobre la especie.

El estudio de estas propiedades constituye la base para comprender las características de la madera de *E. grandis*, permitiendo su comparación con otras especies y la definición de sus posibles usos potenciales aun no explorados (Suirezs & Berger, 2009). Asimismo, posibilita la determinación de su calidad, lo que puede derivar en nuevas aplicaciones o investigaciones, favoreciendo un aprovechamiento más eficiente de los recursos y un mayor valor agregado (Suirezs & Berger, 2009).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Comparar la anatomía y la densidad aparente básica de la madera sana de árboles de *Eucalyptus grandis* de 30 años en diferentes posiciones radiales y alturas del fuste, así como caracterizar su composición química y dendrométrica.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Realizar una caracterización dendrométrica de los árboles estudiados.
- b) Comparar la anatomía de madera sana de *E. grandis* a lo largo del radio en sentido médula - corteza y a diferentes alturas del fuste.
- c) Caracterizar la composición química de madera sana de *E. grandis* mediante estadística descriptiva.
- d) Evaluar la variación de la densidad aparente básica de la madera sana de *E. grandis* según posición radial y altura del fuste.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 SECTOR FORESTAL A NIVEL MUNDIAL

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2021), clasifica los bosques en dos categorías: bosques regenerados de forma natural y bosques plantados. Los primeros son aquellos que se desarrollan naturalmente con árboles autóctonos, mientras que los segundos son establecidos por el hombre a través de la siembra o plantación de especies arbóreas nativas o exóticas, generalmente con fines principalmente comerciales o industriales (Fernández & Lombardo, 2022).

Según FAO (2021) dentro de la categoría bosques plantados, se encuentran las plantaciones forestales, que en 2020

registraron alrededor de 131 millones de hectáreas, lo que representa un 3% de la superficie forestal mundial. Los mismos autores destacan que la distribución de estas plantaciones varía notablemente entre regiones, con la proporción más alta en América del Sur y la menor proporción en Europa. Esta variabilidad también se refleja en la composición de las plantaciones: mientras que en América del Norte y Central predominan las especies nativas, en América del Sur son mayormente especies introducidas (FAO, 2021).

Los objetivos de estas plantaciones son diversos, alrededor del 30% se gestionan principalmente para la obtención de productos forestales madereros y no madereros y así ha sido desde 1990 (FAO, 2021). En este contexto, Maxwell (2023) señala que en 2021 se extrajeron un total de 4.000 millones de m³ de madera de las plantaciones, de los cuales alrededor de la mitad se utilizó como combustible y el resto como madera en rollo industrial (para uso de los procesadores de madera). Además, el autor destaca que la producción mundial de productos de madera en 2021 ascendió a 496 millones de m³ de madera aserrada, 402 millones de m³ de paneles a base de madera y 417 millones de toneladas de papel y cartón.

La madera, además de su valor comercial, aporta múltiples beneficios ambientales, económicos, culturales y sociales. Estos beneficios, junto con el aumento significativo en la demanda global proyectada hasta 2050, con un incremento previsto tres veces mayor que el observado entre 2000 y 2020, crean una gran oportunidad para apostar a su mayor producción y uso (Gresham House, 2020; Molina-Murillo, 2020).

2.2 SECTOR FORESTAL EN URUGUAY

2.2.1 Evolución del sector

Según Bennadji y Scoz (2017) el avance de la forestación en Uruguay, así como la posterior conformación de polos industriales en diversas regiones del país, están asociados a la promulgación de la Segunda Ley Forestal n° 15.939, del 9 de febrero de 1988 y sus decretos reglamentarios de aplicación. Estos autores destacan que dicha legislación adquirió un verdadero carácter de política de estado desempeñando un papel clave en el desarrollo del sector forestal y en la economía del país al establecer los marcos políticos, jurídicos y económicos nacionales para la mejora, ampliación, establecimiento

y defensa de recursos forestales nativos e implantados. Además, señalan que promovió el desarrollo de industrias forestales y la puesta en marcha de instrumentos de apoyos y exoneraciones para la atracción de inversiones nacionales e internacionales. Este impulso continuó con la ley de zonas francas N° 15.921, así como con decretos de reglamentación ambiental y conservación de bosques nativos. Asimismo, se implementaron tratados de protección de inversiones, así como incentivos y apoyos para la instalación de plantas de celulosa en el litoral y suroeste del país, junto con la autorización para aumentar la producción y el respaldo para una nueva fábrica en el centro del país (Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social [CERES], 2023).

Esta segunda ley establece suelos de prioridad forestal, definidos como “aquellos que, arbolados o no, por sus condiciones de suelo, aptitud, clima, ubicación y demás características, sean inadecuados para cualquier otra explotación o destino de carácter permanente y provechoso” (Ley n° 15.939, 1988, Artículo 5, literal A), totalizando 4.205.399 hectáreas a nivel nacional disponibles para llevar a cabo plantaciones forestales (*Grupos de suelos CONEAT*, 2021). Los reportes de enero/febrero 2021, cuantifican una superficie de 1.087.109 hectáreas efectivas, lo que representa el 6,21% del territorio nacional (Dirección General Forestal [DGF], 2021) e indica que se encuentra disponible un 74% del área para la expansión del sector (*Grupos de suelos CONEAT*, 2021).

El desarrollo del sector forestal generado por lo mencionado anteriormente ha impactado significativamente en la economía del país, representando el 2% del Producto Interno Bruto (PIB) en 2021 y un crecimiento significativo en las exportaciones forestales, de 5% en 2001 a casi 20% en 2022 (Uruguay XXI, 2023b). Además, según Uruguay XXI (2023a) las exportaciones de productos forestales en enero-setiembre de 2023 se ubicaron en un nivel históricamente elevado, con la celulosa como principal producto. Los autores añaden que, si bien los precios de exportación disminuyeron, los volúmenes aumentaron considerablemente, explicado en gran medida por la exportación de la segunda planta de UPM desde mayo de 2023, determinando un incremento en valor del 7% sobre lo exportado en 2022. Esto es un dato relevante, ya que a pesar de que los incentivos, fundamentales para el desarrollo del sector, se han ido retirando en la fase primaria de la producción de madera para celulosa y desde hace casi dos décadas las plantaciones con este fin no reciben un tratamiento impositivo diferencial, ha incrementado la capacidad de producción (CERES, 2023). Con la operación de las tres plantas, se espera que la producción anual de pulpa de fibra corta alcance 4,7 millones de toneladas al año, posicionando al país entre los principales productores mundiales de pulpa de fibra corta (Oficina de Programación y Política Agropecuaria [OPYPA], 2022). Sin embargo, la mayoría de la madera que se produce en el país se exporta en bruto, debido a que la oferta supera la capacidad de procesamiento industrial, por lo que se espera que el sector de la madera sólida incorpore inversiones que contribuyan a agregar valor a la producción (OPYPA, 2022).

Además, se han impulsado importantes proyectos de infraestructura que aumentarán significativamente la competitividad del país en este sector, como la construcción de una terminal portuaria especializada en celulosa, la creación del Ferrocarril Central que conectará el centro del país con el puerto de Montevideo y la

construcción de un viaducto que mejorará el acceso al principal puerto de Uruguay (Uruguay XXI, 2023b). También se destacan otras inversiones de gran importancia como la instalación de la segunda planta de UPM, inversión extranjera más importante que ha recibido el país y la mayor realizada por la empresa; la nueva planta de contrachapado de Uruply SA - Lumin; la inauguración de la planta más grande y avanzada de América del Sur destinada a producir madera maciza por Arboreal; la apertura de una nueva fábrica de tableros contrachapados por la empresa Garnica y la construcción de la planta productiva de Kluntex Lumber (Uruguay XXI, 2023b). Todas ubicadas en el noreste del país, donde las distancias al puerto de Montevideo hacen que la mejor ecuación económica se obtenga a partir de la generación de productos de madera sólida.

En este contexto, es importante señalar que, aunque gran parte de los aserraderos en el país pertenecen a empresas de origen nacional, la inversión extranjera ha sido esencial en el crecimiento continuo del sector, impulsando mejoras en eficiencia y calidad de toda la cadena de valor (Uruguay XXI, 2023b).

Considerando entonces el importante desarrollo del sector forestal, su contribución a la economía de país y sus necesidades en tecnología e innovación, las capacidades actuales de investigación forestal del país requieren de un decidido salto cualitativo y cuantitativo a todos los niveles y de acciones urgentes de fortalecimiento para el aprovechamiento de las oportunidades que ofrecerá un rubro que se perfila como el primero en exportaciones en 2030 (Bennadji & Scoz, 2017).

2.2.2 Distribución de plantaciones

Según Uruguay XXI (2023b) Uruguay se ubica en la zona templada de América del Sur, en la misma latitud que los principales emprendimientos forestales del mundo, encontrándose en una zona climática similar a las de Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Chile. En cuanto al área forestal efectiva, el 72% está dedicada al género *Eucalyptus*, mientras que *Pinus* ocupa un 19% (Uruguay XXI, 2023b). Además, los departamentos de Rivera, Tacuarembó, Paysandú, Río Negro y Lavalleya concentran la mayor parte de estas plantaciones, gracias a que combinan suelos de buena aptitud forestal para el crecimiento de los árboles, con baja productividad agrícola y pecuaria.

Debido a estos factores, como el tipo de suelo, el clima y la cercanía a los puntos de salida de la producción, Uruguay se divide en tres principales regiones forestales: 1) sureste, 2) centro-norte y 3) litoral-oeste (Uruguay XXI, 2023b). La primera abarca los departamentos de Colonia, Flores, San José, Florida, Canelones, Montevideo, Lavalleya, Maldonado y Rocha, con el predominio de especies pertenecientes al género *Eucalyptus*, particularmente *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus dunnii*; cuyo principal destino es la producción de celulosa y chips.

La zona centro-norte, que concentra la mayor superficie forestada del país, abarca los departamentos de Artigas, Rivera, Tacuarembó, Durazno, Cerro Largo y Treinta y Tres. En esta zona predomina *Eucalyptus grandis* y *Pinus*, siendo el principal destino la transformación mecánica (Uruguay XXI, 2023b).

En la zona litoral-oeste, conformada por Salto, Paysandú, Río Negro y Soriano, predomina el género *Eucalyptus* y en menor medida *Pinus*. La producción se destina principalmente a la elaboración de pasta de celulosa (Uruguay XXI, 2023b).

2.3 *EUCALYPTUS GRANDIS*

2.3.1 Introducción al género

El género *Eucalyptus* comprende alrededor de 900 taxones, originarios mayormente de Australia e islas vecinas (Boland et al., 2006). Según Brussa (1994) la distribución de las especies en el continente australiano está estrechamente relacionada con las distintas situaciones ecológicas, determinadas principalmente por las condiciones climáticas y los tipos de suelos

Desde el punto de vista de la sistemática botánica *Eucalyptus* se encuentra comprendido dentro de la tribu *Eucalypteae* en *Myrtaceae*; presenta gran diversidad, así como adaptabilidad y plasticidad fenotípica (Grattapaglia et al., 2012). Se diferencia del resto de la familia por la presencia de botones florales cubiertos por un opérculo, a veces doble, formado por sépalos y pétalos soldados y por exhibir generalmente inflorescencias simples (Boland et al., 2006).

A continuación, se hará énfasis en la descripción de la especie en estudio detallando sus características botánicas, ecológicas y su distribución.

2.3.2 Taxonomía y descripción botánica

De acuerdo con Brussa (1994), *E. grandis* presenta árboles de gran tamaño, de tronco recto y muy buen desrame natural; siendo la corteza caduca en fajas largas, lisa, de porción basal persistente, escamosa, entre 1 y 3 m de altura y el ritidoma de gris verdoso a gris blanquecino (Figura 1a y 1b).

Figura 1

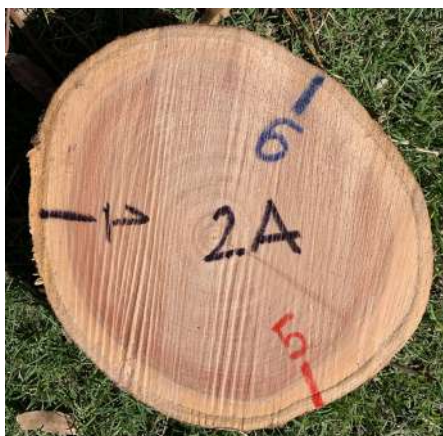
E. grandis (Myrtaceae) - a) Hábito arbóreo; b) Corteza



La madera presenta albura de color rosa pálido y duramen rosado a rojo claro, de grano recto, moderadamente fuerte y durable, con una densidad secado al aire entre 545 a 955 kg/m³ (Figura 2) (Boland et al., 2006).

Figura 2

Disco de madera de E. grandis

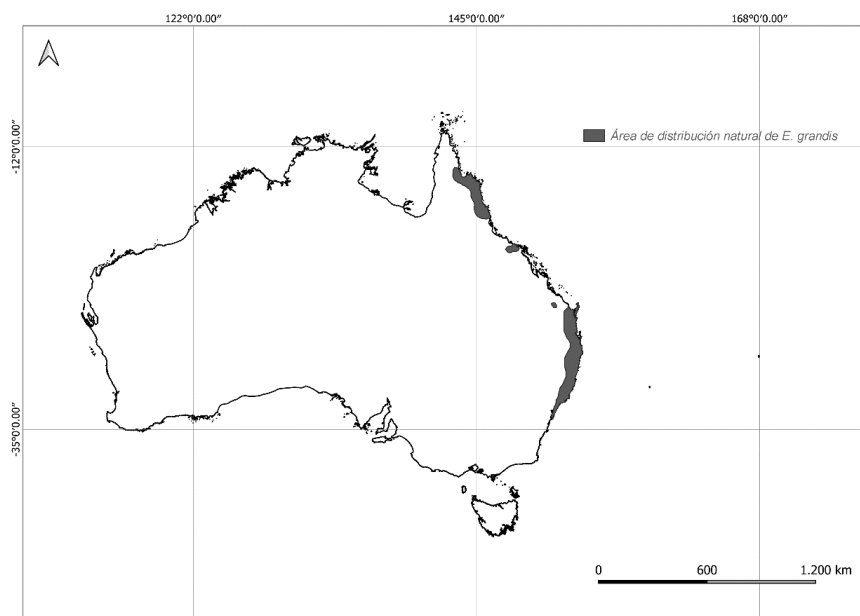


2.3.3 Distribución natural y requerimientos de la especie

La especie presenta una amplia distribución, principalmente al este del continente australiano (Figura 3) (Brussa, 1994).

Figura 3

Área de distribución natural de E. grandis



Nota. Adaptado de Boland et al. (2006).

Aunque esta especie se comporta mejor en climas húmedos subtropicales o templados cálidos, presenta buenos resultados en áreas de precipitaciones uniformes (FAO, 1981). No obstante, no es capaz de resistir el déficit hídrico, por lo que se especifica un mínimo de 1000 mm anuales de precipitación para el mejor crecimiento (FAO, 1981).

En cuanto a la altitud se distribuye entre 0 m hasta 600 m sobre el nivel del mar, alcanzando inclusive 1100 m en el norte de Queensland (Boland et al., 2006). Sin embargo, presenta poca tolerancia a las heladas, que, aunque son poco frecuentes en su zona de origen, se pueden presentar en zonas elevadas, condicionando su desarrollo (Boland et al., 2006; Resquín et al., 2020).

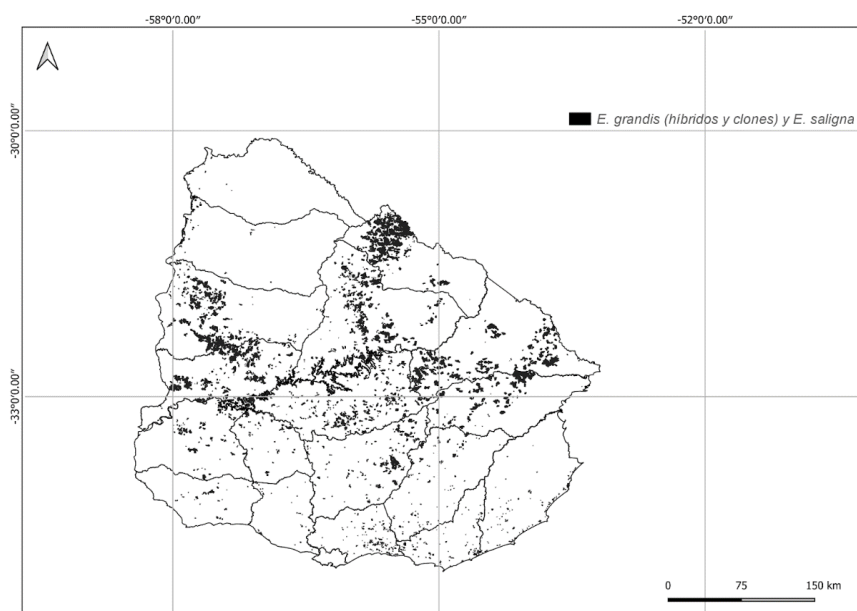
En lo que respecta a los suelos requiere que sean profundos, bien drenados, franco fértiles o franco arcillosos, aunque da buenos resultados en suelos arenosos, siempre que tengan adecuada profundidad (en suelos fértiles mínimo 1 m, en aquellos menos fértiles 2 m de profundidad efectiva, respectivamente) (Boland et al., 2006; FAO, 1981).

2.3.4 Presencia de la especie en Uruguay

El cultivo de *E. grandis* en Uruguay comenzó a difundirse en la década de 1960, tras su introducción en 1963 de huertos semilleros de Sudáfrica (Brussa, 1994). Fueron los requisitos ambientales de esta especie los que hicieron que diversas regiones del país sean adecuadas para su establecimiento (Figura 4) (Resquín et al., 2020), destacándose especialmente las características de suelo como el volumen explorado por las raíces y la disponibilidad de agua, así como la topografía (Rachid, 2016; Resquín et al., 2020). En contraste, las variables climáticas, como las temperaturas máximas y mínimas tienen una influencia menor en su desarrollo (Resquín et al., 2020).

Figura 4

Distribución plantaciones E. grandis (incluidos híbridos y clones) y E. saligna en Uruguay, año 2021



Nota. Elaborado a partir de Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (2021).

Estas características del suelo son también determinantes para la productividad de la especie. Según Balmelli y Resquín (2006) en los suelos típicos de areniscas de Tacuarembó-Rivera es la especie más productiva, alcanzando un incremento medio anual (IMA) máximo cercano a 50 m³/ha/año con corteza (considerando el volumen total).

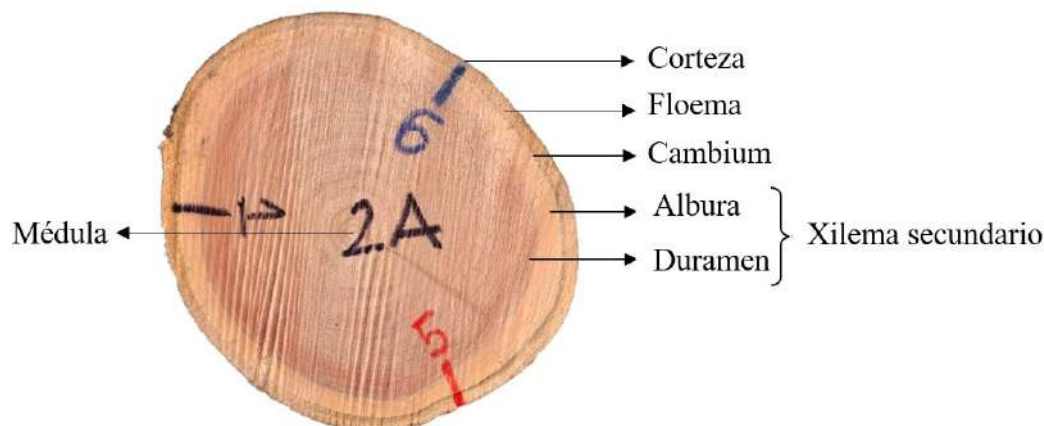
Según estos autores la especie presenta un crecimiento inicial relativamente lento, pero luego tiene una alta tasa de crecimiento, alcanzando su productividad máxima a los 9 o 10 años.

Más allá de su adaptabilidad y productividad *E. grandis* ofrece otras ventajas, entre ellas se destacan su buena sanidad, lo que disminuye los riesgos productivos, un mercado bien establecido, madera utilizada tanto para usos sólidos (madera aserrada y debobinada) como para celulosa y combustible y disponibilidad de semilla mejorada y clones seleccionados localmente (Balmelli & Resquín, 2006). No obstante, también enfrenta ciertas limitaciones ya que es susceptible a las heladas y sensible a suelos con excesos de humedad, por lo que se recomienda no plantar en zonas bajas de la topografía; a su vez, su baja densidad de la madera limita su utilización con fines estructurales o para pisos, porque resulta muy blanda y se marca con el trajar, sobre todo cuando la madera es joven y tiene escasa duraminización, lo cual depende mucho de la edad del árbol (Balmelli & Resquín, 2006).

A pesar de estos desafíos y los posibles escenarios de cambio climático, que implican un aumento en la temperatura y la precipitación, se prevé que la especie continúe cubriendo un área importante, incluso superior a la actual (Resquín et al., 2020). Esta expectativa se basa en su notable capacidad para adaptarse a diversas condiciones climáticas, lo que refuerza la conclusión de que *E. grandis* puede ser utilizada de manera sostenible a largo plazo en una amplia variedad de sitios (Resquín et al., 2020).

2.4 ANATOMÍA DE LA MADERA

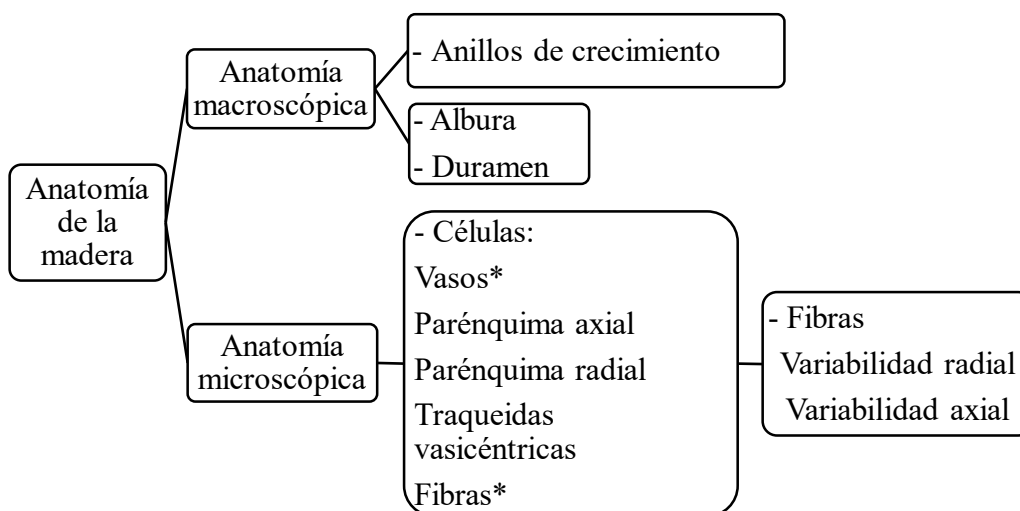
Al observar un corte transversal de una especie maderera, desde el exterior hacia el interior, se identifican varias zonas: la corteza, el floema, el cambium vascular, el xilema secundario y la médula (Figura 5) (Rosato & Traversa, 2017). De estas estructuras, el xilema secundario es de particular interés, ya que constituye la madera propiamente dicha. La anatomía de ésta es fundamental dentro del campo de las Ciencias Forestales y Ambientales, como indican León y Espinoza de Pernía (2001), quienes destacan su relevancia en diversas aplicaciones, entre ellas: taxonomía, ecología, filogenia, dendrocronología y tecnología de la madera. Este conocimiento es esencial para abordar la solución a problemas relacionados con las plantaciones forestales, procesamiento y utilización de la madera, así como para comprender la evolución de las especies (León & Espinoza de Pernía, 2001).

Figura 5*Corte transversal de E. grandis*

En este sentido, es crucial reconocer que la anatomía de la madera presenta una notable heterogeneidad en sus propiedades físicas y estructurales, que no sólo varían entre especies, sino también entre individuos de la misma especie e incluso dentro del mismo ejemplar (Coronel, 1994; Rosato & Traversa, 2017). En este contexto, Rosato y Traversa (2017) distinguen dos tipos de variación que se presentan dentro de cada árbol: la variación radial, que ocurre en sentido médula-corteza y la variación axial, que se extiende en sentido base-ápice. No obstante, es importante destacar que, según Coronel (1994), la variabilidad entre árboles es más significativa que la variación dentro de un mismo ejemplar.

Además, el patrón general de estas variaciones es influenciado por la edad del árbol, donde la madera juvenil, presente en los primeros anillos de crecimiento, se caracteriza por su baja densidad, un alto contenido en lignina y la presencia de fibras de menor tamaño (largo y espesor), características que se revierten al aumentar la edad del individuo (Resquín, 2007; Resquín et al., 2019). Aunque tanto la madera juvenil como la adulta presentan diferencias en sus propiedades físicas, anatómicas y químicas, se observa que las propiedades de la madera juvenil exhiben una marcada variabilidad, mientras que las de la madera adulta tienden a estabilizarse (Burdon et al., 2004). Este contraste es particularmente evidente en las coníferas, donde la diferencia suele ser más acentuada (Bao et al., 2001). Sin embargo, la complejidad del tejido de las angiospermas y su extensa diversidad de especies han dado lugar a cambios significativos entre los modelos de variación de propiedades propuestos (Rosato & Traversa, 2017).

Con base en esta comprensión de la anatomía y de la variabilidad de la madera y con el fin de cumplir con los objetivos del presente estudio, se abordarán sus características mediante una subdivisión en dos categorías principales: macroscópicas y microscópicas (Tabla 1). Respecto a las características macroscópicas se recopiló información sobre los anillos de crecimiento, la albura y el duramen y en lo que refiere a los caracteres microscópicos se documentaron los tipos de células presentes en *E. grandis*, con especial énfasis en las fibras y analizando la posible variación de estas a nivel radial y axial.

Tabla 1*Análisis de la anatomía de la madera*

Nota. *Células características de latifoliadas.

2.4.1 Anatomía macroscópica del xilema secundario

En el xilema es posible distinguir: 1) los anillos de crecimiento (León & Espinoza de Pernía, 2001) y 2) la albura, la interfase albura duramen y el duramen (Núñez, 2012). Los primeros son visibles en la sección transversal como una serie de círculos concéntricos, los cuales representan la cantidad de madera producida por el cambium vascular durante un período de crecimiento (León & Espinoza de Pernía, 2001).

Por otro lado, la albura, que constituye la zona externa del xilema, generalmente presenta un color claro y se compone tanto de una banda angosta fisiológicamente activa como de tejido muerto (Tuset et al., 2008). En contraste, el duramen, ubicado en la zona interna del xilema, se caracteriza por un color más oscuro y está formado por células fisiológicamente inactivas (Rosato & Traversa, 2017; Tuset et al., 2008). A diferencia de la albura, el duramen presenta una mayor densidad aparente básica (Winck et al., 2016).

Es importante señalar que, aunque algunas maderas no presentan diferencias visibles en el color entre la albura y el duramen, la formación de este siempre ocurre (Rosato & Traversa, 2017; Tuset et al., 2008). Este proceso afecta directamente la relación entre el área de albura y el área de duramen, que aumenta hacia la copa del árbol (Núñez, 2012). Sin embargo, a pesar de este incremento relativo, el área absoluta de la albura disminuye debido a la reducción del diámetro del tronco (Núñez, 2012).

2.4.2 Anatomía microscópica del xilema secundario

A nivel microscópico el xilema secundario está constituido por unidades denominadas células, las cuales agrupadas forman tejidos que cumplen las diferentes funciones vitales de la planta (Tuset et al., 2008). Según los mismos autores, las latifoliadas presentan por un lado células longitudinales o axiales, como traqueidas, vasos

leñosos, fibras, parénquima axial, canales gomíferos; y, por otro lado, se encuentran células transversales u horizontales, como radios leñosos y canales gomíferos transversales. Estos distintos tipos de células definen las propiedades de la madera, por lo que es de gran importancia estudiar su forma, tamaño y disposición en el microscopio (Qamar et al., 2024) mediante macerados, cortes transversales, longitudinales y tangenciales, dependiendo del carácter anatómico que se quiera observar (Burgert et al., 2005).

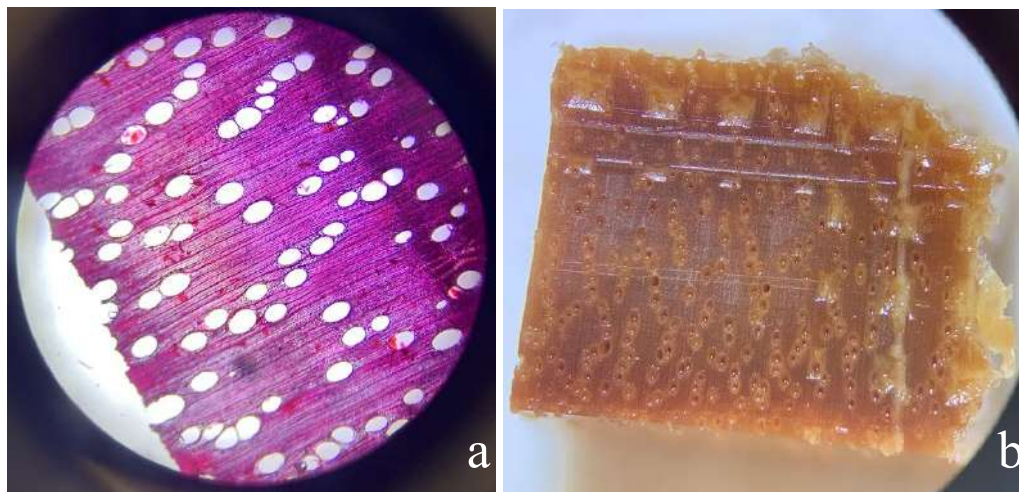
2.4.2.1 Elementos vasculares

Los vasos leñosos son estructuras constituidas por un conjunto axial de células superpuestas conformados por estructuras con forma de tubo, de largo y ancho variables, llamadas elementos de los vasos y su función es la conducción de líquidos (Tuset et al., 2008). Los vasos reciben el nombre de poros en la sección transversal y su distribución, disposición, abundancia, tamaño y agrupamiento son características muy importantes en la identificación de especies (León & Espinoza de Pernía, 2001; Tuset et al., 2008)

Según Villegas y Rivera (2002) la sección transversal de *E. grandis* presenta porosidad difusa, disposición diagonal más o menos notable, reuniendo máximo 14-15 poros (Figura 6a y 6b). En relación con la agrupación de estos, los autores indican que predominan los vasos exclusivamente solitarios, aunque también se han observado múltiples cortos o en ocasiones agrupados. Además, describen que estos vasos presentan un contorno oval, salvo los más pequeños que generalmente son circulares.

Figura 6

Porosidad difusa, disposición y agrupación de vasos en sección transversal de E. grandis

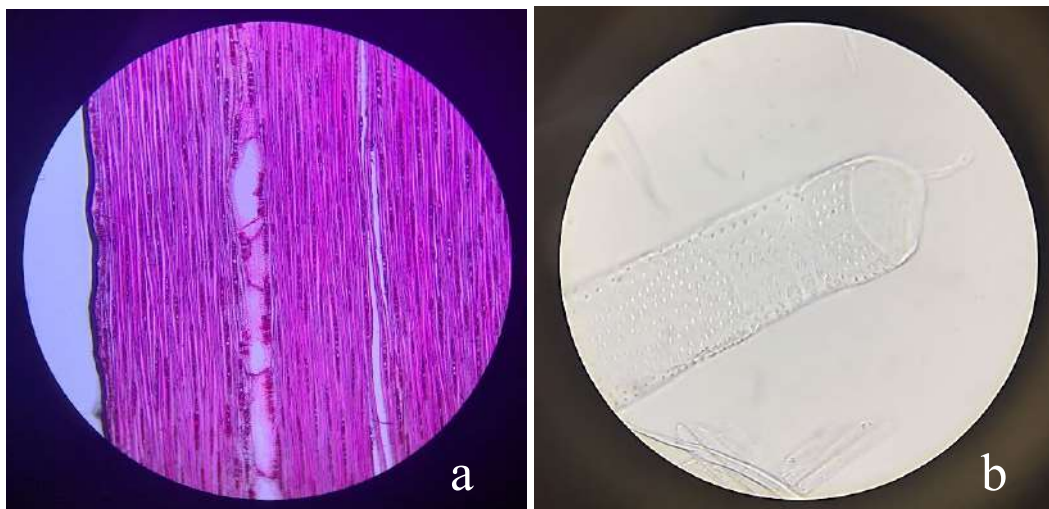


Nota. Porosidad observada a) en microscopio óptico (4x); b) en lupa (10x).

En la sección tangencial, los vasos presentan un trayecto sinuoso a recto, con tabiques levemente oblicuos a horizontales (Figura 7a) (Villegas & Rivera, 2002). Los mismos autores mencionan que las puntuaciones intervasculares son areoladas, alternas, ornadas, de contorno circular u oval y la apertura inclusa, elíptica; por otro lado, la placa de perforación es simple (Figura 7b).

Figura 7

Sección tangencial y macerado de E. grandis



Nota. a) elementos del vaso observados en la sección tangencial (4x); b) elemento del vaso: puntuaciones y placa de perforación (100x).

2.4.2.2 Parénquima axial

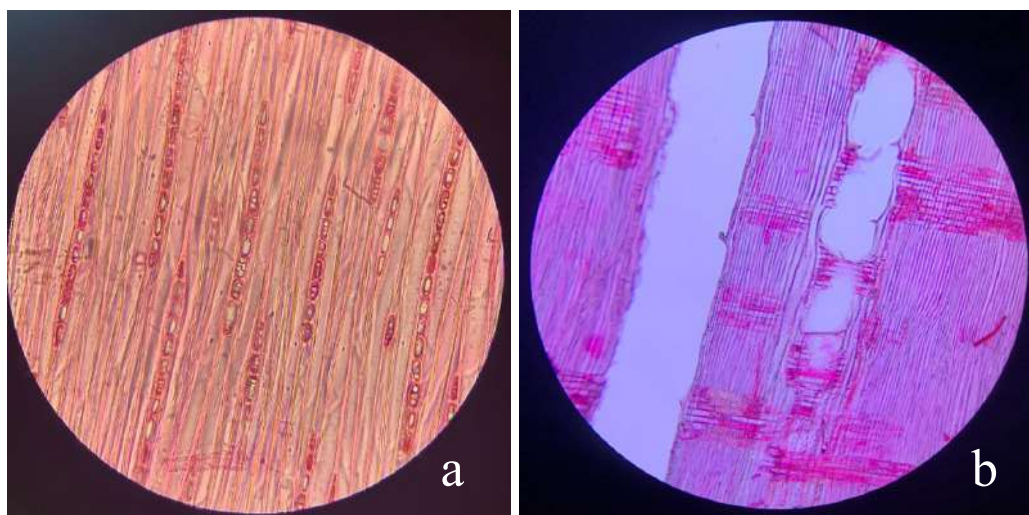
Los radios leñosos son células dispuestas en dirección transversal al eje principal del árbol y se encuentran formados por una o varias hileras de células, que cumplen la misma función que el parénquima axial (Tuset et al., 2008).

En la sección tangencial de *E. grandis* predominan los radios uniseriados, que son muy angostos, lineales, integrados por células rectangulares verticalmente alargadas y uniformes (Figura 8a) (Villegas & Rivera, 2002). En la sección radial se observan radios formados enteramente por células procumbentes, que a veces presentan una hilera marginal de procumbentes de mayor altura (Figura 8b) (Villegas & Rivera, 2002).

2.4.2.3 Parénquima radial

Los radios leñosos son células dispuestas en dirección transversal al eje principal del árbol y se encuentran formados por una o varias hileras de células, que cumplen la misma función que el parénquima axial (Tuset et al., 2008).

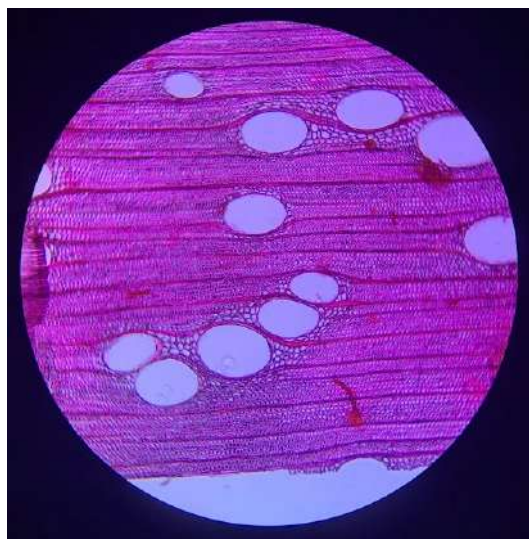
En la sección tangencial de *E. grandis* predominan los radios uniseriados, que son muy angostos, lineales, integrados por células rectangulares verticalmente alargadas y uniformes (Figura 8a) (Villegas & Rivera, 2002). En la sección radial, se observan radios formados enteramente por células procumbentes, que a veces presentan una hilera marginal de procumbentes de mayor altura (Figura 8b) (Villegas & Rivera, 2002).

Figura 8*Sección tangencial y radial de E. grandis*

Nota. a) radios exclusivamente uniseriados; b) composición del radio y traqueidas vasicéntricas alrededor del vaso (10x).

2.4.2.4 Traqueidas vasicéntricas

Las traqueidas vasicéntricas son células cortas y de forma irregular ubicadas cerca de los vasos, sin formar parte de una serie axial definida y con paredes relativamente delgadas (León & Espinoza de Pernía, 2001), siendo su función complementaria, contribuyendo a la conducción de fluidos. Estas células se encuentran presentes en *E. grandis* (Figura 7a, Figura 8b y Figura 9).

Figura 9*Corte transversal donde se observan traqueidas vasicéntricas alrededor de los vasos*

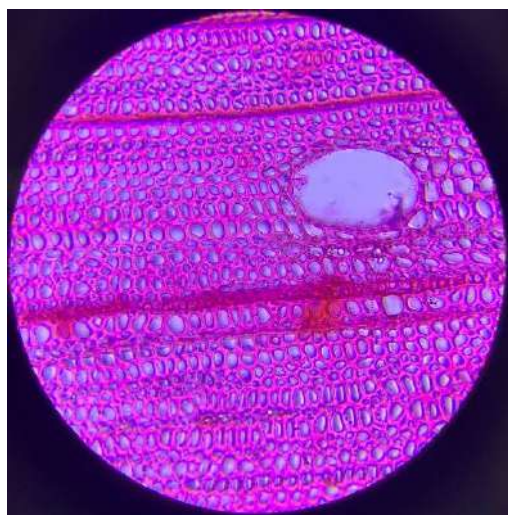
Nota. Aumento 10x.

2.4.2.5 Fibras

Las fibras son células alargadas, de extremos puntiagudos y cerrados, comúnmente de paredes gruesas (León & Espinoza de Pernía, 2001; Tuset et al., 2008); se encuentran rodeando los vasos leñosos y tienen la función de sostén de la planta (Tuset et al., 2008). Estas células constituyen la mayor parte del leño de *E. grandis* y en la sección transversal presentan un contorno angular y/o circular y paredes delgadas a gruesas (Figura 10) (Villegas & Rivera, 2002).

Figura 10

Sección transversal de E. grandis



Nota. Aumento 40x.

En cuanto a las dimensiones de las células, según revisión bibliográfica realizada por Trevisan et al. (2017) se establece que la variable longitud de la fibra en *E. grandis* presenta una variación comprendida entre 750 y 1520 μm , el espesor de pared de la fibra se encuentra comprendido entre 2,5 y 6,0 μm y el diámetro total de la fibra entre 12 y 20 μm .

En los trabajos realizados por Hussar Brisola y Demarco (2011), Trevisan et al. (2017), Baldin et al. (2017), Monteoliva et al. (2017), Rezende et al. (2018), y Verocay (2022) se observa que la dimensión longitud de fibra se encuentra dentro del rango establecido por Trevisan et al. (2017) (Tabla 2). A su vez, la mayoría de los autores presentan el espesor de pared de la fibra y diámetro total de la misma dentro de los valores esperados. Verocay (2022) obtiene un valor inferior de espesor y uno superior de diámetro total y Trevisan et al. (2017) reportan un diámetro total de la fibra ligeramente superior a los resultados normalmente reportados por la literatura, sin embargo, lo consideran normal y semejante a valores reportados por Ramos et al. (2011) como se cita en Trevisan et al. (2017).

Tabla 2*Dimensiones promedio de fibras en E. grandis según distintos autores*

Autor	Origen	Edad (años)	Longitud y σ (μm)	Espesor de pared y σ (μm)	Diámetro total y σ (μm)
Hussar Brisola y Demarco (2011)	Estado de São Paulo, Brasil	6	1150	4,9	19
Trevisan et al. (2017)	Estado de São Paulo, Brasil	18	1175,8 $\pm$ 222	4,9 $\pm$ 1,30	23,9 $\pm$ 4,17
Baldin et al. (2017)	Río Grande del Sur, Brasil	5	1036	3,8	18
Monteoliva et al. (2017)	Entre Ríos, Argentina	*	-	3,21 $\pm$ 0,38	19,73 $\pm$ 2,38
Rezende et al. (2018)	Minas Gerais, Brasil	37	971,22 $\pm$ 137	5,7 $\pm$ 1,16	18,51 $\pm$ 3,26
Verocay (2022)	Rocha, Uruguay	11	975,64 $\pm$ 229,82	1,75 $\pm$ 0,12	22,68 $\pm$ 3,67

Nota. σ = desvío estándar; *=Señala que los individuos son adultos, sin mencionar edad exacta; - = no presenta datos de longitud de fibra.

2.4.2.5.1 Variabilidad de las fibras dentro del árbol a nivel radial

Baldin et al. (2017) destacan que el aumento en la longitud de la fibra en dirección médula hacia la corteza es una tendencia de variación ampliamente reportada para diversas especies del género *Eucalyptus*, así como para la mayoría de las especies forestales. En este sentido, varios autores, incluyendo Ramos et al. (2011), Baldin et al. (2017), Silva et al. (2007), Do Sacramento Albino et al. (2012), Doldán (2003), Palermo et al. (2015) y Trevisan et al. (2017), han observado que las fibras de *E. grandis* mayormente presentan variaciones en sus dimensiones en dirección médula hacia la corteza. En particular, se ha evidenciado que la longitud de la fibra tiende a aumentar en tal dirección, mientras el diámetro total y el espesor de pared de la fibra muestran comportamientos diversos (Tabla 3).

Las variaciones en la longitud, el diámetro total y el grosor de pared de las fibras, se atribuyen a diferencias entre la madera de las diferentes zonas del árbol (Trevisan et al., 2017), lo que evidencia una transición de la madera juvenil a la adulta (Doldán, 2003).

Tabla 3

Variación de las dimensiones de las fibras en dirección médula-corteza de E. grandis

Autor	Origen	Edad (años)	Longitud de fibra	Diámetro total de fibra	Espesor de pared de fibra
Doldán (2003)	Cerro Largo, Uruguay	18	Aumenta	-	-
Silva et al. (2007)	Estado de Paraná, Brasil	10, 14, 20 y 25	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Ramos et al. (2011)	Río de Janeiro, Brasil	23	Aumenta	-	Aumenta
Do Sacramento Albino et al. (2012)	Minas Gerais, Brasil	18	-	Aumenta	Aumenta
Palermo et al. (2015)	Río de Janeiro, Brasil	23	Aumenta	No presenta diferencias estadísticas	Aumenta
Baldin et al. (2017)	Río Grande del Sur, Brasil	5	Aumenta	Ligero aumento en dirección duramen-zona intermedia, seguido de una reducción hacia la albura	Ligero aumento en dirección duramen-zona intermedia, seguido de una reducción hacia la albura
Trevisan et al. (2017)	Río Grande del Sur, Brasil	18	Tendencia creciente	Tendencia creciente	Tendencia creciente

Además de las variaciones radiales, Silva et al. (2007) concluyeron que las dimensiones de las fibras de *E. grandis* también varían con la edad, lo cual coincide con los hallazgos de Resquín (2007) en Uruguay y de Baldin et al. (2017) en Brasil. No obstante, Silva et al. (2007) destacan que las variaciones observadas según posición radial fueron más pronunciadas que las observadas entre edades.

En el estudio de Silva et al. (2007), se encontró una correlación positiva entre la longitud de las fibras y el espesor de la pared celular con la edad, mientras que el diámetro total de la fibra mostró una correlación negativa. Baldin et al. (2017) explican que este comportamiento se debe a un incremento en la longitud de las células que las originan, conocidas como células iniciales fusiformes, explican que la estabilización sólo se producirá cuando las células del cambium alcancen su máxima longitud, iniciando la formación de madera adulta.

2.4.2.5.2 Variabilidad de las fibras dentro del árbol a nivel axial

Diversos estudios sobre *E. grandis* han señalado que las dimensiones de las fibras varían según la altura del árbol (Tabla 4). En este contexto es relevante considerar las distintas alturas a las que se llevaron a cabo estas evaluaciones; por ejemplo, Rocha et al. (2004) analizaron los parámetros biométricos de las fibras a 25, 50, 75 y 100% de la altura comercial. Por otro lado, Núñez (2007) realizó sus mediciones a 10, 15, 35, 50, 70 y 75% de la altura del fuste. Asimismo, Do Sacramento Albino et al. (2012) centraron su estudio en alturas específicas de 1,3, 2,6 y 3,9 m.

Tabla 4

Variación de las dimensiones de las fibras en dirección base-copa de E. grandis

Autor	Origen	Longitud de fibra	Diámetro total de fibra	Espesor de pared de fibra
Rocha et al. (2004)	Estado de Paraná, Brasil	Presentan valores mayores entre la base y el 25% de la altura comercial y sucede lo contrario entre el 75 y 100% de la altura		No presenta diferencias estadísticamente significativas
Núñez (2007)	Misiones, Argentina	Disminuye pasado el 50% de la altura comercial del fuste	Maximiza valor en el primer tercio de la altura para luego producir un descenso hasta la copa	Poca variación, con tendencia a disminuir con la altura
Do Sacramento Albino et al. (2012)	Minas Gerais, Brasil	-	Aumenta de la base hasta los 3,9 m	Tendencia a disminuir de la base hasta los 4 m

Estos estudios indican que la longitud de las fibras de *E. grandis* tiende a disminuir a partir de un cierto porcentaje de la altura comercial del fuste. En particular, Núñez (2007), concluyó que esta disminución, observable más allá del 50% de la altura comercial, es un fenómeno habitual en todas las maderas latifoliadas. Este comportamiento se debe a la mayor proporción de madera juvenil en las partes superiores del árbol, lo que resalta la importancia de considerar la altura al evaluar las características de las fibras.

2.5 PARED CELULAR Y QUÍMICA DE LA MADERA

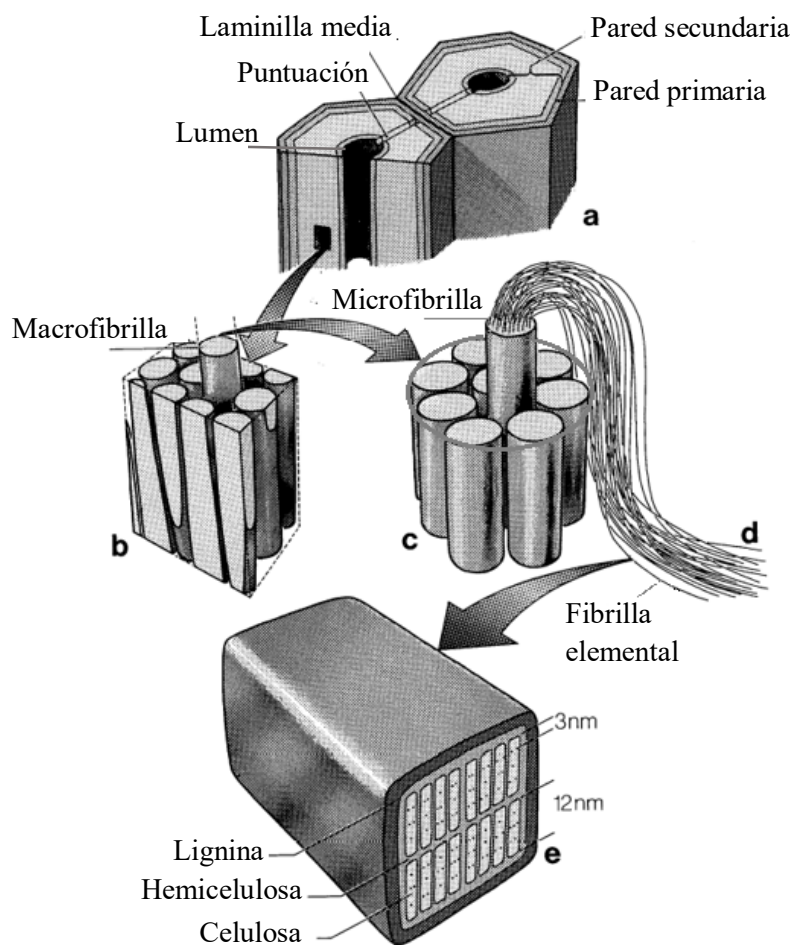
Según *Wood handbook* (2010), en muchas células maduras de la madera, la presencia de protoplasma no es necesaria y este es eliminado por completo antes de alcanzar la madurez funcional. Como resultado estas células quedan constituidas por la pared celular y la cavidad dentro de la célula denominada lumen. Esta estructura es clave, ya que, según los mismos autores, la pared celular es el componente que determina la mayoría de las propiedades de la madera.

Como explican Rosato y Traversa (2017), la pared celular está organizada en tres regiones: la laminilla media, la pared primaria y la pared secundaria. La laminilla media es la primera membrana que separa las células durante la división celular y está compuesta principalmente por pectato de calcio y magnesio, cuya función principal es conectar las células entre sí. A partir de ésta y hacia el interior de la célula, se forma la pared primaria, que es elástica y acompaña el crecimiento celular durante la diferenciación. Una vez que la célula alcanza su tamaño final, se desarrolla la pared secundaria, compuesta por tres capas denominadas S1, S2 y S3. Paralelamente, se inicia el proceso de lignificación desde el exterior hacia el interior, siendo más intenso en la laminilla media y en la pared primaria (Rosato & Traversa, 2017). Cabe destacar que la capa S2, al ser la más gruesa de las capas de la pared secundaria, es la principal contribuyente a las propiedades de la pared celular (*Wood handbook*, 2010).

La compleja organización interna de estas regiones está dada por las microfibrillas, que a su vez se componen de agregados de microfibrillas (Figura 11) (Behr & Seidensticker, 2020; Hüttermann et al., 2001). Estas microfibrillas presentan zonas altamente ordenadas, cristalinas, que se alternan con zonas paracristalinas o amorfas, menos ordenadas (Ibáñez et al., 2009). Ambas zonas cumplen funciones complementarias, mientras la zona cristalina proporciona resistencia a la rotura, la zona amorfa permite flexibilidad y expansión, contribuyendo así a las propiedades estructurales de la madera (Rosato & Traversa, 2017). Las microfibrillas, a su vez, están compuestas por fibrillas elementales, que consisten en moléculas de celulosa (Rosato & Traversa, 2017). Por último, el espacio entre las fibras vegetales (lámina media), microfibrillas, microfibrillas y las fibrillas elementales está ocupado por lignina (Behr & Seidensticker, 2020; Hüttermann et al., 2001), quien forma, junto a la hemicelulosa, una matriz resistente a la presión en la madera protegiendo a la celulosa de la degradación enzimática (Behr & Seidensticker, 2020).

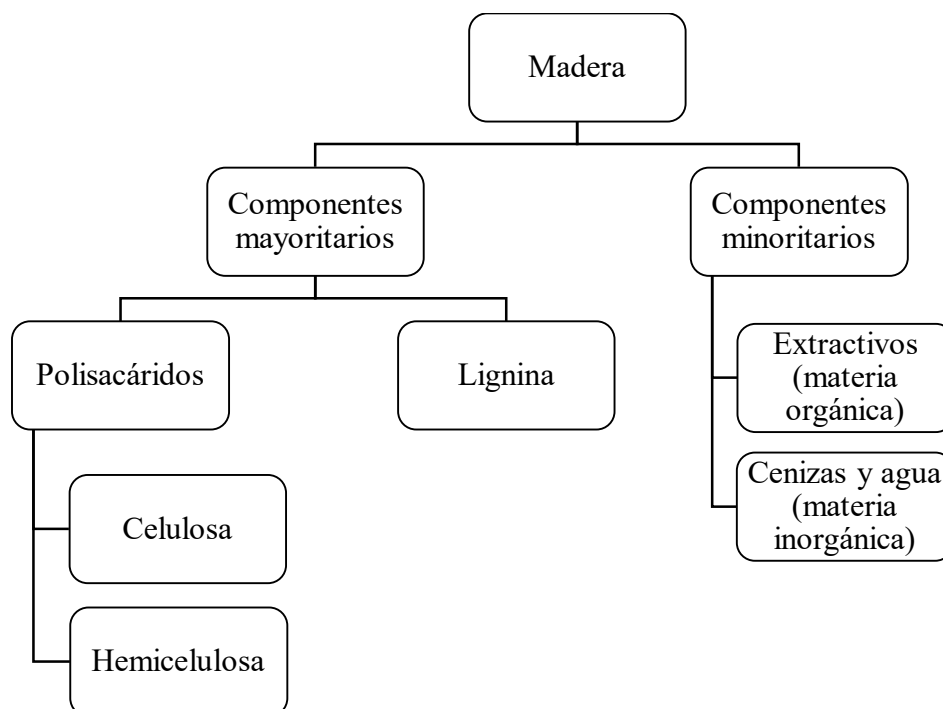
Figura 11

Representación esquemática de la pared celular vegetal a cuatro niveles



Nota. a) corte transversal de una fibra de madera, donde se observa la laminilla media, pared celular primaria y secundaria; b) sección transversal de una porción de pared secundaria con macrofibrillas; c) manojito de microfibrillas; d) fibrillas elementales; e) corte transversal de una fibrilla elemental, donde se observa la composición ultraestructural: lignina, hemicelulosa y celulosa. Adaptado del dibujo realizado por G. Tambour, Forstliche Fakultät, Göttingen como se cita en Hüttermann et al. (2001).

La estructura física de la pared celular está estrechamente relacionada con su composición química. Esta incluye diversos componentes macromoleculares, entre los cuales destacan los polisacáridos, principalmente la celulosa y hemicelulosa y por otro lado, la lignina (Tabla 5). Además, contiene componentes minoritarios de bajo peso molecular, como extractivos, cenizas y agua (Klock & De Andrade, 2013; Rosato & Traversa, 2017).

Tabla 5*Componentes químicos de la madera*

La proporción y características de los componentes químicos mencionados varían. En el caso de las maderas latifoliadas se han encontrado los siguientes porcentajes relativos al peso seco: el contenido de celulosa oscila entre el 40 y el 50%, mientras que la hemicelulosa se sitúa entre el 15 y el 35% y la lignina representa entre el 17 y el 25% (Ibáñez et al., 2009). En contraste, los extractivos generalmente se encuentran en proporciones inferiores al 10% y los niveles de nitrógeno y fósforo suelen ser muy bajos (Ibáñez et al., 2009). Estas diferencias, junto con las variaciones en la estructura celular, influyen en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, tales como el peso, la dureza y la rigidez (*Wood handbook*, 2010).

2.5.1 Celulosa

La celulosa es el componente principal de la madera y el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza (Li et al., 2021; Rosato & Traversa, 2017). Se trata de un polímero, específicamente un homopolisacárido de cadena lineal (Rosato & Traversa, 2017), que está constituido por residuos de glucosa unidos mediante enlaces glucosídicos β (1-4) (Behr & Seidensticker, 2020; Ibáñez et al., 2009). Esta estructura le proporciona alta resistencia a la tracción e insolubilidad en la mayoría de los solventes, además de ser muy estable químicamente (Klock & De Andrade, 2013; Rosato & Traversa, 2017).

Las propiedades de la celulosa se definen por su alto grado de polimerización, que la posiciona como uno de los polisacáridos más largos (Ek et al., 2009), así como por la presencia de dos terceras partes de regiones cristalinas (Martín & Manzanares, 1994). A este porcentaje ocupado por las regiones cristalinas se le denomina grado de cristalinidad (Reina, 2010).

2.5.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa es un componente celular fundamental que se encuentra estrechamente asociado con la celulosa y la lignina en los tejidos vegetales (Klock & De Andrade, 2013; Riki et al., 2019). Su principal función es proporcionar elasticidad a la pared celular (Hüttermann et al., 2001).

Rosato y Traversa (2017) describen a la hemicelulosa como un heteropolisacárido compuesto por diversas unidades de monosacáridos, que incluyen glucosa, manosa, galactosa, xilosa y arabinosa, enlazadas mediante diferentes tipos de enlaces glicosídicos del tipo α y β . Según los autores, la hemicelulosa se organiza en una cadena base que repite una unidad estructural, acompañada de cadenas laterales, conocidas como ramificaciones. Sin embargo, esta unidad estructural no es uniforme, por el contrario, presenta variaciones en función de los distintos tipos de enlaces que puede formar, así como de la diversidad en la unidad estructural misma. En las latifoliadas, la unidad que generalmente se repite es el xilano.

En comparación con la celulosa, el grado de polimerización de las hemicelulosas es significativamente inferior (Riki et al., 2019). Según Behr y Seidensticker (2020) y Rosato y Traversa (2017) esta diferencia estructural, junto con su naturaleza amorfa y su bajo grado de cristalinidad, resultado de sus ramificaciones, les confiere una mayor reactividad. Como consecuencia, esto se traduce en una degradación más acelerada, un aspecto que contrasta notablemente con la estabilidad de la celulosa.

2.5.3 Lignina

La lignina, junto con la celulosa y la quitina, constituye los compuestos orgánicos más comunes de la tierra y desempeña un papel crucial en las plantas vasculares, especialmente en la madera (Behr & Seidensticker, 2020). Este compuesto cumple varias funciones esenciales, como aumentar la rigidez de la pared celular, unir las células entre sí y reducir la permeabilidad de la pared celular al agua (Klock & De Andrade, 2013). Además, protege la madera de microorganismos y le proporciona propiedades únicas de rigidez y resistencia al permitir la absorción de fuerzas de compresión (Klock & De Andrade, 2013).

La lignina exhibe una estructura compleja, que se define como un polímero tridimensional, aromático (más específicamente fenólico), amorfo y con ramificaciones (Behr & Seidensticker, 2020; Klock & De Andrade, 2013). Está formada por tres monolignoles: alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico, que se unen de diferentes maneras para formar la macromolécula (Behr & Seidensticker, 2020). Esta complejidad química surge no sólo por las variaciones en las estructuras y formas de unión de las unidades estructurales (monolignoles), sino también porque si bien es un polímero, no puede convertirse en sus monómeros sin alterar de esta manera sus unidades estructurales (Rosato & Traversa, 2017).

Es relevante señalar que, según Behr y Seidensticker (2020) la constitución de la lignina presenta variaciones tanto entre plantas, como dentro de un mismo individuo, dependiendo de diversas zonas del árbol y de su edad. Esto hace que sea imposible

conocer con exactitud la estructura de la lignina de una planta en particular. Sin embargo, es posible indicar la frecuencia de aparición de diferentes monómeros y los tipos de enlaces, información que permite caracterizar la lignina de una planta. Por ejemplo, en latifoliadas, se observa una alta proporción de alcohol sinapílico formando la lignina (Behr & Seidensticker, 2020).

Por otro lado, a diferencia de la celulosa y la hemicelulosa, el grado de polimerización de la lignina resulta difícil de definir, debido a que durante el proceso de extracción se fragmenta sufriendo cambios en sus propiedades físicas y químicas (Alves Ferreira de Gouveia, 2014).

2.5.4 Extractivos y cenizas

Aunque los extractivos y las cenizas significan un pequeño porcentaje de la masa de la madera, estos materiales pueden tener una gran influencia en sus propiedades (olor, sabor, color, entre otros) y calidad de procesamiento (Klock & De Andrade, 2013). Estas sustancias de bajo peso molecular están compuestas principalmente por compuestos aromáticos (fenólicos), terpenos, ácidos alifáticos, alcoholes, sustancias inorgánicas (Klock & De Andrade, 2013).

Según Klock y De Andrade (2013) los extractivos de la madera incluyen compuestos como resinas vegetales, aceites esenciales, gomas y mucílagos, cuya concentración suele ser mayor en la corteza, hojas, flores, frutos y semillas, en comparación con la madera. Además, la composición y la cantidad relativa de extractivos varían en función de diversos factores, tales como la especie, la edad y la región de origen (Ramos León et al., 2016). Dentro de un mismo individuo, también es común observar una disminución en el contenido de extractivos a medida que se incrementa la altura del árbol (Walker, 2006).

Para los análisis químicos de la madera, el primer paso consiste en extraer estos compuestos mediante solventes neutros, con el fin de eliminar posibles interferencias que puedan afectar la precisión en la medición de los componentes macromoleculares de las paredes celulares (Klock & De Andrade, 2013; Sluiter et al., 2005). De omitirse esta extracción, puede resultar en un aumento erróneo en la cantidad de lignina analizada, así como en un error en la determinación de celulosa y hemicelulosa (Sluiter et al., 2005).

Una forma de clasificar los extractivos es según su forma de extracción, lo que incluye materiales volátiles con vapor de agua (no son significativos en angiospermas), solubles en solventes orgánicos y solubles en agua (Klock & De Andrade, 2013). La elección del solvente influye en la cantidad y calidad del extracto, siendo los principales solventes el etanol, la acetona, el diclorometano y el éter (Klock & De Andrade, 2013).

Por otro lado, la parte inorgánica de la madera se analiza como ceniza, que es el resultado de la incineración de la materia orgánica a 600 ~ 850 °C (Klock & De Andrade, 2013). En este contexto, los principales componentes de la ceniza de madera son potasio, calcio y magnesio, que se presentan en forma de óxidos; además, entre los aniones más comunes se encuentran carbonatos, fosfatos, silicatos y sulfatos (Klock & De Andrade, 2013).

Es relevante destacar que, en la madera procedente de zonas templadas, el porcentaje de cenizas varía entre 0,2-0,5% (Klock & De Andrade, 2013). No obstante, su composición puede ser muy variable, ya que depende tanto del tipo de suelo donde creció el árbol como del tipo de tejido en el que se realiza la determinación.

2.5.5 Valores promedio y variación de la composición química

Al analizar 12 especies de *Eucalyptus*, Neiva et al. (2015) concluyeron que existe una variación significativa en su composición química. Esta variabilidad se presenta no solo entre especies, sino también dentro de cada una y en cada individuo (Leal et al., 2011).

Ante esta variabilidad intraespecífica, muchos autores reportaron el contenido de extractivos, lignina, holocelulosa y cenizas de *E. grandis* según se resume en la Tabla 6.

Tabla 6

Composición química promedio y desvío estándar de E. grandis según distintos autores

Autor	Origen	E.	Ext. (%) *	Lign. insol. (%)	Lign. sol. (%)	Lign. total (%)	Holo. (%)	C. (%)
Ona et al. (1995)	Japón	-	5,2 ± 0,6 *			16,0 ± 0,6	78,8 ± 0,8	
Leal et al. (2011)	Argentina	8 y 10						0,45
Reina (2010)	Uruguay	9	1,71 ± 1,64* *	25,98 ± 1,12	3,63 ± 0,21	29,71 ± 1,11		
Neiva et al. (2015)	Portugal	6	4,2*	25,1	2,7	27,8	66,8	0,4
Batista et al. (2016)	Brasil	18	1,94*	28,31			69,38	
Calonego et al. (2016)	Brasil	30		28,27 ± 1,12			72,77 ± 0,71	

Nota. E.= Edad (años); Ext.=Extractivos; Lign. insol. = Lignina insoluble; Lign. sol. = Lignina soluble; Lign. Total= Lignina total; Holo. = Holocelulosa; C.=Cenizas.
*Extracción con etanol/tolueno; ** Extracción con etanol.

En cuanto a la variación dentro de un mismo individuo, Leal et al. (2011) estudiaron la variación de la composición química de la madera de *E. grandis* según la edad (8 y 10 años) y la altura (30 cm del suelo, 1,30 metros y última sección en el punto de copa) en Salta, Argentina. Descubrieron que la mayoría de los componentes químicos, como celulosa, hemicelulosa y extractivos solubles en agua a temperatura ambiente, presentan variaciones significativas con la edad, pero no con la altura. Sin embargo, observaron que el porcentaje de lignina insoluble en ácido sí varía en función tanto de la edad como de la altura. Según Orea Igarza et al. (2004) esta disminución hacia la parte superior del árbol podría relacionarse con el proceso de lignificación, que ocurre como última etapa en la formación de la pared celular. En la zona apical, donde la madera es más joven, la lignina se encuentra menos reticulada y la presencia de los sistemas aromáticos que la conforman es menor (Orea Igarza et al., 2004).

En contraste, Zhan et al. (2022), al estudiar la composición química de *E. grandis* de 6 años en Sichuan, China, analizando muestras tomadas a 1,30 metros del suelo, en la mitad y en la zona superior del fuste, hallaron variaciones en altura tanto para la lignina como para la celulosa y hemicelulosa. Reportaron que el contenido de lignina a la altura del pecho y en la máxima altura fue significativamente mayor que en la mitad del tronco. En cambio, el contenido de celulosa era notablemente mayor en la mitad del tronco en comparación con la altura del pecho y la parte superior. Además, el contenido de hemicelulosa fue significativamente mayor a la altura del pecho y en la mitad del tronco que en la máxima altura (Zhan et al., 2022).

2.6 DENSIDAD APARENTE BÁSICA DE LA MADERA

Según Tuset et al. (2008), las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento frente a factores naturales, sin afectar su estructura interna química o mecánica. Entre ellas se incluyen el peso específico (real y aparente), contenido de humedad, hinchamiento, contracción, propiedades térmicas, eléctricas, acústicas y de rozamiento (Coronel, 1994). Es importante considerar que, a pesar de que el peso específico (densidad de la madera/densidad del agua) y la densidad de la madera (masa/volumen) son conceptualmente diferentes, es frecuente que en el laboratorio se emplee de manera equivalente, ya que se asume que la densidad del agua es 1 g/cm^3 (Coronel, 1994).

La densidad es una de las propiedades físicas más importantes de la madera, ya que de ella dependen la mayoría de las características físicas y mecánicas (Coronel, 1994). Además, determina del rendimiento real y económico (Doldán et al., 2008).

Esta sección abordará la definición y análisis de los diferentes tipos de densidad de la madera, los factores que la afectan, la variabilidad inter e intraespecífica, con énfasis en *E. grandis* y la variación dentro de un mismo árbol.

2.6.1 Densidad real y aparente

Como la madera es un material poroso, la densidad se puede expresar de dos maneras, densidad real y aparente. La primera refiere a la relación entre la masa del material y el volumen realmente ocupado por material leñoso, excluyendo el volumen de

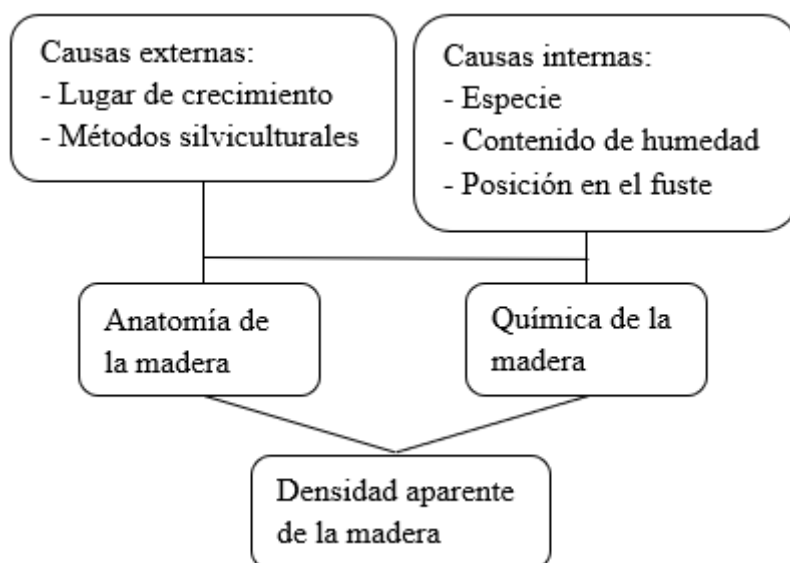
poros, mientras que la segunda es la relación entre la masa de la muestra y el volumen total de la misma, medidos en las mismas condiciones de humedad, en este último caso se incluye el volumen de poros, tanto inter como intracelulares (Coronel, 1994).

La densidad real es un valor sensiblemente constante para todas las especies, de aproximadamente 1,53 a 1,56 g/cm³, sin embargo, la densidad aparente es muy variable, ya que no solo depende de la estructura de la madera, sino también del contenido de humedad de la muestra, que influye sobre la masa y el volumen (Fritz Durán, 2004; Coronel, 1994). Debido a esto, es de gran importancia indicar la humedad a la cual fue estimada la densidad, para así poder comparar valores entre sí (Fritz Durán, 2004). La densidad aparente para las maderas livianas varía entre 0,1 y 0,3 g/cm³ y hasta 1,2 a 1,4 g/cm³ para las maderas pesadas (Coronel, 1994). Esta propiedad puede expresarse de varias formas, como densidad aparente al 12% de humedad, también conocido como densidad aparente normal, correspondiente a condiciones climáticas normalizadas de 20°C de temperatura y 65% de humedad relativa del aire; como densidad aparente al 15% de humedad, correspondiente al estado de madera seca al aire; densidad aparente anhidra, que corresponde a 0% de humedad y en muchas ocasiones, se emplea el valor denominado densidad aparente básica (Dab), que es la relación entre el peso seco de la muestra sobre volumen al estado verde (Coronel, 1994; Lopes & Garcia, 2002; Tuset et al., 2008).

La densidad aparente básica es especialmente empleada debido a la dificultad de determinarse con exactitud el volumen a 0% de humedad, pues la madera seca al extraerse de la estufa comienza a tomar humedad del medio ambiente, modificando así su peso y volumen, dando lugar a daños como rajaduras, colapso, entre otros (Coronel, 1994). Esta determinación tiene la ventaja de ser fácil de medir y permitir un valor reproducible, seguro e invariable, lo que lo hace muy útil en estudios teóricos y comparaciones (Coronel, 1994; Downes et al., 1997).

2.6.2 Factores que influyen sobre la densidad aparente

La variabilidad en los valores de densidad aparente refleja diversas causas externas e internas que actúan sobre la organización de la estructura anatómica de la madera, en el tamaño de las células que constituyen el leño y en su composición química (Tabla 7) (Coronel, 1994; Downes et al., 1997). De acuerdo con Coronel (1994), entre las principales influencias externas que pueden afectar el valor de la densidad aparente de la madera se encuentran el lugar de crecimiento y los métodos silviculturales. En cuanto a las causas internas, el mismo autor señala factores como la especie vegetal, el contenido de humedad y la posición de la toma de muestras en el fuste. Aunque esta propiedad puede variar entre especies, entre individuos de la misma especie e incluso dentro de un mismo árbol, las diferencias más significativas se observan entre especies, seguidas por aquellas entre árboles (Coronel, 1994; Monteoliva et al., 2015).

Tabla 7*Factores determinantes de la densidad de la madera*

Nota. Adaptado de Coronel (1994) y Downes et al. (1997).

A nivel anatómico, las variables que mayor influencia ejercen sobre la densidad son 1) la morfometría de las fibras, en particular el grosor de las paredes celulares (León, 2010; McDonald et al., 1995; Monteoliva et al., 2015, 2017) y el diámetro del lumen (León, 2010; Monteoliva et al. 2017) y 2) la proporción que ocupa este tejido con respecto al total del volumen leñoso (León, 2010; McDonald et al., 1995; Monteoliva et al., 2015, 2017). Además, Monteoliva et al. (2017) resaltan la importancia de considerar la fracción de lúmenes ocupada por los vasos y la proporción que estos representan en el volumen total.

2.6.2.1 Variación interespecífica

Monteoliva et al. (2015, 2017) en Argentina, junto con diversos estudios en Uruguay, como los de Balmelli y Resquín (2000), González y Lago (2006) y Doldán et al. (2008), coinciden en que *E. grandis* muestra la menor densidad aparente básica en el fuste al compararla con otras especies de *Eucalyptus*. Monteoliva et al. (2015) compararon *E. grandis* con *E. viminalis* y *E. globulus*, mientras que Monteoliva et al. (2017) ampliaron el estudio, incluyendo *E. camaldulensis*. En Uruguay, Balmelli y Resquín (2000) evaluaron esta especie junto con *E. saligna*, *E. dunnii*, *E. badjensis*, *E. viminalis* – *C. tessellaris*, *E. bicostata* y *E. maidenii*, mientras que González y Lago (2006) la compararon con *E. dunnii* y Doldán et al. (2008) con *E. dunnii*, *E. maidenii* y *E. globulus*.

Balmelli y Resquín (2000) sugieren que esta menor densidad en *E. grandis* podría estar asociada a su mayor velocidad de crecimiento en comparación con otras especies. A nivel anatómico, Monteoliva et al. (2017) atribuyen estos resultados a que esta especie presenta un mayor espesor y ancho de fibras, lo que implica una menor cantidad de fibras por unidad de superficie. Además, exhibe una elevada cantidad de vasos con un mayor diámetro de estos.

2.6.2.2 Variación intraespecífica

En relación con la variabilidad intraespecífica, la Tabla 8 presenta un resumen de los valores promedio de densidad aparente básica de la madera para *E. grandis*, reportados por distintos autores.

Tabla 8

Valores promedio de densidad aparente básica de E. grandis

Autor	Localidad	Edad (años)	Densidad aparente básica promedio y desvío estándar (g/cm ³)
Böthig (2001)	Rivera, Uruguay	13,5	0,463 ± 0,0046
Doldán (2003)	Río Negro, Uruguay	18	0,432 ± 0,052
Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2 (2005)	Rivera, Uruguay	18	0,402 ± 0,037
González y Lago (2006)	Río Negro, Uruguay	10 y 12	0,400 ± 0,032 (10 años) 0,405 ± 0,028 (12 años)
Doldán et al. (2008)	Uruguay*	8 a 10	0,423 ± 0,0255
Winck et al. (2014)	Misiones y Corrientes, Argentina	4 a 32	0,48 ± 0,09
Monteoliva et al. (2015)	Buenos Aires y Entre Ríos, Argentina	11 a 15	0,421 ± 0,02
Verocay (2022)	Rocha, Uruguay	11	0,381 ± 0,03
Bulman-Hartkopf et al. (2024)	Misiones, Argentina	11	0,368 ± 0,034 (EG INTA 157) 0,467 ± 0,052 (EG INTA 36)

Nota. *No presenta información acerca del departamento.

Winck et al. (2014) atribuyen estas variaciones en la densidad aparente básica a factores como la ubicación, la clase de altura y la edad de los individuos analizados (entre 4 y 32 años). Según Martínez et al. (2023), el aumento en la densidad con la edad se debe a un mayor porcentaje de leño maduro. Por su parte, Böthig (2001) observó diferencias en la densidad promedio entre lotes de un mismo monte de *E. grandis* de 13,5 años en Rivera, Uruguay, que provenían de la misma semilla, sitio, manejo y edad, y recibieron el mismo proceso industrial (secado en horno a baja temperatura), además de haber sido sometidos a un muestreo aleatorio. Estas diferencias fueron atribuidas a la variabilidad natural de la especie.

2.6.2.3 Variación dentro de un mismo árbol

La densidad aparente básica de *E. grandis* presenta variaciones tanto a nivel radial como axial (Martínez et al., 2023). En cuanto a la variación radial, Fukazawa (1984), como se cita en Cobas (2012), señala que, al ser una latifoliada de porosidad difusa, esta especie exhibe comportamientos diversos. Estudios realizados en Argentina y Uruguay han identificado dos patrones en la densidad aparente básica en dirección radial: un incremento en dirección médula hacia la corteza (Bulman-Hartkopf et al., 2024; Martínez et al., 2023; Verocay, 2022), o una disminución inicial en dirección médula hacia la zona intermedia seguido de un incremento de esta zona hacia la corteza (Tabla 9) (Bulman-Hartkopf et al., 2024; Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2, 2005).

Tabla 9*Tipo de variación radial y axial de la densidad en E. grandis según diferentes autores*

Autor	Localidad	Edad (años)	Variación radial	Variación axial
Coronel (1994)	Argentina*	-	-	Decreciente hasta alcanzar casi la mitad de la altura, donde presenta un valor mínimo, volviendo a aumentar el valor, pero generalmente sin alcanzar los valores de la base.
Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2 (2005)	Rivera, Uruguay	18	Disminución inicial seguida de un incremento hacia la corteza	Creciente con la altura del fuste
Verocay (2022)	Rocha, Uruguay	11	Incremento médula-corteza	Sin diferencias significativas entre alturas
Martinez et al. (2023)	Entre Ríos, Argentina	15	Incremento médula-corteza	Creciente con la altura del fuste
Bulman- Hartkopf et al. (2024)	Misiones, Argentina	11	Principalmente incremento médula-corteza, pero también disminución inicial seguida de un incremento hacia la corteza.	Decreciente con la altura del fuste

Nota. *No presenta información acerca de la provincia.

Los patrones de variación radial de esta propiedad se explican por la presencia de tres tipos de madera, la madera juvenil, la madera de transición (que presenta variaciones graduales de densidad entre las regiones interna y externa del tronco) y la madera adulta, que depende de la altura del árbol evaluada (Arango & Tamayo, 2008; Doldán, 2003). El incremento observado en los modelos se explica a nivel celular, por el aumento del

espesor de pared de la fibra y la disminución del lumen en sentido médula hacia la corteza (Ramos et al., 2011; McDonald et al., 1995; Silva et al., 2007).

Respecto a la variación axial de la densidad aparente básica en *E. grandis*, los estudios en Uruguay y Argentina han mostrado resultados diversos. Algunos patrones de crecimiento observados incluyen un incremento con la altura del fuste (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2, 2005; Martínez et al., 2023), una disminución con la altura (Bulman-Hartkopf et al., 2024), un decrecimiento hasta aproximadamente la mitad de la altura seguido de un aumento hasta el extremo superior (Coronel, 1994) y la falta de variación significativa (Tabla 9) (Verocay, 2022). Es relevante mencionar que cada estudio utilizó diferentes intervalos de altura del fuste para su evaluación. Por ejemplo, el Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto – GT2 (2005) evaluó 3 trozas de 0-4 m, 4-8 m y 8-12 m; Martínez et al. (2023) estudió a 1,30 m, 4,65 m y 8 m de altura del fuste; Bulman-Hartkopf et al. (2024) a 0,10 m, 2,80 m y 5,50 m; Coronel (1994) a 0,30 m, 1,30 m, 2,30 m, 3,30 m, 4,30 m, 5,30 m y 6,30 m de altura del fuste y Verocay (2022) a 1,3 m y 2 m.

Estas variaciones observadas con respecto a la altura se atribuyen a diferentes características de la madera, particularmente la proporción de albura en comparación con el duramen, así como a la relación entre la madera juvenil y la madera adulta (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2, 2005).

Finalmente, en un rodal de *E. grandis* de 11 años, Verocay (2022) no encontró interacciones significativas entre las variaciones radial y axial de la densidad.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ETAPA DE CAMPO

3.1.1 Descripción del sitio

3.1.1.1 Localización

El muestreo se realizó en la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurt (EEBR) de la Facultad de Agronomía, localizada en el km 408 de la ruta 26 “Gral. Leandro Gómez”, a 25 km al oeste de la ciudad de Melo (32° 21.366'S, 54° 26.591'O) (Figura 12). Se seleccionó al azar un rodal de la especie *E. grandis* plantado el 27 de octubre y 7 de noviembre de 1993, con una edad de 30 años al momento del apeo. Este no fue sometido a podas ni raleos y presentó una densidad de 590 árboles por hectárea.

Figura 12

Ubicación del rodal bajo estudio en la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurt



Nota. Adaptado de Google (2024).

3.1.1.2 Clima

Según el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET, s.f.) las estadísticas climáticas del período 1991-2020 para 16 estaciones meteorológicas del país, indican que la temperatura media anual de la ciudad de Melo, cercana al predio en estudio, presenta un promedio de 17,8°C, con máximas en los meses de enero - febrero que pueden llegar a los 30,2°C promedio y mínimas que se presentan en los meses de junio - julio con valores promedio de 6,5 °C. La humedad relativa anual es de 72% y las precipitaciones acumuladas anuales del período son de 1453 mm (INUMET, s.f.).

El número de heladas acumulado anualmente (período mayo a octubre) para la zona se encuentra entre 35 a 40 días, con posibles ocurrencias principalmente en los meses de junio y julio, pudiendo ocurrir algunas heladas tempranas en el mes de mayo o tardías en los meses de agosto, septiembre y octubre (Castaño et al., 2011)

3.1.1.3 Suelos y Topografía

Según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000, la EEBR se encuentra sobre la unidad de suelo Zapallar (Durán, 1976). En esta unidad dominan los suelos de tipo Luvisoles Melánicos Álbicos, siendo los suelos accesorios de tipo Luvisoles Úmbricos Álbicos. Son suelos desaturados lixiviados que presentan siempre un horizonte argilúvico con baja saturación en bases, pH ácido, presencia de aluminio intercambiable y bajo contenido de materia orgánica.

De acuerdo con la cartografía de suelos CONEAT, los suelos se ubican dentro de los grupos 3.51, 8.5 y 13.32, quienes presentan diferencias en cuanto a sus características (Durán, 1976). El 8.5 es el único de prioridad forestal (*Grupos de suelos CONEAT*, 2021) y es el que ocupa la mayor parte de la superficie, seguido del 13.32 y 3.51.

La topografía es de lomada, presentando una pendiente media de 3,5% (Google, 2024). La zona más elevada dentro del rodal se encuentra a 167 metros sobre el nivel del mar (msnm) y la menos elevada a 152 msnm (Google, 2024).

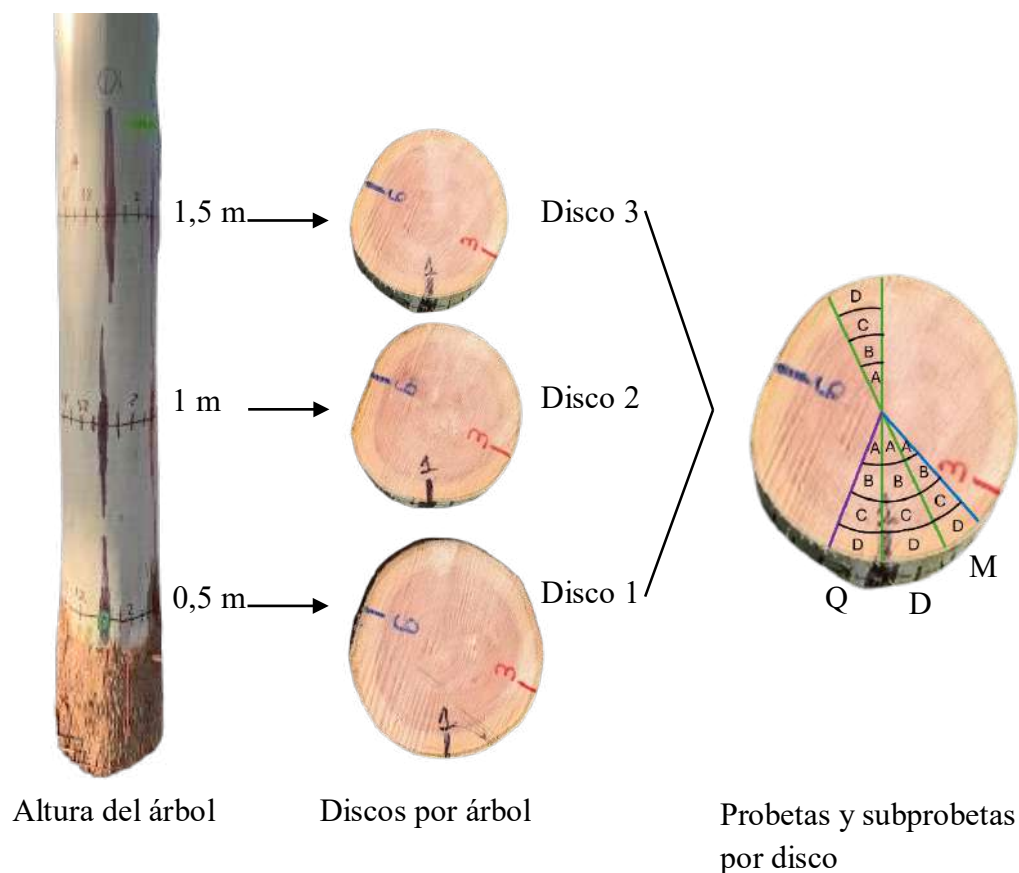
3.1.2 Selección de árboles

Se seleccionaron al azar cinco ejemplares de árboles sanos dentro del rodal, que no presentaban rajaduras y tenían diámetros aproximadamente similares. Para verificar su estado sanitario, se realizaron tomografías. Además, se midió la altura del tocón, de la primera rama y total y el diámetro del fuste a cada un metro hasta 8 cm de diámetro con corteza en punta fina. Con motosierra se extrajeron discos a 0,5m (disco 1), a 1m (disco 2) y a 1,5m (disco 3) de altura en cada árbol (Figura 13). Las alturas seleccionadas corresponden a los parámetros establecidos en la tesis de maestría de Benítez González (2019), titulada “Estudio del proceso de deterioro causado por hongos de pudrición marrón en madera de *Eucalyptus grandis*”, de la cual esta investigación es una continuación.

3.2 ETAPA DE LABORATORIO

3.2.1 Obtención de probetas

De cada disco de madera (discos 1, 2 y 3 por árbol), se obtienen cuatro probetas utilizando un cuchillo y una masa (Figura 13), siguiendo una disposición específica: la probeta destinada al estudio de densidad (D) se ubica en el centro, la probeta para el análisis anatómico (macerado o M) se coloca a la derecha, y la probeta para el análisis químico (Q) a la izquierda. Adicionalmente, para el estudio de densidad, se toma una probeta en una posición diametralmente opuesta. Es fundamental que la madera esté libre de nudos y rajaduras, ya que, evaluar las propiedades anatómicas, químicas y físicas de la madera, requiere utilizar madera libre de defectos.

Figura 13*Discos, probetas y subprobetas*

Nota. Q= Química; D= Densidad y M=Anatomía.

A su vez, cada probeta se dividió en cuatro subprobetas, representando el 25%, 50%, 75% y 100% del radio del disco, y se identificaron de la médula hacia la corteza como 1A, 1B, 1C y 1D. En el caso de la probeta de densidad (D) ubicada en el lado diametralmente opuesto, las subprobetas se nombraron 7A, 7B, 7C y 7D. El número 1 y 7 hacen referencia a los sensores del tomógrafo más cercanos a la ubicación de las probetas. Para las subprobetas de química, se agregó una “Q” al inicio de la nomenclatura (por ejemplo, Q1A), y para las de anatomía, una “M” (por ejemplo, M1A).

En resumen, el análisis de los 5 árboles generó un total de 15 discos y 60 probetas, distribuidas para distintos estudios: 30 probetas fueron asignadas al análisis de densidad (D), 15 al análisis anatómico (M) y 15 al análisis químico (Q). A su vez, estas probetas se subdividieron en 240 subprobetas, organizadas de la siguiente manera: 120 subprobetas para estudios de densidad (identificadas como 1A, 1B, 1C, 1D, 7A, 7B, 7C y 7D), 60 para estudios anatómicos (M1A, M1B, M1C y M1D) y 60 para estudios químicos (Q1A, Q1B, Q1C y Q1D).

3.2.2 Anatomía

Mediante el análisis microscópico de los macerados, se evaluaron los atributos biométricos de las fibras, incluyendo su longitud, ancho y espesor de la pared celular.

3.2.2.1 Macerado

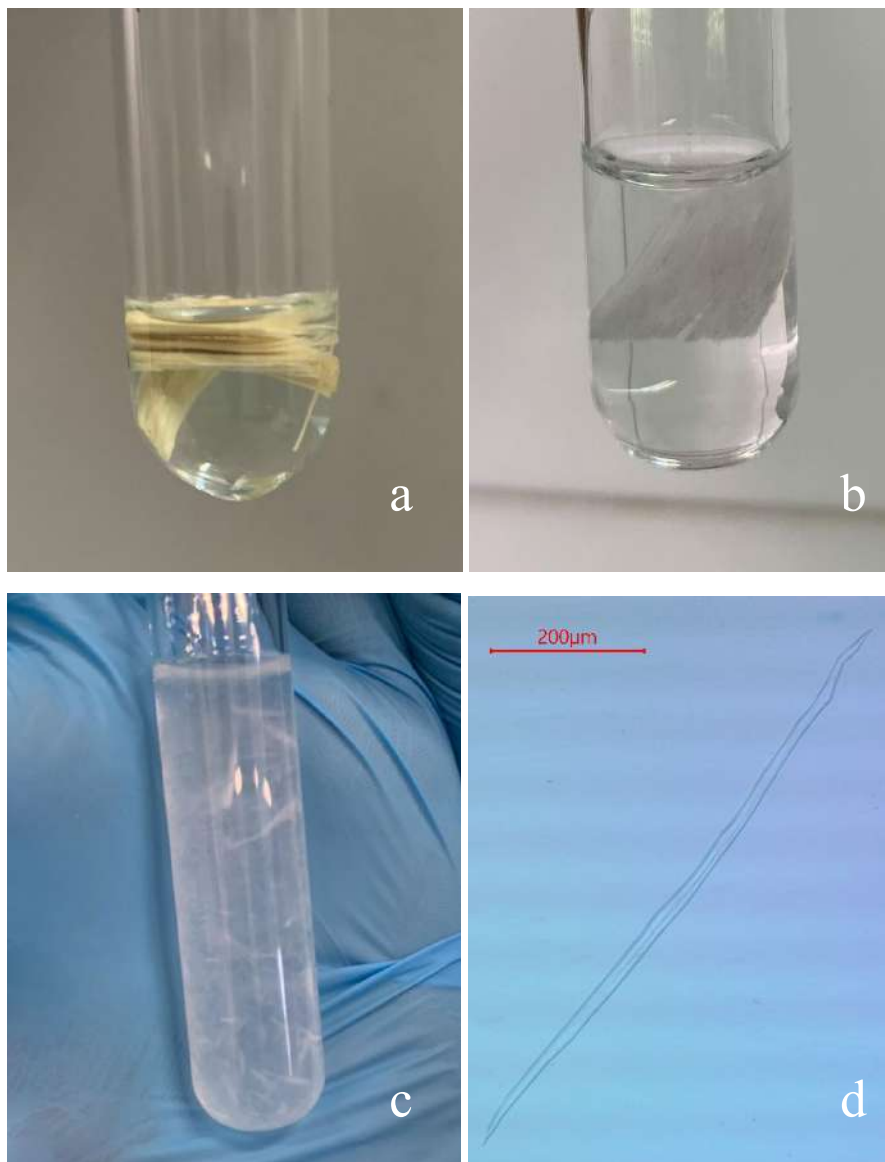
Para realizar el estudio anatómico se hicieron macerados de las subprobetas de madera a través del protocolo establecido por las normas de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (Coradin & De Muñiz, 1991) y por la “IAWA List of Microscopic Features” (1989). Para este proceso se utilizaron los siguientes materiales: tubos de ensayo, ácido acético glacial, peróxido de hidrógeno 130 volúmenes; papel aluminio; estufa marca Nova Ética, modelo 400 / 9D – 300, agua destilada, pipeta automática, portaobjetos y cubreobjetos, microscopio Olympus BH y una cámara y procesador “AmScope” modelo “MU853B”.

De las 15 probetas destinadas a los ensayos anatómicos (M) pertenecientes a los diferentes discos, se extrajeron astillas de las subprobetas M1A, M1B, M1C y M1D, las cuales se colocaron en 60 tubos de ensayo previamente identificados. En cada caso, se agregó una solución, previamente mezclada, de igual proporción de ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno (Figura 14a). Luego, se cubrieron los tubos con papel aluminio.

Los tubos se dejaron macerando en la estufa a 60°C durante 24 horas, momento en el cual las astillas presentaron color blanco (Figura 14b). Posteriormente se descartó la solución y se lavó dos veces con agua destilada, se dejaron las astillas con agua destilada durante cinco minutos y se procedió a lavarlas una vez más, utilizando para esto una pipeta automática. En todos los casos la operación se realizó lentamente, con cuidado de no desfibrar la madera durante la operación de lavado. Se agregó agua destilada nuevamente al tubo, cubriéndolo con papel aluminio.

Al momento de observar las muestras al microscopio se agitó suavemente el tubo de ensayo para desfibrar las astillas (Figura 14c). Con una pipeta automática se tomó una muestra de 0,1 ml y se la colocó en el portaobjeto, cubriéndolo con un cubreobjeto. Entre muestra y muestra se limpió el portaobjeto y cubreobjeto con alcohol.

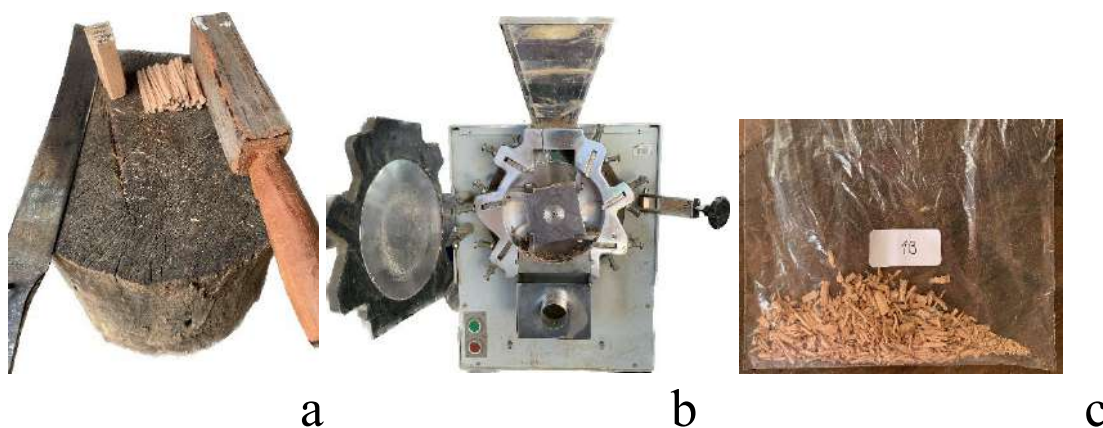
Se capturaron videos y fotos utilizando un Microscopio Olympus BH, fabricado por la empresa japonesa Evident, equipado con una cámara y procesador AmScope modelo MU853B de origen estadounidense (Figura 14d). De cada una de las 60 subprobetas, se evaluaron 25 anchos, 25 largos y 20 espesores de pared celular de las fibras, sumando un total de 4200 mediciones. Se utilizaron lentes objetivas con aumentos de 4x y 10x para medir la longitud y ancho de las fibras y con aumentos de 40x y 100x para medir el espesor de la pared celular. Todos los datos obtenidos fueron registrados en un documento en Microsoft Excel 365.

Figura 14*Macerado de E.grandis*

Nota. a) Madera con ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno; b) Astilla deslignificada; c) Astilla desfibrada; d) Fibra observada al microscopio.

3.2.3 Química

Se chipeó manualmente una probeta destinada a los ensayos químicos (Q) por disco para procesar en un molino brasileño marca MARCONI modelo MA 680, obteniendo así el aserrín necesario para realizar los análisis de composición química (Figura 15a, 15b y 15c). Posteriormente, se procedió con la preparación de la madera, la cual implicó su secado y eliminación de los extractivos; finalmente se determinó el contenido de lignina, holocelulosa y cenizas.

Figura 15*Obtención de insumos para procesamiento químico*

Nota. a) Chipeo; b) Procesamiento en molino; c) Aserrín.

3.2.3.1 Contenido de humedad

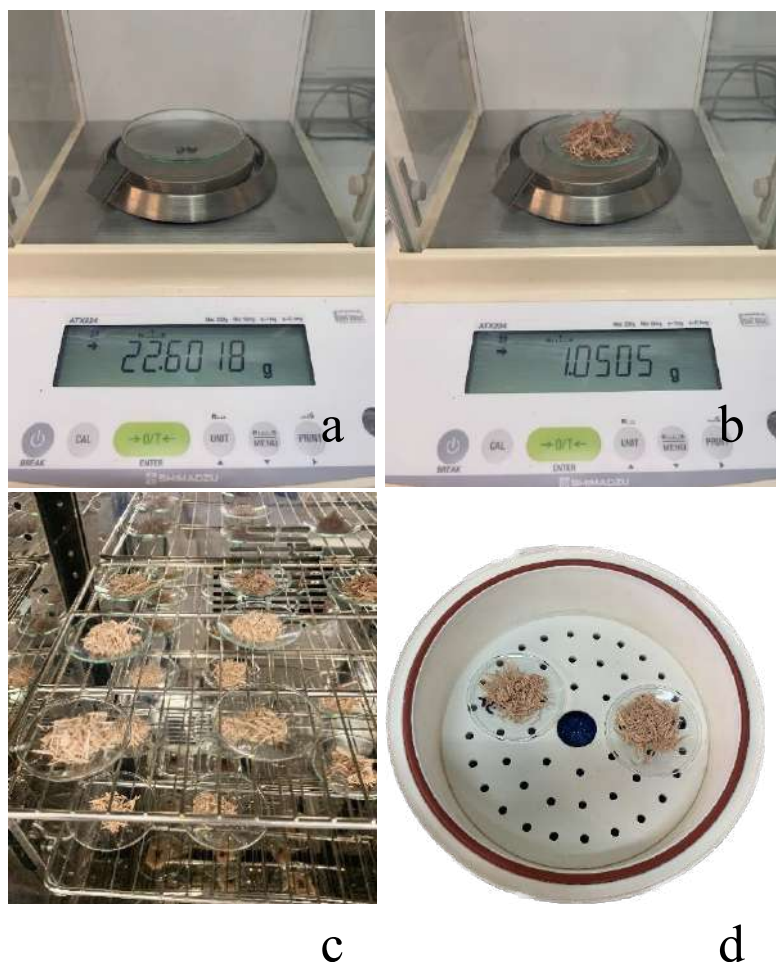
Se determinó el contenido de humedad de la madera mediante el método “Determinación de sólidos totales en biomasa y sólidos disueltos totales” establecido por Sluiter, Hames, Hyman et al. (2008) basado en la diferencia de peso antes y después del secado. Para este proceso se utilizaron los siguientes materiales: vidrio de reloj, balanza analítica marca “Shimadzu”, modelo “ATX224” (220g x 0,1 mg), estufa de esterilización y secado marca “Mettler” modelo “DHG-9053”, con aire forzado, volumen 58L y desecador.

En primer lugar, los vidrios de reloj fueron rotulados y secados en estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante un mínimo de cuatro horas. Posteriormente, se colocaron en un desecador para enfriarlos y pesaron (Figura 16a). Se añadieron sobre estos, las 15 muestras obtenidas en el paso anterior de aproximadamente 2 gramos cada una, utilizando para ello una balanza analítica (Figura 16b). Luego se colocaron las muestras en estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta peso constante (Figura 16c). Al retirarlas, se ubicaron en el desecador hasta que llegaran a temperatura ambiente (Figura 16d). Finalmente, se pesó y calculó el contenido de humedad utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}} * 100$$

Masa húmeda= masa de la muestra húmeda (g).

Masa seca= masa de la muestra seca (g).

Figura 16*Procesamiento de contenido de humedad*

Nota. a) Peso del vidrio de reloj; b) Peso de la muestra; c) Muestras en estufa; d) Madera en desecador previo al pesaje en balanza.

Fue fundamental que las muestras tuvieran un contenido de humedad inferior al 10% antes de continuar con los procedimientos siguientes (Hames et al., 2008). De lo contrario, una hidrólisis incompleta de los azúcares poliméricos en sus formas monoméricas podría resultar en una subestimación del contenido de carbohidratos y una sobreestimación del contenido de lignina (Hames et al., 2008).

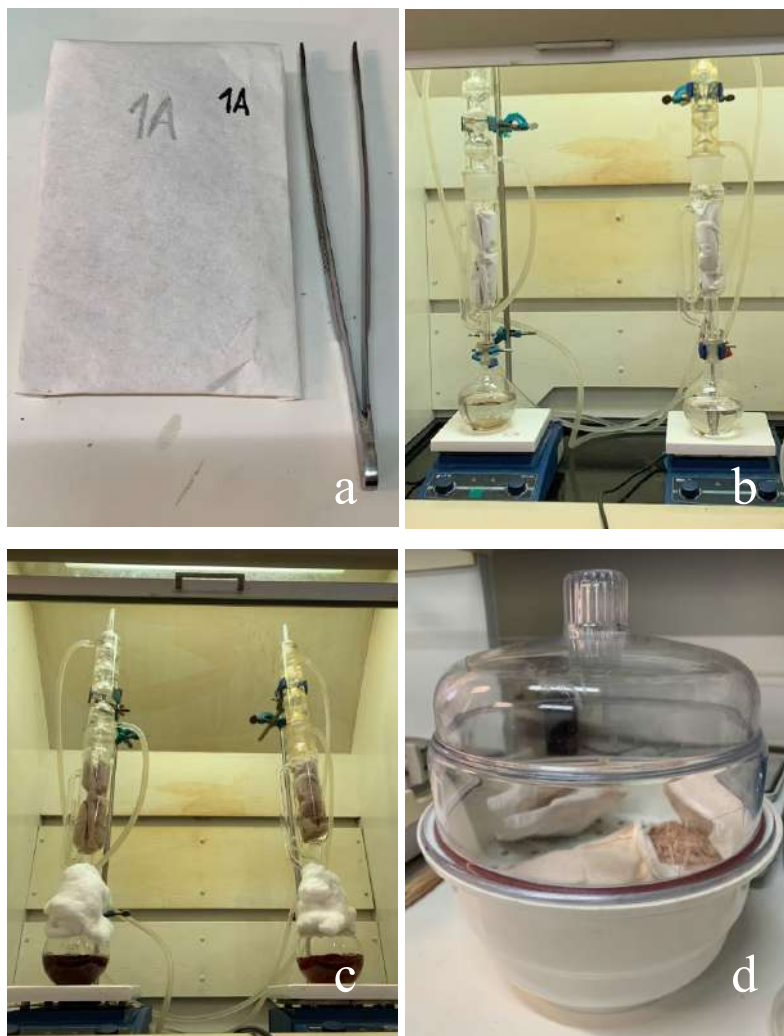
3.2.3.2 Extracción con etanol

La técnica utilizada para retirar los extractivos se basó en la “Determinación de extractivos en biomasa”, propuesta por el laboratorio National Renewable Energy Laboratory (NREL) operado por Alliance for Sustainable Energy, LLC (ASE) (Sluiter et al., 2005). Este método especifica una extracción exhaustiva con 300 mL de etanol como disolvente, adecuado para muestras de madera. Los materiales empleados en este procedimiento fueron: papel de filtro, balanza analítica marca “Shimadzu”, modelo “ATX224” (220g x 0,1 mg), etanol 98%, piedras de ebullición, equipo de extracción, estufa de esterilización y secado marca "Memmert" modelo “DHG-9053”, con aire forzado, volumen 58L y un desecador.

En primer lugar, se preparó el cartucho para la muestra, cortando papel de filtro e identificando el nombre de la muestra correspondiente (Figura 17a). Luego, se pesó el cartucho vacío y se cargó con aproximadamente 8 gramos de madera molida secada en estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante, volviendo a registrar el peso. Se cerró el cartucho y se colocó en el soxhlet, asegurándose de que la altura de la biomasa no exceda la del tubo de ascenso de vapores del equipo. De lo contrario se corre el riesgo de una extracción incompleta.

A continuación, se agregó 300 ml de etanol en el balón con algunas piedras de ebullición y se armó el equipo de extracción, colocando la plancha calefactora sobre la base del soporte y el soxhlet en la pinza unida al soporte, luego se ensambló el soxhlet con el balón y el condensador (Figura 17b). Se abrió el agua que alimenta el sistema de refrigeración controlando el flujo y se encendió la plancha calefactora a 79°C , porque la temperatura de ebullición del etanol es $78,37^{\circ}\text{C}$. El tiempo de extracción fue de 20 horas con 6 sifonadas por hora. Se observó un cambio de coloración en el solvente que se encuentra en el balón, de transparente a amarronado (Figura 17c).

Luego se apagó y desenchufó la manta calefactora. Cuando la temperatura del solvente en el balón alcanzó la temperatura ambiente, se cerró el agua al sistema de refrigeración. Posteriormente, se retiraron los cartuchos del soxhlet y las muestras se colocaron en estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar peso constante. Antes de pesarlas se dejaron en un desecador para evitar errores en la medición (Figura 17d). Tras este procedimiento, el material quedó listo para realizar los análisis químicos pertinentes.

Figura 17*Extracción con etanol*

Nota. a) Cartucho de la muestra 1A; b) Soxhlet empezando la extracción; c) Soxhlet al final de la extracción; d) Madera en desecador previo al pesaje en balanza.

Para determinar el porcentaje de extractivos en base seca de la muestra, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Extractivos (\%)} = \frac{\text{Peso seco inicial} - \text{Peso seco sin extractivos}}{\text{Peso seco inicial}} * 100$$

3.2.3.3 Lignina soluble

La técnica utilizada para determinar lignina soluble se basó en la “Determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa”, propuesta por el laboratorio National Renewable Energy Laboratory (NREL) operado por Alliance for Sustainable Energy, LLC (ASE) (Sluiter, Hames, Ruiz et al., 2008). Para este proceso se utilizaron los siguientes materiales: balanza analítica marca “Shimadzu”, modelo “ATX224” (220g x 0,1 mg), matraz Erlenmeyer 250 ml y 100 ml, ácido sulfúrico 72%, papel aluminio, baño termostatzado marca Faithful, modelo DK-98-(II) A series, agua destilada,

autoclave Quimis, modelo Q298-22, 38L-228V, filtro de papel, embudo de vidrio y un espectrofotómetro UV-Visible marca Peak Instrument, modelo C-7100.

De las muestras libres de extractivos preparadas en el punto anterior, se retiraron dos submuestras de 0,6 g aproximadamente, pesadas en balanza analítica. Cada submuestra se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, previamente identificado. En campana se agregó 5 mL de ácido sulfúrico 72% a cada uno y se cubrieron con papel aluminio, se observó cómo se oscurecen las astillas con este procedimiento, obteniéndose un color marrón oscuro a partir de uno claro (Figura 18a).

Los matraces se ubicaron en el baño termostatzado a 30 °C durante una hora (Figura 18b). Se retiraron los mismos y se les agregó lentamente a cada uno 86,73 mL de agua destilada, obteniéndose una solución de 4% de ácido sulfúrico. Se taparon los matraces con papel aluminio y se colocaron en autoclave durante una hora a 121 °C (Figura 18c).

Una vez que el autoclave alcanzó la temperatura ambiente, se retiraron los matraces y se filtraron las soluciones en un matraz de 100 mL, empleando embudos de vidrio con doble papel filtro, previamente pesado en balanza analítica (Figura 18d). En este paso fue importante no perder material, para ello se observó que todas las astillas quedaran en el papel de filtro y no en el matraz inicial. El fluido filtrado recolectado en el matraz de 100mL fue el que se utilizó para determinar la lignina soluble en espectrofotómetro UV-Visible a 240 nm.

Figura 18*Procedimiento para determinar lignina soluble*

Nota. a) Submuestras con ácido sulfúrico 72%; b) Matraces en baño termostatzado; c) Autoclave con las submuestras; d) Filtrado

Para determinar lignina soluble se midió un control con una solución de ácido sulfúrico al 4% como blanco. Fue importante asegurarse de que la lectura de la absorbancia se mantuviera en el rango de 0,7-1,0, si superaba 1,0 era necesario realizar diluciones exactas y volver a medir. En este caso, no fue necesario realizar diluciones. Finalmente, se calculó lignina soluble utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Lignina soluble (\%)} = \frac{UV \text{ abs} * V_{\text{filtrado}} * \text{Dilución}}{\epsilon * \text{Masa seca} * \text{Paso}} * 100$$

UV abs = promedio absorbancias UV-Vis a la longitud de onda apropiada (240 nm).

$V_{\text{filtrado}} = \text{volumen filtrado (86,73 mL)}$.

$\text{Dilución} = (\text{Volumen muestra} + \text{Volumen solvente para diluir}) / \text{Volumen muestra}$.
Siendo en este caso 1, pues no se realizaron diluciones.

$\varepsilon = \text{Absortividad de la biomasa a la longitud de onda específica (25)}$.

$\text{Masa seca} = \text{masa seca inicial de la muestra (mg)}$.

$\text{Paso} = \text{camino de celda UV (1cm)}$.

3.2.3.4 Lignina insoluble

Para determinar lignina insoluble se utilizó un método basado en la “Determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa”, propuesto por el laboratorio National Renewable Energy Laboratory (NREL) operado por Alliance for Sustainable Energy, LLC (ASE) (Sluiter, Hames, Ruiz et al., 2008). Para este proceso se utilizaron los siguientes materiales: matraz Erlenmeyer 250 ml y 100ml, agua destilada, bandejas de aluminio, estufa de esterilización y secado marca "Mettler" modelo “DHG-9053”, con aire forzado, volumen 58L, desecador y una balanza analítica marca “Shimadzu”, modelo “ATX224” (220g x 0,1 mg).

Se lavó el residuo sólido que quedó en el doble papel de filtro con 150 mL de agua destilada, el cual correspondía a la lignina insoluble de la muestra (Figura 19a). El sólido, junto con el doble filtro, se colocó en bandejas de aluminio y se introdujeron en una estufa a 60°C hasta alcanzar peso constante (Figura 19b). Posteriormente, se retiraron y se colocaron en un desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente, para luego ser pesados en una balanza analítica (Figura 19c y 19d).

Figura 19*Procedimiento para determinar lignina insoluble*

Nota. a) Lignina insoluble posterior al lavado; b) Lignina insoluble en bandeja de aluminio; c) Filtros previos a ser pesados; d) Peso.

Se volvió a realizar el procedimiento, pero utilizando crisoles en vez del doble filtro de papel.

El contenido de lignina insoluble en ácido de la madera se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Lignina insoluble (\%)} = \frac{Mf \text{ con RIA} - Mf}{\text{Masa seca inicial de la muestra}} * 100$$

Mf con RIA= masa de los dos filtros (o crisol) con el residuo insoluble en ácido (g).

Mf = masa de los dos filtros o crisol (g).

Masa seca inicial de la muestra= masa seca inicial de la muestra (g).

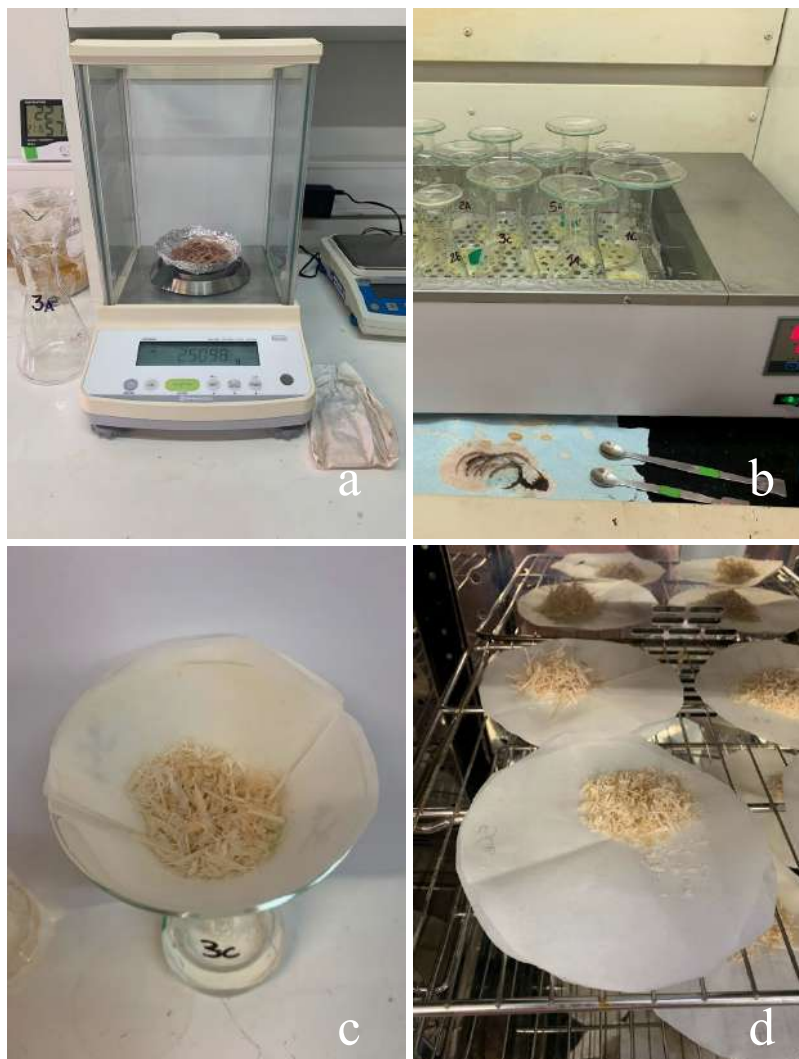
3.2.3.5 Holocelulosa por cloración

El método utilizado para determinar la holocelulosa se basó en el documento “Métodos de análise em química da madeira”, propuesto por el laboratorio de Química da Madeira do Departamento de Produtos Forestais do Instituto de Florestas da UFRRJ (Abreu et al., 2006). Se emplearon los siguientes materiales: balanza analítica marca “Shimadzu”, modelo “ATX224” (220g x 0,1 mg), matraz de Erlenmeyer, clorito de sodio, agua destilada, ácido acético, acetona, baño termostatzado marca Faithful, modelo DK-98-(II) A series, papel de filtro, estufa de esterilización y secado marca "Mettler" modelo “DHG-9053”, con aire forzado, volumen 58L y un desecador.

Se pesaron 2,5 gramos de madera libre de extractivos y completamente seca, la cual se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL (Figura 20a). A continuación, se añadieron 8 mL de agua destilada caliente, 0,5 mL de ácido acético y 1 gramo de clorito de sodio a la muestra, que se colocó en un baño de agua a 70°C durante una hora (Figura 20b). Posteriormente, se añadieron 0,5 mL de ácido acético y un gramo de clorito de sodio adicional, repitiendo este paso hasta separar las fibras completamente de la lignina.

La muestra se mantuvo en reposo en el baño de agua a 70°C durante 24 horas. Después de este período, se dejó enfriar la muestra y se filtró utilizando un filtro previamente pesado (Figura 20c). La muestra se lavó con agua destilada hasta que el color amarillo y el olor a cloro desaparecieron por completo. Finalmente, la muestra se lavó con acetona y se dejó secar en una estufa a 85°C durante 1 hora y media (Figura 20d).

Tras el secado se dejó enfriar en un desecador durante una hora antes de ser pesada nuevamente para calcular el porcentaje de holocelulosa. Este procedimiento aseguró la eliminación completa de la lignina, permitiendo así la determinación precisa del contenido de holocelulosa de la madera.

Figura 20*Procedimiento para determinar holocelulosa*

Nota. a) Peso de la madera libre de extractivos; b) Calentamiento de la mezcla; c) Filtrado; d) Secado en estufa.

Se volvió a realizar el procedimiento, pero utilizando crisoles en vez de filtro de papel.

El contenido de holocelulosa de la madera se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Holocelulosa (\%)} = \frac{Mf \text{ holocelulosa} - Mf}{\text{Masa seca inicial de la muestra}} * 100$$

Mf holocelulosa= masa de los dos filtros (o crisol) y la muestra luego del análisis de holocelulosa (g).

Mf = masa de los dos filtros o crisol (g).

Masa seca inicial de la muestra= masa seca inicial de la muestra (g).

3.2.3.6 Cenizas

Para este proceso se utilizaron los siguientes materiales: balanza analítica marca “Faithful”, modelo “FJ2104” (210g x 0,1 mg), crisoles de porcelana, estufa de secado marca “Nova Ética”, modelo “400 / 9D 300”, desecador, plancha eléctrica, campana de extracción y una mufla marca “Faithful”, modelo “SX-2.5-12”.

Los crisoles de porcelana se secaron en una estufa a 105 °C durante 12 horas. Posteriormente, se dejaron enfriar en un desecador y se pesaron en una balanza analítica (Figura 21a). A continuación, se pesó 1 gramo de muestra seca y molida, que se colocó en los crisoles previamente identificados (Figura 21b). Los crisoles se ubicaron sobre una plancha eléctrica dentro de una campana extractora para quemar la muestra hasta que cesara la emisión de humo (Figura 21c). Luego, se introdujeron los crisoles en una mufla, elevando la temperatura a 200 °C durante una hora (Figura 21d). Posteriormente, se incrementó la temperatura a 525 °C y se mantuvo durante dos horas. Transcurrido este tiempo, se apagó la mufla, se esperó a que bajara la temperatura, se retiraron los crisoles, se dejaron enfriar y finalmente se pesaron.

El contenido de cenizas de la madera se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Masa crisol con cenizas} - \text{Masa crisol}}{\text{Masa seca inicial de la muestra}} * 100$$

Figura 21*Procedimiento para determinar cenizas*

Nota. a) Peso del crisol de porcelana; b) Peso de cada muestra; c) Crisoles colocados en plancha eléctrica; d) Crisoles en mufla.

3.2.4 Densidad aparente básica

El método utilizado para calcular la densidad aparente básica de la madera se basó en la norma 258 om-02, de la Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI, 2006). El proceso incluyó: preparación de las subprobetas, medición del volumen verde, medición del peso anhidro y cálculo de la densidad aparente básica. Para ello, se emplearon los siguientes materiales: recipientes plásticos, papel absorbente, agua de ósmosis, balanza electrónica de precisión marca “Radwag”, modelo “WTC 2000” (2000 g x 0,01 g), bandejas, vaso de bohemia 900 ml y una estufa marca Nova Ética, modelo 400 / 9D - 300.

Este método ofrece la ventaja de poder medir el volumen de cuerpos y de probetas de formas irregulares (Coronel, 1994). Además, según Alarcón et al. (2018) es posible confiar en la estimación de densidad realizada mediante este procedimiento para *E. grandis*, ya que es capaz de realizar estimaciones confiables dentro de los rangos esperados para la especie.

Durante la preparación de las subprobetas se procedió a retirar la corteza de cada una, asegurándose de eliminar astillas adheridas o aserrín, además de verificar la ausencia de contaminantes como tierra. Luego, cada subprobeta (1A, 1B, 1C, 1D, 7A, 7B, 7C y 7D) se colocó en un recipiente con agua de ósmosis hasta estar totalmente sumergidas, agregándoles peso para que no flotarán. El propósito de remojar la madera fue doble, asegurar que las cavidades internas de la muestra estén llenas de agua y eliminar el error resultante de que la madera absorba agua mientras se pesaba para obtener el volumen.

Para determinar el volumen verde se utilizó el método de desplazamiento de fluidos, más específicamente inmersión en agua, basado en el principio de Arquímedes. Este consistió en medir el volumen de la subprobeta de madera en función del peso del agua desplazada por su inmersión, es decir, por la medición del empuje. Para ello, se empleó un soporte que sostenía la madera mediante una aguja.

Se registró en la balanza el peso de un vaso de bohemia con agua de ósmosis, con un volumen suficiente para sumergir una subprobeta de madera (Figura 22a). Posteriormente, con la ayuda del soporte, se sumergió la subprobeta en el vaso, desplazándola para desalojar las burbujas de aire adheridas y registrando el peso obtenido, asegurando que la madera quede completamente sumergida sin tocar las paredes ni el fondo del recipiente (Figura 22b). Como la densidad del agua es 1 g/cm^3 , el volumen verde se calculó como la diferencia entre el peso con la subprobeta y el peso sin la misma. Es importante considerar que, para reducir la adsorción de agua por el leño, las subprobetas se sumergieron solo el tiempo necesario para realizar la estimación del volumen.

La medición del peso en estado anhidro en gramos consistió en colocar las probetas en el horno de secado a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta peso constante (Figura 22c). Para asegurar que se lograra este peso, se realizaron dos pesadas consecutivas en la balanza de precisión hasta una variación menor al $0,3\% \pm 0,01 \text{ g}$ (Figura 22d).

Figura 22

Proceso para determinar densidad aparente básica a partir de madera saturada de agua



Nota. a) Peso de vaso de bohemia con agua de ósmosis; b) Inmersión en agua; c) Subprobetas en horno de secado; d) Peso de la madera en estado anhidro

Finalmente, con los datos de peso anhidro (P_a) y volumen verde (V_v) de las probetas, se calculó la densidad aparente básica expresada en gramos por metro cúbico (g/m^3) ($DApB$)= P_a/V_v .

3.3 ANÁLISIS DE DATOS

3.3.1 Caracterización dendrométrica de árboles en estudio

Se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo de la altura de cada árbol, el tocón, primera rama y los diámetros cada un metro hasta 8 cm de diámetro en punta fina. Asimismo, se estimó el volumen de cada troza de un metro y luego se sumaron los valores, teniendo como resultado el volumen real del árbol. Para obtener los resultados se utilizó la fórmula de Smalian:

$$V (m^3) = \frac{\pi}{8} * (d^2 + D^2) * l$$

V: Volumen cúbico con corteza

D: Diámetro en la cara inferior con corteza (m)

d: Diámetro en la cara superior con corteza (m)

l: Largo de la troza es un metro

3.3.2 Anatomía

Se utilizó el software libre R para el estudio anatómico. El objetivo del análisis estadístico fue evaluar el efecto de las variables predictoras altura y posición radial, así como su interacción, sobre la longitud, ancho y espesor de la pared celular de las fibras (μm) en *E. grandis*. Se plantearon tres hipótesis nulas y sus correspondientes hipótesis alternativas para cada variable de respuesta:

- 1) Hipótesis nula: No hay efecto de la altura sobre la longitud/ ancho/ espesor de la pared celular.
Hipótesis alternativa: Al menos una altura tiene un efecto diferente sobre la longitud/ ancho/ espesor de la pared celular.
- 2) Hipótesis nula: No hay efecto de la posición radial sobre la longitud/ ancho/ espesor de la pared celular.
Hipótesis alternativa: Al menos una posición radial tiene un efecto diferente sobre la longitud/ ancho/ espesor de la pared celular.
- 3) Hipótesis nula: No hay interacción entre la altura y la posición radial sobre la longitud/ ancho/ espesor de la pared celular.
Hipótesis alternativa: Existe una interacción entre la altura y la posición radial que afecta la longitud/ ancho/ espesor de la pared celular.

No se realizó un diseño experimental ya que se llevó a cabo un muestreo aleatorio. Para la toma de decisiones se consideró que si el p-valor es menor o igual a α (0,05), se rechaza la hipótesis nula (H_0), con una probabilidad α (0,05) de cometer un error de tipo I.

Se ajustaron tres modelos lineales generalizados mixtos con distribución gamma para analizar la longitud, ancho y espesor de la pared celular. Estos modelos capturan tanto la variabilidad explicada por los efectos fijos (altura, posición radial y su interacción) como la variabilidad introducida por el efecto aleatorio (cada árbol).

Al modelo se le realizó un análisis de devianza y para las variables significativas, se aplicó un análisis de Tukey con un nivel de significancia de 0,05.

3.3.3 Química

Para analizar los componentes químicos de la madera del conjunto de árboles seleccionados se llevó a cabo un análisis descriptivo utilizando Microsoft Excel 365 y software libre R. Se evaluaron los siguientes componentes: contenido de humedad, extractivos (extracción con etanol), lignina soluble e insoluble, holocelulosa y cenizas. Los datos obtenidos se analizaron de manera individual para cada componente, calculando el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cada uno de ellos.

3.3.4 Densidad aparente básica

Se utilizó el software libre R para el estudio de densidad. El objetivo del análisis estadístico fue evaluar el efecto de las variables predictoras altura y posición radial, así como su interacción, sobre la densidad aparente básica (g/cm^3) en *E. grandis*. Se plantearon tres hipótesis nulas y sus correspondientes hipótesis alternativas:

- 1) Hipótesis nula: No hay efecto de la altura sobre la densidad.
Hipótesis alternativa: Al menos una altura tiene un efecto diferente sobre la densidad.
- 2) Hipótesis nula: No hay efecto de la posición radial sobre la densidad. Hipótesis alternativa: Al menos una posición radial tiene un efecto diferente sobre la densidad.
- 3) Hipótesis nula: No hay interacción entre la altura y la posición radial sobre la densidad.
Hipótesis alternativa: Existe una interacción entre la altura y la posición radial que afecta la densidad.

No se realizó un diseño experimental ya que se llevó a cabo un muestreo aleatorio. Para la toma de decisiones se consideró que si el p-valor es menor o igual a α (0,05), se rechaza la hipótesis nula (H_0), con una probabilidad α (0,05) de cometer un error de tipo I.

Se ajustó un modelo lineal mixto para analizar la densidad aparente básica. Este modelo captura tanto la variabilidad explicada por los efectos fijos (altura, posición radial y su interacción) como la variabilidad introducida por el efecto aleatorio (árbol).

Al modelo se le realizó un análisis de varianza (ANOVA). Posteriormente, se verificaron los supuestos de distribución normal de los residuos mediante la prueba de normalidad de Anderson-Darling y el supuesto de homogeneidad de varianza mediante la prueba de Levene. Finalmente, se realizó un análisis de Tukey para aquellas variables que fueron significativas en el ANOVA, con un nivel de significancia de 0,05.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis anatómicos, químicos y de Dab se compararon con los datos disponibles en la bibliografía, sin embargo, se debe considerar que factores como la genética, las condiciones ambientales y la edad de los árboles analizados (Ramos León et al., 2016), así como por diferencias en los métodos utilizados para cada análisis, pueden influir en las variaciones observadas entre estudios.

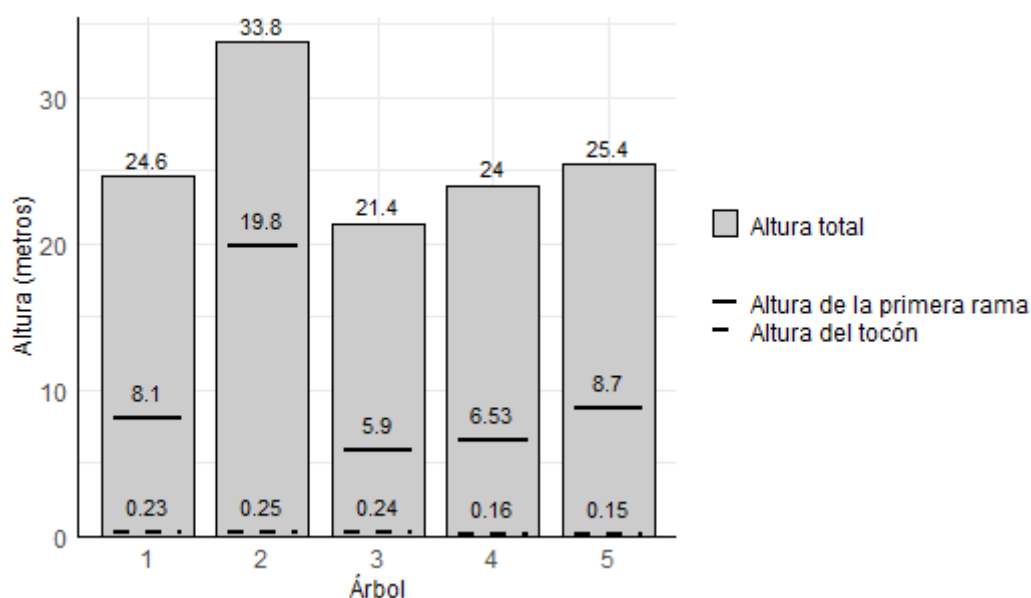
En cuanto a la genética de los árboles, aunque esta influye en sus propiedades anatómicas, químicas y físicas (Carrillo et al., 2013), no será considerada en este análisis, dado que no forma parte de los objetivos establecidos. Además, la información genética de los individuos analizados no se conoce actualmente.

4.1 CARACTERIZACIÓN DENDROMÉTRICA DE ÁRBOLES EN ESTUDIO

La altura total de los árboles osciló entre 21,4 m y 33,8 m, siendo el árbol 2 el más alto y el promedio de altura total fue de 25,84 m (Figura 23). La altura de la primera rama varió entre 5,9 m y 19,8 m, el promedio de altura de la primera rama fue de 9,41 m. En cuanto a la altura del tocón, ésta varió entre 0,15 y 0,25 m, con un promedio de 0,21 m.

Figura 23

Estadística descriptiva de diferentes alturas de los árboles en estudio



La Tabla 10 resume las mediciones de diámetro realizadas en los cinco árboles a diferentes alturas: 0,5 metros, 1 metro y 1,5 metros, así como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), junto a los parámetros estimados, incluyendo el promedio, el desvío estándar y el coeficiente de variación (CV).

Tabla 10*Diámetros de interés por árbol*

Diámetros de interés	1	2	3	4	5	Promedio	Desvío	CV
Diámetro a 1,5m	25,5	29,2	22,9	25,4	25,2	25,64	2,26	9%
DAP	26	29,1	23,4	26	25,3	25,96	2,05	8%
Diámetro al metro	26,3	29,4	23,8	25,8	25,9	26,24	2,02	8%
Diámetro a 0,5m	27,8	31,7	25,2	26,9	27,3	27,78	2,4	9%

Se observó una tendencia general de disminución del diámetro a medida que aumenta la altura del fuste, con un diámetro promedio mayor en la base del árbol (0,5 m) y una disminución gradual a medida que se avanza hacia el extremo apical del fuste.

Los volúmenes totales del fuste fueron de 0,57 m³, 1,05 m³, 0,38 m³, 0,59 m³ y 0,62 m³ para los árboles 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente. Notándose una clara superioridad en este parámetro por el árbol 2, explicada posiblemente por su mayor altura.

4.2 ANATOMÍA

4.2.1 Estadística descriptiva

Se puede observar en la Tabla 11 los estadísticos descriptivos de la longitud, ancho y espesor de la pared celular de la fibra.

Tabla 11*Estadística descriptiva de la longitud, ancho y espesor de la pared celular de E. grandis*

	Longitud (μm)	Ancho (μm)	Espesor de pared (μm)
n	1500	1500	1200
Promedio	986,310	21,100	3,484
Desvío estándar	143,465	2,357	0,641
CV (%)	14,546	11,171	18,398
Mínimo	619,020	17,157	2,563
Máximo	1277,722	27,675	5,493

Nota. n= Número de observaciones; CV= Coeficiente de variación.

La longitud promedio se encuentra dentro del rango establecido por Trevisan et al. (2017), comprendido entre 750 y 1520 μm , al igual que en los trabajos realizados por Hussar Brisola y Demarco (2011), Trevisan et al. (2017), Baldin et al. (2017), Monteoliva et al. (2017), Rezende et al. (2018), y Verocay (2022) (Tabla 12 Dimensiones promedio de fibras en *E. grandis*). De manera similar, el espesor promedio está dentro del rango establecido por Trevisan et al. (2017), que va de 2,5 y 6,0 μm y también coincide con los estudios de Hussar Brisola y Demarco (2011), Trevisan et al. (2017), Baldin et al. (2017), Monteoliva et al. (2017) y Rezende et al. (2018).

Por otro lado, el ancho promedio de la fibra supera ligeramente el rango establecido por Trevisan et al. (2017), que es de 12 a 20 μm . Sin embargo, los resultados de Trevisan et al. (2017), así como los de Verocay (2022), también se encontraron en niveles superiores a este rango, con valores de 23,9 y 22,68 μm respectivamente.

Tabla 12*Dimensiones promedio de fibras en E. grandis*

Autor	Origen	E.	Longitud y σ (μm)	Espesor de pared y σ (μm)	Diámetro total y σ (μm)
Hussar Brisola y Demarco (2011)	Estado de São Paulo, Brasil	6	1150	4,9	19
Trevisan et al. (2017)	Estado de São Paulo, Brasil	1 8	1175,8 $\pm$ 222	4,9 $\pm$ 1,30	23,9 $\pm$ 4,17
Baldin et al. (2017)	Río Grande del Sur, Brasil	5	1036	3,8	18
Monteoliva et al. (2017)	Entre Ríos, Argentina	*	-	3,21 $\pm$ 0,38	19,73 $\pm$ 2,38
Rezende et al. (2018)	Minas Gerais, Brasil	3 7	971,22 $\pm$ 137	5,7 $\pm$ 1,16	18,51 $\pm$ 3,26
Verocay (2022)	Rocha, Uruguay	1 1	975,64 $\pm$ 229,82	1,75 $\pm$ 0,12	22,68 $\pm$ 3,67
El presente TFG	Cerro Largo, Uruguay	3 0	986,310 $\pm$ 143,465	3,484 $\pm$ 0,641	21,100 $\pm$ 2,357

Nota. E= edad (años); σ = desvío estándar; *=Señala que los individuos son adultos, sin mencionar edad exacta; - = no presenta datos de longitud de fibra.

4.2.2 Variación respecto a la altura y posición radial

Se identificaron diferencias significativas en el diámetro total, la longitud y el espesor de la pared celular de las fibras entre las distintas posiciones radiales. Estos resultados son consistentes con la literatura para diferentes edades de *E. grandis*, donde autores como Ramos et al. (2011), Baldin et al. (2017), Silva et al. (2007), Do Sacramento Albino et al. (2012), Doldán (2003), Palermo et al. (2015) y Trevisan et al. (2017) han reportado variaciones en las dimensiones de las fibras en la dirección médula-corteza (Tabla 13).

Tabla 13*Variabilidad de las fibras en dirección médula-corteza de E. grandis*

Autor	Origen	Edad (años)	Longitud de fibra	Diámetro total de fibra	Espesor de pared de fibra
Doldán (2003)	Cerro Largo, Uruguay	18	Aumenta	-	-
Silva et al. (2007)	Estado de Paraná, Brasil	10, 14, 20 y 25	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Ramos et al. (2011)	Río de Janeiro, Brasil	23	Aumenta	-	Aumenta
Do Sacramento Albino et al. (2012)	Minas Gerais, Brasil	18	-	Aumenta	Aumenta
Palermo et al. (2015)	Río de Janeiro, Brasil	23	Aumenta	No presenta diferencias estadísticas	Aumenta
Baldin et al. (2017)	Río Grande del Sur, Brasil	5	Aumenta	Ligero aumento en dirección duramen-zona intermedia, seguido de una reducción hacia la albura	Ligero aumento en dirección duramen-zona intermedia, seguido de una reducción hacia la albura
Trevisan et al. (2017)	Río Grande del Sur, Brasil	18	Tendencia creciente	Tendencia creciente	Tendencia creciente
El presente TFG	Cerro Largo, Uruguay	30	Aumenta	Aumenta	Aumenta

No obstante, en este estudio no se encontraron diferencias significativas entre las alturas ni en la interacción entre altura y posición radial. En cuanto al diámetro total y la longitud de la fibra, tanto Núñez (2007) como Rocha et al. (2004), observaron variaciones con la altura en *E. grandis*, aunque sus estudios abarcan rangos de altura más amplios que los considerados en este trabajo. Respecto al espesor de la pared celular, Rocha et al. (2004) no detectaron diferencias significativas, mientras que Núñez (2007) y Do Sacramento Albino et al. (2012), reportaron una tendencia a la disminución de este parámetro con el aumento de la altura, nuevamente, considerando un rango de altura mayor de altura.

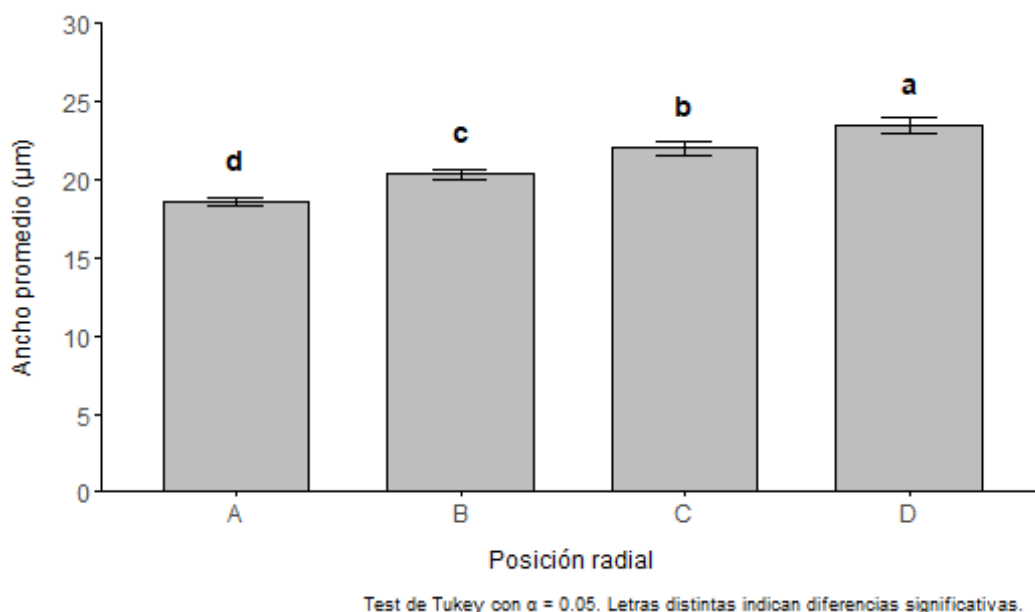
Rocha et al. (2004) evaluaron los parámetros biométricos de las fibras a lo largo de 25, 50, 75 y 100% de la altura comercial del árbol, Núñez (2007) lo hizo a intervalos del 10, 15, 35, 50, 70 y 75% de la altura del fuste y Do Sacramento Albino et al. (2012) a los 1,3, 2,6 y 3,9 m. En el presente estudio, las mediciones se realizaron a alturas de 0,5, 1 y 1,5 m. Sin embargo, si se extendiera la altura máxima medida y se tomaran muestras hasta el diámetro mínimo aprovechable (14 cm en punta fina), es posible que se observara una respuesta diferente.

Por otro lado, en coincidencia con Verocay (2022), no se encontraron diferencias significativas en la interacción entre altura y posición radial.

En lo que respecta a la variación radial, hubo un incremento en el diámetro total de la fibra en la dirección médula-corteza. La posición A, más cercana a la médula, exhibió un promedio significativamente menor ($18,582 \mu\text{m}$; $\sigma = 0,880 \mu\text{m}$) en comparación con las posiciones B (promedio $20,342 \mu\text{m}$; $\sigma = 1,315 \mu\text{m}$), C ($22,009 \mu\text{m}$; $\sigma = 1,756 \mu\text{m}$) y D ($23,468 \mu\text{m}$; $\sigma = 1,875 \mu\text{m}$) subprobeta ubicada cerca de la corteza (Figura 24). Estos resultados concordaron con los encontrados por Do Sacramento Albino et al. (2012), Silva et al. (2007) y Trevisan et al. (2017).

Figura 24

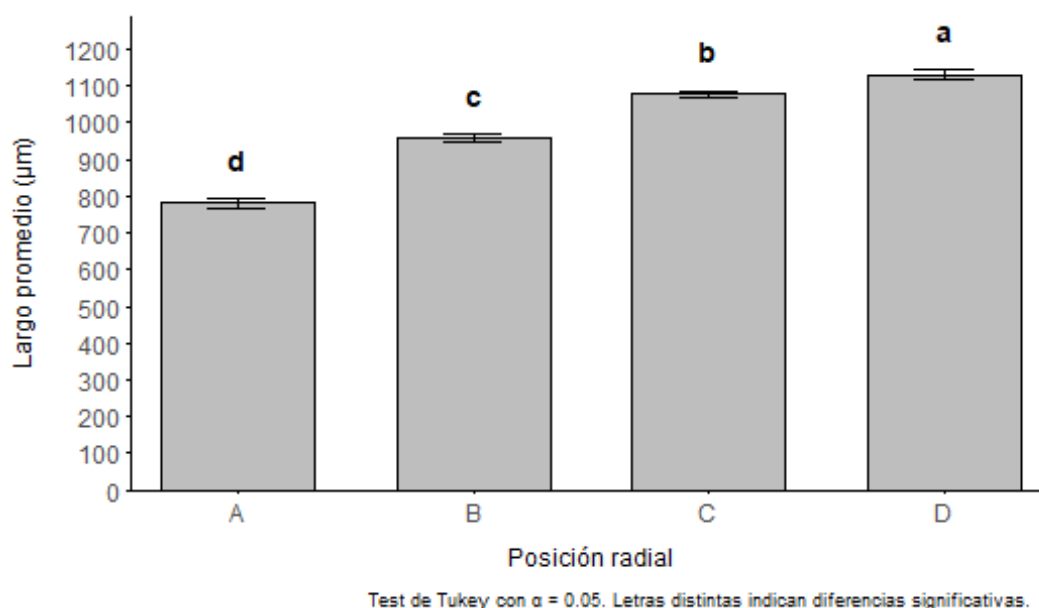
Ancho promedio según posición radial en E. grandis



Asimismo, se observó un incremento en la longitud de las fibras en dirección médula-corteza. La posición A presentó un promedio significativamente menor ($780,946 \mu\text{m}$; $\sigma = 60,584 \mu\text{m}$) en comparación con las posiciones B (promedio $956,695 \mu\text{m}$; $\sigma = 40,352 \mu\text{m}$), C ($1076,953 \mu\text{m}$; $\sigma = 37,127 \mu\text{m}$) y D ($1130,646 \mu\text{m}$; $\sigma = 53,029 \mu\text{m}$) (Figura 25). Estos resultados coinciden con estudios previos de *E. grandis* como los de Ramos et al. (2011), Baldin et al. (2017), Silva et al. (2007), Doldán (2003), Palermo et al. (2015) y Trevisan et al. (2017). Según Baldin et al. (2017), esta tendencia de variación es ampliamente reportada por diferentes autores para varias especies del género *Eucalyptus*, así como la mayoría de las especies forestales.

Figura 25

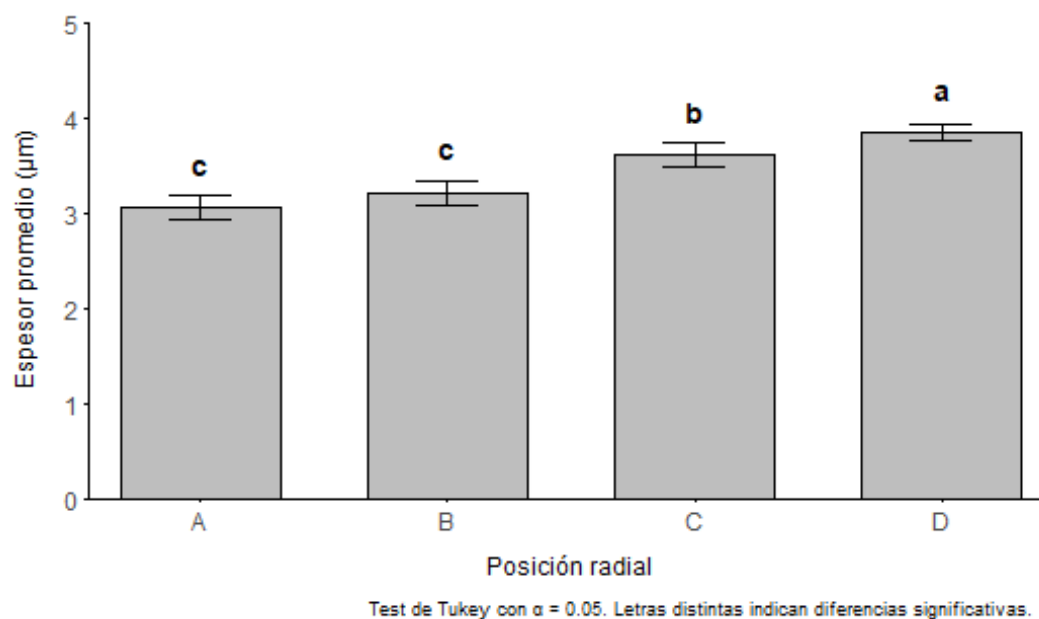
Longitud promedio según posición radial en E. grandis



Además, se observó un aumento en el espesor de la pared celular de las fibras en dirección médula-corteza. La posición A presentó un promedio significativamente menor ($3,057 \mu\text{m}$; $\sigma = 0,472 \mu\text{m}$) en comparación con las posiciones C ($3,612 \mu\text{m}$; $\sigma = 0,480 \mu\text{m}$) y D ($4,056 \mu\text{m}$; $\sigma = 0,623 \mu\text{m}$), subprobeta ubicada cerca de la corteza. No se encontraron diferencias significativas entre las posiciones A y B ($3,212 \mu\text{m}$; $\sigma = 0,497 \mu\text{m}$) (Figura 26). Estos hallazgos son consistentes con los obtenidos por Do Sacramento Albino et al. (2012), Ramos et al. (2011), Silva et al. (2007), Palermo et al. (2015) y Trevisan et al. (2017).

Figura 26

Espesor promedio según posición radial en E. grandis



Las variaciones observadas en diámetro total, longitud y espesor de pared de las fibras se explican por diferencias entre la madera de las diferentes zonas (Trevisan et al., 2017), evidenciando una transición de madera juvenil a adulta (Doldán, 2003).

4.3 QUÍMICA

4.3.1 Estadística descriptiva

La Tabla 14 presenta los valores de contenido de humedad en base seca, extractivos, lignina (soluble e insoluble), holocelulosa y cenizas promedio para los cinco árboles y tres alturas evaluadas, junto con el desvío estándar y el coeficiente de variación.

El contenido de humedad en base seca promedio de $7,571\% \pm 1,270$ se encontró por debajo del 10%, permitiendo según Hames et al. (2008) realizar los análisis químicos siguientes.

Tabla 14

Promedios de los distintos componentes de la madera relativos al peso seco

Componente	n	Promedio (%)	Desvío estándar	CV (%)
Contenido de humedad	15	7,571	1,270	16,770
Extractivos *	15	6,255	1,539	24,598
Lignina soluble	30	2,044	0,002	9,271
Lignina insoluble	30	28,317	0,055	19,301
Holocelulosa	15	73,293	7,857	10,720
Cenizas	15	0,310	0,048	15,593

Nota. n=número de observaciones; CV= coeficiente de variación. * Extracción con etanol.

El valor promedio de extractivos obtenido en este estudio, $6,255\% \pm 1,539$, fue superior a los reportados en la bibliografía, los cuales oscilan entre 1,71 y 5,2% (Batista et al., 2016; Neiva et al., 2015; Ona et al., 1995; Reina, 2010) (Tabla 6 15). Esta diferencia podría atribuirse a varios factores, como el procedimiento empleado, que incluyó un tiempo de extracción mayor (20 horas) y el uso de etanol como solvente, mientras que otros estudios utilizaron una mezcla de etanol y tolueno. Además, las diferencias genéticas entre individuos de la misma especie, las condiciones ambientales en las que se desarrollaron y la edad de los ejemplares (Ramos León et al., 2016) también podrían haber contribuido a la variación observada entre autores. No obstante, los valores obtenidos se encontraron por debajo del 10%, como lo establecen Ibáñez et al. (2009).

Tabla 15*Composición química promedio y desvío estándar de E. grandis*

Autor	Origen	E.	Ext. (%) *	Lign. insol. (%)	Lign. sol. (%)	Lign. total (%)	Holo. (%)	C. (%)
Ona et al. (1995)	Japón	-	5,2 ± 0,6 *			16,0 ± 0,6	78,8 ± 0,8	
Leal et al. (2011)	Arg.	8 y 10						0,45
Reina (2010)	UY	9	1,71 ± 1,64**	25,98 ± 1,12	3,63 ± 0,21	29,71 ± 1,11		
Neiva et al. (2015)	PT	6	4,2*	25,1	2,7	27,8	66,8	0,4
Batista et al. (2016)	Brasil	18	1,94*	28,31			69,38	
Calonego et al. (2016)	Brasil	30		28,27 ± 1,12			72,77 ± 0,71	
El presente TFG	UY	30	6,26±1,54 **	2,044 ±0,00 2	28,32 ±0,06	30,36	73,29± 7,86	0,31 ±0,048

Nota. E.= Edad (años); Ext.=Extractivos; Lign. insol. = Lignina insoluble; Lign. sol. = Lignina soluble; Lign. Total= Lignina total; Holo. = Holocelulosa; C.=Cenizas. Arg.= Argentina; UY= Uruguay; PT=Portugal. *Extracción con etanol/tolueno; ** Extracción con etanol.

Los valores de lignina soluble obtenidos en este estudio son ligeramente inferiores a los reportados por Neiva et al. (2015) y Reina (2010). En cuanto a la lignina insoluble, los resultados son muy similares a los obtenidos por Batista et al. (2016) y Calonego et al. (2016). El valor promedio de lignina total, 30,361%, es similar al reportado por Reina (2010).

El valor promedio obtenido de holocelulosa fue muy similar al obtenido por Calonego et al. (2016).

El contenido de cenizas obtenido en este estudio fue inferior a los valores reportados por Leal et al. (2011) y Neiva et al. (2015). Sin embargo, los resultados fueron

consistentes con los obtenidos por Barotto et al. (2024), quienes, en su estudio sobre *E. grandis* de aproximadamente 7 años en Entre Ríos, Argentina, obtuvieron un contenido de cenizas de 0,3%.

4.4 DENSIDAD APARENTE BÁSICA

4.4.1 Estadística descriptiva

La densidad aparente básica promedio fue de 0,413 g/cm³, con un desvío estándar de 0,043. El coeficiente de variación fue del 10,41%, con valores mínimos y máximos de 0,326 g/cm³ y 0,490 g/cm³, respectivamente. Estos resultados obtenidos son consistentes con la literatura analizada para diferentes edades de *E. grandis* (Böthig, 2001; Bulman-Hartkopf et al., 2024; Doldán, 2003; Doldán et al., 2008; González & Lago, 2006; Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2, 2005; Monteoliva et al., 2015; Verocay, 2022; Winck et al., 2014) (Tabla 16).

Tabla 16*Valores promedio de Dab de E. grandis*

Autor	Localidad	Edad (años)	Densidad aparente básica promedio y desvío estándar (g/cm ³)
Böthig (2001)	Rivera, Uruguay	13,5	0,463 ± 0,0046
Doldán (2003)	Río Negro, Uruguay	18	0,432 ± 0,052
Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2, (2005)	Rivera, Uruguay	18	0,402 ± 0,037
González y Lago (2006)	Río Negro, Uruguay	10 y 12	0,400 ± 0,032 (10 años) 0,405 ± 0,028 (12 años)
Doldán et al. (2008)	Uruguay*	8 a 10	0,423 ± 0,0255
Winck et al. (2014)	Misiones y Corrientes, Argentina	4 a 32	0,48 ± 0,09
Monteoliva et al. (2015)	Buenos Aires y Entre Ríos, Argentina	11 a 15	0,421 ± 0,02
Verocay (2022)	Rocha, Uruguay	11	0,381 ± 0,03
Bulman-Hartkopf et al. (2024)	Misiones, Argentina	11	0,368 ± 0,034 (EG INTA 157) 0,467 ± 0,052 (EG INTA 36)
El presente TFG	Cerro Largo, Uruguay	30	0,413 ± 0,043

Nota. *No presenta información acerca del departamento.

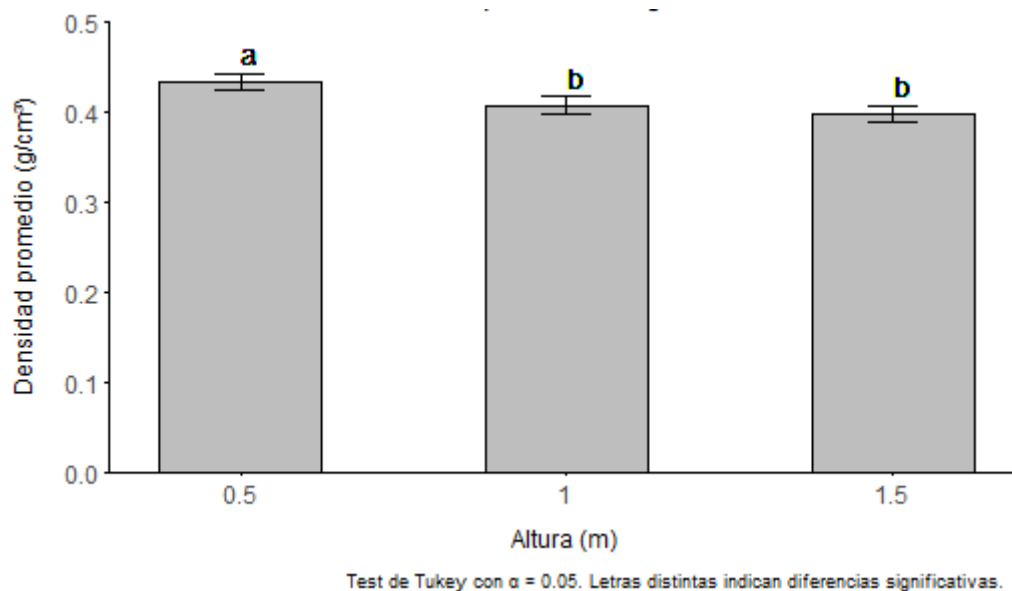
4.4.2 Variación respecto a la altura y posición radial

Se encontraron diferencias significativas en la Dab entre las distintas alturas y posiciones radiales (Figura 27 y Figura 28). Este resultado es coherente con los hallazgos

de Martinez et al. (2023). Sin embargo, no se observó una interacción significativa entre estos factores, al igual que Verocay (2022).

Figura 27

Densidad aparente básica promedio según altura en E. grandis



Según Goulart et al. (2003), para el género *Eucalyptus* lo más común es observar una disminución en la densidad básica hasta el 50% de la altura del árbol y un aumento desde ese punto hacia la copa, o incluso una disminución cerca de la copa. En este estudio, se observó que la Dab decrece con la altura del fuste hasta un metro y medio. A los 0,5 metros se obtuvo un promedio significativamente superior ($0,433 \text{ g/cm}^3$; $\sigma=0,039$) en comparación con las alturas de un metro ($0,407 \text{ g/cm}^3$; $\sigma=0,048$) y 1,5 metros ($0,398 \text{ g/cm}^3$; $\sigma=0,038$), las cuales no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí. Estos resultados coincidieron con los obtenidos por Bulman-Hartkopf et al. (2024); sin embargo, su evaluación abarcó hasta 5,50 m en árboles de 11 años, mientras que en este estudio se analizó solo hasta 1,5 m en árboles de 30 años (Tabla 17). Por lo tanto, se desconoce si a partir de esta altura los valores siguen disminuyendo o presentan un aumento, como reportaron Coronel (1994) y Arango Alzate et al. (2005).

Tabla 17*Tipo de variación radial y axial de la densidad en E. grandis*

Autor	Localidad	Edad (años)	Variación radial	Variación axial
Coronel (1994)	Argentina*	-	-	Decreciente hasta alcanzar casi la mitad de la altura, donde presenta un valor mínimo, volviendo a aumentar el valor, pero generalmente sin alcanzar los valores de la base.
Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2 (2005)	Rivera, Uruguay	18	Disminución inicial seguida de un incremento hacia la corteza	Creciente con la altura del fuste
Verocay (2022)	Rocha, Uruguay	11	Incremento médula-corteza	Sin diferencias significativas entre alturas
Martinez et al. (2023)	Entre Ríos, Argentina	15	Incremento médula-corteza	Creciente con la altura del fuste
Bulman- Hartkopf et al. (2024)	Misiones, Argentina	11	Principalmente incremento médula-corteza, pero también disminución inicial seguida de un incremento hacia la corteza.	Decreciente con la altura del fuste
El presente TFG	Cerro Largo, Uruguay	30	Incremento médula-corteza	Decreciente con la altura del fuste

Nota. *No presenta información acerca de la provincia.

Las variaciones en la densidad aparente básica con respecto a la altura del árbol, como indica el Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2 (2005), se atribuyen a diferentes características de la madera, que dependen de la proporción de albura con relación al duramen y la relación entre la madera juvenil y la madera adulta. Winck et al. (2016) señalan que el duramen es más denso que la albura, mientras que Núñez (2012) observa que la proporción de área de albura frente al área de duramen aumenta hacia la copa del árbol, lo que puede reducir la densidad con la altura. Resquín (2007) y Resquin et al. (2019) afirman que la madera juvenil tiene menor densidad que la madera adulta y Núñez (2007) añade que existe una mayor proporción de madera juvenil a mayor altura, lo cual también puede generar que la densidad descienda con la altura.

Por un lado, en este estudio no se analizó la proporción de albura/duramen, por lo que no fue posible atribuir las diferencias de densidad observadas entre alturas a esta característica. Por otro lado, diversos autores señalan que las regiones de madera juvenil y madura se determinan mediante el perfil densitométrico, ángulos microfibrilares y longitudes de fibra (Palermo et al., 2015). En este caso, no se encontraron diferencias significativas en la variable densidad aparente básica ni en la longitud de fibra debido a la interacción entre la posición radial y la altura. Por lo tanto, basándose en estos resultados, es probable que la variación en altura no esté relacionada con cambios en la proporción de madera juvenil y madura.

En relación con la densidad básica de la madera en la región basal del fuste, Sette et al. (2012) sugieren que los valores más elevados de densidad básica en esta región se deben probablemente a las exigencias mecánicas de soporte del tronco. A su vez, Goulart et al. (2003) mencionan la posible influencia del sistema radicular en esta mayor densidad basal.

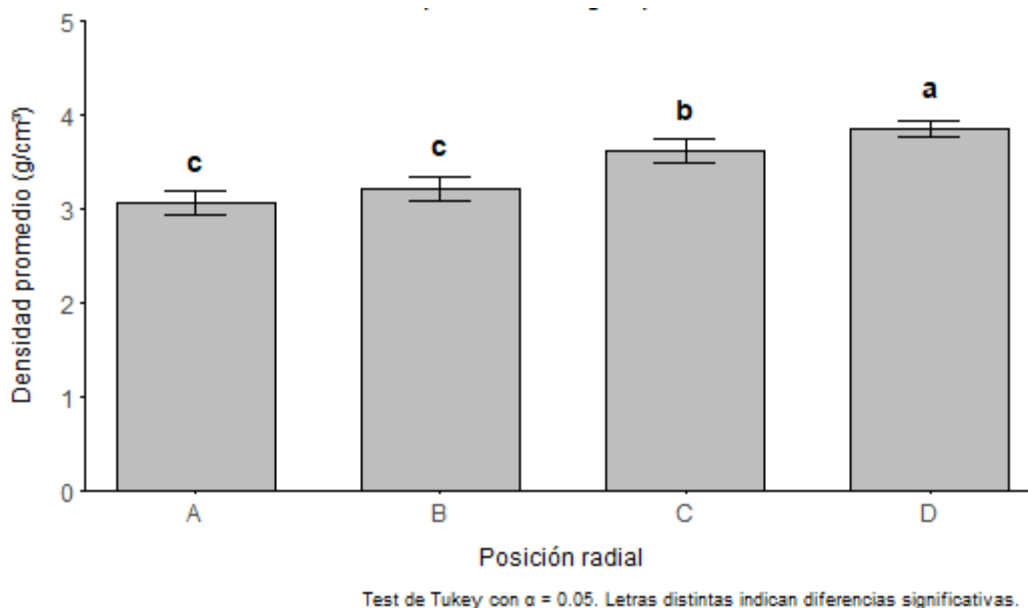
Al evaluar el grosor de la pared celular a distintas alturas en este estudio, no se encontraron variaciones significativas. Por lo tanto, aunque se observó una variación en la densidad, esta no se puede atribuir al grosor de la pared celular, una de las variables conocidas por afectar esta respuesta. Las otras dos variables, a nivel anatómico, capaces de influir en gran proporción sobre el comportamiento de la densidad son el lumen de las fibras y la proporción de fibras en relación con el volumen total del leño (León, 2010; McDonald et al., 1995), sin embargo, estas no fueron estudiadas en el presente análisis.

En conclusión, aunque la densidad disminuyó con la altura hasta 1,5 metros, los factores detrás de esta variación no se pudieron determinar con certeza sin un análisis más detallado de la proporción de albura/duramen, ángulo microfibrilar, diámetro del lumen de las fibras, proporción de fibras con relación al total del leño, entre otras propiedades de la madera.

A nivel radial se observó un incremento en la densidad aparente básica de médula a corteza (Figura 28). Las posiciones radiales A y B, más cercanas a la médula, exhibieron los valores promedios significativamente más bajos de D_{ab} ($A=0,390 \text{ g/cm}^3$; $\sigma= 0,033 \text{ g/cm}^3$ y $B=0,392 \text{ g/cm}^3$; $\sigma= 0,030 \text{ g/cm}^3$), luego esta aumentó en la posición C ($0,417 \text{ g/cm}^3$; $\sigma= 0,040 \text{ g/cm}^3$) y alcanzó su máximo valor en la posición D, la más cercana a la corteza ($0,451 \text{ g/cm}^3$; $\sigma= 0,040 \text{ g/cm}^3$).

Figura 28

Densidad aparente básica promedio según posición radial en E. grandis



Estos resultados coinciden con los obtenidos por Bulman-Hartkopf et al. (2024), Martínez et al. (2023) y Verocay (2022) (Tabla 17). Según Arango y Tamayo (2008) y Doldán (2003) la explicación, considerando las alturas evaluadas, se encuentra en la formación de tres tipos de madera: juvenil, de transición y adulta. A nivel celular, las fibras juegan un papel crucial (León, 2010), donde el aumento del espesor de la pared de la fibra y la disminución del lumen en sentido médula hacia la corteza, implica un aumento significativo de la densidad en tal dirección (McDonald et al., 1995; Ramos et al., 2011; Silva et al., 2007).

5 CONCLUSIÓN

En la caracterización dendrométrica de los árboles estudiados se registraron promedios de 25,84 m en altura total, 9,41 m en altura hasta la primera rama y 0,21 m para la altura del tocón. En cuanto a los diámetros se observó una disminución progresiva con la altura total para los 5 árboles, con un DAP promedio de 25,96 cm. Además, se registró una variación significativa en los volúmenes de los árboles, destacando el árbol 2 por su mayor volumen.

En *E. grandis*, las fibras presentaron un promedio de $986,310 \mu\text{m} \pm 143,465$ de longitud, $21,100 \mu\text{m} \pm 2,357$ en diámetro total y $3,484 \mu\text{m} \pm 0,641$ de espesor de pared celular. Se observaron diferencias significativas en estas dimensiones según la posición radial, evidenciando una transición de madera juvenil a adulta. Estas dimensiones de las fibras aumentaron desde la médula hacia la corteza. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en función de la altura, posiblemente debido al rango limitado de alturas evaluadas, ni en la interacción entre altura y posición radial.

En el análisis químico, los extractivos obtenidos mediante extracción con etanol representaron un $6,255 \% \pm 1,539$. La lignina soluble presentó un promedio de $2,044 \% \pm 0,002$ y la lignina insoluble un $28,317\% \pm 0,055$. La holocelulosa, el componente predominante, representó un $73,293 \% \pm 7,857$. Finalmente, el contenido de cenizas fue de $0,310 \% \pm 0,048$, siendo el componente minoritario.

La densidad aparente básica promedio fue de $0,413 \text{ g/cm}^3 \pm 0,043$, con diferencias significativas en función de la altura y la posición radial. Por el contrario, no se encontró interacción significativa entre estos factores. La Dab disminuyó a medida que aumentó la altura del fuste, siendo significativamente mayor en la base (0,5 m) en comparación con alturas superiores (1 m y 1,5 m), donde no se observaron diferencias significativas. A nivel radial, se observó un incremento en la densidad aparente básica desde la médula hacia la corteza, explicado por una transición de madera juvenil a madera adulta.

6 PERSPECTIVAS DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Como perspectivas de la línea de investigación se destacan los aspectos clave que deberían modificarse en futuros análisis anatómicos, químicos y de densidad, considerando diferentes alturas y posiciones radiales. Además, se identifican áreas de interés que podrían desarrollarse en estudios complementarios, ya que su alcance excede lo previsto en los objetivos de este trabajo.

- ✓ Se sugiere realizar determinaciones a lo largo de una mayor cantidad de alturas distribuidas porcentualmente en relación con la altura total del fuste. Esto permitiría capturar de manera más completa la variación anatómica y de densidad a lo largo del eje axial del árbol y la comparación entre estudios.
- ✓ Sería aconsejable determinar el número óptimo de fibras a evaluar por árbol en la determinación de su largo, diámetro total y espesor de pared, ya que, aunque “IAWA List of Microscopic Features” (1989) sugieren analizar 25 fibras por subprobeta para la variable longitud, es probable se obtengan resultados representativos con un menor número de fibras. Y de esta manera, analizar menos células por árbol y aumentar la cantidad de árboles en el muestreo, lo que mejoraría la representatividad. Además, Coronel (1994) refuerza esta idea al señalar que la variabilidad entre árboles es más significativa que la variación dentro de un mismo ejemplar.
- ✓ En los análisis químicos se debería aumentar el número de repeticiones para poder disminuir el error, presentando mínimo dos por componente evaluado (Hames et al., 2008). Esto permitiría, además, realizar un análisis estadístico inferencial para evaluar el efecto de las variables predictoras altura y posición radial, así como su interacción.
- ✓ En cuanto a la metodología de química, es preferible usar crisoles a filtros de papel.
- ✓ Para poder determinar a qué se debe la disminución de densidad observada en altura, se recomienda hacer un análisis más detallado de la proporción de albura/duramen, ángulo microfibrilar, diámetro del lumen de las fibras, proporción de fibras con relación al total del leño, entre otras propiedades de la madera.
- ✓ La incorporación de información genética de los árboles en estudio en futuros análisis sería valiosa para explorar el impacto de la genética en las propiedades de la madera.
- ✓ Es relevante establecer la relación entre las propiedades anatómicas, químicas y físicas de la madera, vinculándolas con sus posibles aplicaciones futuras.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, H. dos S., De Carvalho, A. M., Monteiro, M. B. de O., Pereira, R. P. W., Silva, H. R., De Souza, K. C. de A., Amparado, K. de F., & Chalita, D. B. (2006). *Métodos de análise em química da madeira*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
<https://app.periodikos.com.br/journal/stfloram/article/587fb4d30e88251a6ab65ffe>
- Alarcón, P. C., Fernández, M. E., Pathauer, P., Harrand, L., Oberschelp, J., Monteoliva, S., & Martinez, A. (2018). Comparación de metodologías para la estimación de la densidad de la madera y sus implicancias en la estimación de parámetros genéticos en tres especies del género *Eucalyptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 117(2), 175-183. <https://revistas.unlp.edu.ar/revagro/article/view/7333>
- Alves Ferreira de Gouveia, S. M. (2014). *Laccase enzymatic polymerization: Novel adhesion system for wood panel manufacture* [Disertación doctoral]. Universidad de Vigo.
- 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. <https://www.redalyc.org/pdf/430/43004509.pdf>
- Arango Alzate, S. B., Tomazello Filho, M., & de Stefano Piedade, S. M. (2005). Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, E. saligna Sm. e E. grandis x urophylla. *Scientia Forestalis*, (68), 87-95. <https://www.ipecf.br/publicacoes/scientia/nr68/cap08.pdf>
- Baldin, T., Cardoso Marchiori, J. N., Nisgoski, S., Talgatti, M., & Denardi, L. (2017). Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de *Eucalyptus* L'Hér. *Ciência da Madeira*, 8(2), 114-126. https://www.researchgate.net/publication/317147287_Anatomia_da_madeira_e_potencial_de_producao_de_celulose_e_papel_de_quatro_especies_jovens_de_Eucalyptus_L'Her
- Balmelli, G., & Resquín, F. (2000). *Evaluación de especies de Eucalyptus al quinto año*. INIA.
- Balmelli, G., & Resquín, F. (2006). Productividad de diferentes especies de *Eucalyptus* sobre areniscas de Tacuarembó-Rivera. En M. Behmaja & O. Pittaluga (Eds.), *30 años de investigación en suelos de areniscas* (pp. 305-312). INIA.
- Bao, F. C., Jiang, Z. H., Jiang, X. M., Lu, X. X., Luo, X. Q., & Zhang, S. Y. (2001). Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology*, 35, 363-375. <https://doi.org/10.1007/s002260100099>

- Barotto, A. J., Gauna, J. M., Tonello, M. L., Harrand, L., Mastrandrea, A. C., Martínez, M., Oberschelp, G. P. J., & Raffaelli, N. (2024). Caracterización dendroenergética de la madera y el carbón de diferentes materiales genéticos del género *Eucalyptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 122(1), Artículo e129.
<https://doi.org/10.24215/16699513e129>
- Batista, D. C., De Muniz, G. I. B., Oliveira, J. T. da S., Paes, J. B., & Nisgoski, S. (2016). Effect of the Brazilian thermal modification process on the chemical composition of *Eucalyptus grandis* juvenile wood: Part 1: Cell wall polymers and extractives contents. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 18(2), 273-284.
<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000025>
- Behr, A., & Seidensticker, T. (2020). *Chemistry of renewables: An introduction*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61430-3>
- Benítez González, V. (2019). *Estudio del proceso de deterioro causado por hongos de pudrición marrón en madera de Eucalyptus grandis* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Bennadji, Z., & Scoz, R. (2017). 30 años de la Ley Forestal: Retrospectiva y reflexiones desde la perspectiva de la investigación. *Revista INIA*, (51), 34-37.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8189/1/revista-INIA-51-diciembre-2017.-p.34-37.pdf>
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., McDonald, M. W., & Turner, J. D. (2006). *Forest trees of Australia*. CSIRO.
- Böthig, S. (2001). *Proyecto de tecnología de ensayo de productos forestales LATU-JICA (1998-2003): Densidad, dureza y color de Eucalyptus grandis de Uruguay*. LATU; JICA.
https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=3650
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Bulman-Hartkopf, C., Winck, R. A., Aquino, D. R., Fassola, H. E., & Stefani, P. M. (2024). Densidad y proporción de albura y duramen en nuevos clones de *Eucalyptus* spp. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 26, 1-14.
<https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.24>
- Burdon, R. D., Kibblewhite, R. P., Walker, J. C. F., Megraw, R. A., Evans, R., & Cown, D. J. (2004). Juvenile versus mature wood: A new concept, orthogonal to corewood versus outerwood, with special reference to *Pinus radiata* and *P. taeda*. *Forest Science*, 50(4), 399-415. <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.4.399>
- Burgert, I., Gierlinger, N., & Zimmermann, T. (2005). Properties of chemically and mechanically isolated fibres of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.): Part 1: Structural and chemical characterisation. *Holzforschung*, 59(2), 240-246.
<https://doi.org/10.1515/HF.2005.038>

- Calonego, F. W., Severo, E. T. D., Sansígolo, C. A., De Rezende, M. A., Bruder, E. M., & Costa, V. E. (2016). Calorific value and chemical properties in juvenile and mature wood of thermally-modified *Eucalyptus grandis*. *Drvna Industrija*, 67(3), 207-214. <https://doi.org/10.5552/drind.2016.1522>
- Carrillo, I., Elissetche, J. P., Valenzuela, S., & Teixeira Mendonça, R. (2013). Formación de elementos anatómicos en maderas duras: Una revisión desde una perspectiva genómica. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 15(1), 93-104. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2013005000009>
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social. (2023). *La producción forestal en Uruguay: Un sector líder y sostenible*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/Sector%20Forestal%202023%20%281%29.pdf>
- Cobas, A. C. (2012). *Modelos de variación de propiedades del leño juvenil a maduro en Salicáceas y su influencia sobre pulpas quimimécnicas* [Disertación doctoral, Universidad Nacional de la Plata]. SEDICI. <https://doi.org/10.35537/10915/29492>
- Coradin, V. T. R., & De Muñiz, G. I. B. (1991). *Normas de Procedimentos em Estudos de Anatomia de Madeira: I. Angiospermae II. Gimnospermae*. Laboratório de Produtos Florestais. <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/component/content/article/29-publicacoes/publicacoes-tecnicas-do-lpf/72-normas-de-procedimentos-em-estudos-de-anatomia-de-madeira-i-angiospermae-ii-gimnospermae?Itemid=>
- Coronel, E. O. (1994). *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas: Fundamentos de las propiedades físicas de las maderas*. Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Da Cunha, T. Q. G., Santos, A. C., Novaes, E., Hansted, A. L. S., Yamaji, F. M., & Sette, Jr, C. R. (2021). Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass and Bioenergy*, 144, Artículo e105900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900>
- Dirección General Forestal. (2021). *Cartografía Nacional Forestal 2021*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Publicacion_dgf.pdf
- Doldán, J. (2003). *Indicadores de calidad de madera Eucalyptus grandis de Río Negro, Uruguay: Contenido de humedad, densidad, contracción y largo de fibras*. LATU; JICA. https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=572
- Doldán, J., Fariña, I., & Tarigo, F. (2008). Utilización de Eucalyptus spp. alternativas de plantaciones uruguayas para pulpa Kraft. *INNOTECH*, (3), 30-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.26461/03.04>

- Do Sacramento Albino, V. C., Mori, F. A., & Mendes, L. M. (2012). Influência das características anatômicas e do teor de extractivos totais da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na qualidade da colagem. *Ciência Florestal*, 22(4), 803-811. <https://doi.org/10.5902/198050987561>
- Downes, G. M., Hudson, I. L., Raymond, C. A., Dean, G. H., Michell, A. J., Schimleck, L. R., Evans, R., & Muneri, A. (1997). *Sampling plantation Eucalypts for wood and fibre properties*. CSIRO.
- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay*. MAP. https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619_carta_de_reconocimiento_de_suelos_del_uruguay_1.1.000.000_imprimir_a0_0.pdf
- Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (Eds.). (2009). *Pulp and paper chemistry and technology: Vol. 1. Wood chemistry and wood biotechnology*. De Gruyter. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110213409/html>
- Fernández, P. L., & Lombardo, P. B. (Coords.). (2022). *Agroecosistemas: Caracterización, implicancias ambientales y socioeconómicas*. Universidad de Buenos Aires. <https://efa.agro.uba.ar/wp-content/uploads/librosdigitales/agroecosistemas.pdf>
- Fritz Durán, A. (2004). *La construcción de viviendas en madera*. CORMA.
- González, A., & Lago, A. (2006). *Estudio de la variación axial de la densidad de la madera de Eucalyptus grandis Hill (ex Maiden) y Eucalyptus dunnii Maiden* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Google. (2024). [Estación Experimental Bernardo Rosengurtt, Cerro Largo, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 15 de agosto de 2024, de https://www.google.com/maps/place/Estaci%C3%B3n+Experimental+Bernardo+Rosengurtt/@-32.3564693,-54.4421944,15z/data=!4m6!3m5!1s0x9508e0a39c46e359:0x609619d697b7870a!8m2!3d-32.3564693!4d-54.4421944!16s%2Fg%2F11g8wpwvv0?entry=tu&g_ep=EgoyMDI0MTAyOS4wIKXMDS0ASAFAw%3D%3D
- Goulart, M., Haselein, C. R., Hoppe, J. M., Farias, J. A., & Pauleski, D. T. (2003). Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. *Ciência Florestal*, 13(2), 167-175. <https://doi.org/10.5902/198050981753>
- Grattapaglia, D., Vaillancourt, R. E., Shepherd, M., Thumma, B. R., Foley, W., Külheim, C., Potts, B. M., & Myburg, A. A. (2012). Progress in Myrtaceae genetics and genomics: *Eucalyptus* as the pivotal genus. *Tree Genetics and Genomes*, 8(3), 463-508. <https://doi.org/10.1007/s11295-012-0491-x>
- Gresham House. (2020). *Global timber outlook*. https://greshamhouse.com/wp-content/uploads/2024/05/Gresham-House-Timber-Outlook_v15-new-logo-2024-web-version.pdf

- Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto - GT2. (2005). *Propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis Maiden. del norte de Uruguay*. LATU.
- Grupos de suelos CONEAT de prioridad forestal (2021, 27 de julio). MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-07/Grupos%20de%20Suelos%20CONEAT%20de%20prioridad%20Forestal.xlsx>
- Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, A., Sluiter, J., & Templeton, D. (2008). *Preparation of samples for compositional analysis: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory.
- Hussar Brisola, S., & Demarco, D. (2011). Análise anatômica do caule de Eucalyptus grandis, E. urophylla e E. grandis x urophylla: Desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria. *Scientia Forestalis*, 39(91), 317-330.
- Hüttermann, A., Mai, C., & Kharazipour, A. (2001). Modification of lignin for the production of new compounded materials. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 55(4), 387-394. <https://doi.org/10.1007/s002530000590>
- IAWA List of microscopic features for hardwood identification with an appendix on non-anatomical information. (1989). *IAWA Bulletin*, 10(3), 219-332. https://www.researchgate.net/profile/Elisabeth-Wheeler/publication/294088872_IAWA_List_of_Microscopie_Features_for_Hardwood_Identification/links/59eddee8aca27250fe79c61b/IAWA-List-of-Microscopie-Features-for-Hardwood-Identification.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19
- Ibáñez, C. M., Mantero, C., Bianchi, M., & Kartal, N. (2009). *Madera, biodeterioro y preservantes*. Universidad de la República.
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Tablas estadísticas*. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- Klock, U., & De Andrade, A. S. (2013). *Química da madeira* (4ª ed.). Universidade Federal do Paraná.
- Leal, L., Juárez, V., & Terán, M. (2011). Composición química de la madera de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden procedente de Finca Las Maravillas, Departamento de Orán, Salta. *Quebracho*, 19(1-2), 75-83.
- León, W. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 67-76.
- León, W., & Espinoza de Pernía, N. (2001). *Anatomía de la madera*. Universidad de los Andes.
- Ley n° 15.939: Ley Forestal. (1988, 9 de febrero). *Diario Oficial*, (22562), 276. <https://www.impco.com.uy/diariooficial/1988/02/09/2>

- Li, T., Chen, C., Brozena, A. H., Zhu, J. Y., Xu, L., Driemeier, C., Dai, J., Rojas, O. J., Isogai, A., Wågberg, L., & Hu, L. (2021). Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material. *Nature*, 590(7844), 47-56.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>
- Lopes, G. de A., & Garcia, J. N. (2002). Densidade básica e umidade natural da madeira de *Eucalyptus saligna* Smith, de Itatinga, associadas aos padrões de casca apresentados pela população. *Scientia Forestalis*, (62), 13-23.
- Martín, C., & Manzanares, P. (1994). *Biomasa lignocelulósica: Polímeros constitutivos: Procesos biológicos de degradación de la lignina*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
- Martinez, M. S., Mastrandrea, C. A., Winck, R. Á., Harrand, L., & Oberschelp, G. P. J. (2023). Variación radial y axial de la densidad de la madera en clones de Eucalipto. En P. L. Peri, I. Mundo, M. V. Lencinas, J. Goya, C. Mastrandrea, & L. Colcombet (Eds.), *Actas del VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino 2023* (pp. 650-652). Red Argentina de Ciencia y Tecnología Forestal. https://www.researchgate.net/publication/369767822_Variacion_radial_y_axial_de_la_densidad_de_la_madera_en_clones_de_Eucalipto
- Maxwell, S. (2023). International Forestry. En Forest Research (Ed.), *Forestry Statistics 2023*. <https://www.forestryresearch.gov.uk/tools-and-resources/statistics/forestry-statistics/forestry-statistics-2023/2023-9-international-forestry/>
- Mcdonald, S. S., Williamson, G. B., & Wiemann, M. C. (1995). Wood Specific Gravity and Anatomy in *Heliocarpus appendiculatus* (Tiliaceae). *American Journal of Botany*, 82(7), 855-861.
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2021). [Cartografía de Bosque Plantado 2021. Datos especiales]. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/monitoreo-bosque>
- Molina-Murillo, S. A. (2020). Megatendencias al sector forestal mundial y del porqué debemos producir y consumir más madera. *Ambientico*, (275), 4-11.
- Monteoliva, S., Barotto, A. J., Alarcón, P., Tesón, N., & Fernández, M. E. (2017). Densidad de la madera como variable integradora de la anatomía del leño: Análisis de ramas y fuste en cuatro especies de *Eucalyptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 116(1), 1-11.
- Monteoliva, S., Barotto, A. J., & 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://www.researchgate.net/publication/280730112_Anatomia_y_densidad_de_la_madera_en_Eucalyptus_variacion_interespecifica_e_implicancia_en_la_resistencia_al_estres_abiotico

- Neiva, D., Fernandes, L., Araújo, S., Lourenço, A., Gominho, J., Simões, R., & Pereira, H. (2015). Chemical composition and kraft pulping potential of 12 eucalypt species. *Industrial Crops and Products*, 66, 89-95.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.016>
- Núñez, C. E. (2007). Morfología fibrosa de la madera del *Eucalyptus grandis* implantado en la Mesopotamia Argentina: 1. Atributos biométricos. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 9(1), 36-43.
- Núñez, C. E. (2012). Morfología *Eucalyptus grandis* Mesopotamia: 6. Atributos Macroscópicos. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 18(1), 17-20.
- Oficina de Programación y Política Agropecuaria. (2022). *Anuario OPYPa 2022*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/anuario-opypa-2022>
- Ona, T., Sonoda, T., Shibata, M., & Fukazawa, K. (1995). Small-scale method to determine the content of wood components from multiple eucalyptus samples. *TAPPI Journal*, 78(3), 121-126.
<https://www.researchgate.net/publication/279695492>
- Orea Igarza, U., Carballo Abreu, L. R., & Cordero Machado, E. (2004). Composición química de tres maderas en la Provincia del Pinar del Río, Cuba a tres alturas del fuste comercial: Parte No 2: *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Revista Chapingo*, 10(1), 51-55.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1981). *El eucalipto en la repoblación forestal*.
<https://www.fao.org/4/AC459S/AC459S00.htm#TOC>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020: Informe principal*.
- Palermo, G. P. de M., Latorraca, J. V. de F., De Carvalho, A. M., Calonego, F. W., & Severo, E. T. D. (2015). Anatomical properties of *Eucalyptus grandis* wood and transition age between the juvenile and mature woods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(6), 775-780. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4>
- Qamar, S., Baba, A. I., Verger, S., & Andersson, M. (2024). *Segmentation and characterization of macerated fibers and vessels using deep learning*. arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.16937>
- Rachid, A. (2016). *Hybrid mensurational-physiological models for Pinus taeda and Eucalyptus grandis in Uruguay* [Disertación doctoral]. University of Canterbury.
- Ramos, L. M. A., Latorraca, J. V. de F., Pastro, M. S., De Souza, M. T., Garcia, R. A., & De Carvalho, A. M. (2011). Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. *Scientia Forestalis*, 39(92), 411-418.
<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr92/cap03.pdf>

- Ramos León, H. M., Guzmán Loayza, D., & Trujillo Cuellar, F. (2016). *Durabilidad natural de dos especies forestales a la acción de dos hongos xilófagos y su relación con sus principios básicos activos* [Contribución]. En XII Congreso Nacional Forestal CONAFOR, 2016, Lima.
<http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/366>
- Reina, L. (2010). *Influencia de la composición química de la madera de Eucalyptus grandis y Eucalyptus globulus en los parámetros de pulpeo Kraft* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Resquín, F. (2007). ¿Es posible modificar las propiedades de la madera y la pasta de celulosa de Eucalyptus a través del momento de cosecha? *Revista INIA*, (11), 31-34.
- Resquín, F., Duque-Lazo, J., Acosta-Muñoz, C., Rachid-Casnati, C., Carrasco-Letelier, L., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2020). Modelling current and future potential habitats for plantations of Eucalyptus grandis Hill ex Maiden and E. dunnii Maiden in Uruguay. *Forests*, 11(9), Artículo e948.
<https://doi.org/10.3390/f11090948>
- Resquín, F., Navarro-Cerrillo, R. M., Carrasco-Letelier, L., & Rachid-Casnati, C. (2019). Influence of age and planting density on the energy content of Eucalyptus benthamii, Eucalyptus dunnii and Eucalyptus grandis planted in Uruguay. *New Forests*, 51(4), 631-655. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09749-2>
- Rezende, R. N., Lima, J. T., Paula, L. E. de R., Hein, P. R. G., & Da Silva, J. R. M. (2018). Wood permeability in Eucalyptus grandis and Eucalyptus dunnii. *Floresta e Ambiente*, 25(1), Artículo e20150228. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.022815>
- Riki, J., Sotannde, O., & Oluwadare, A. (2019). Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and papel production: A review. *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 11(3), 358-368.
<https://www.ajol.info/index.php/jrfwe/article/view/190320>
- Rocha, F., Florsheim, S., & Couto, H. (2004). Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden aos sete anos. *Revista do Instituto Florestal*, 16(1), 43-55.
- Rosato, V. G., & Traversa, L. P. (2017). *Bioalteración, protección y conservación de maderas*. LEMIT.
- Sette, C. R., Jr., De Oliveira, I. R., Tomazello, M., Yamaji, F. M., & Laclau, J. P. (2012). Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de Eucalyptus grandis. *Revista Árvore*, 36(6), 1183-1190.
- Silva, J. de C., Filho, M. T., Oliveira, J. T. da S., & De Castro, V. R. (2007). Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden. *Revista Árvore*, 31(6), 1081-1090.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000600013>

- Sluiter, A., Hames, B., Hyman, D., Payne, C., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Wolfe, J. (2008). *Determination of total solids in biomass and total dissolved solids in liquid process samples: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2008). *Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory.
- Sluiter, A., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., & Templeton, D. (2005). *Determination of extractives in biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. National Renewable Energy Laboratory.
- Suarez, T. M., & Berger, G. (2009). *Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera*. Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industries. (2006). *Basic density and moisture content of pulpwood (Reaffirmation of T 258 om-02)*. <https://www.tappi.org/content/SARG/T258.pdf>
- Trevisan, R., Rosa, M., Roberto Haselein, C., José Santini, E., & Alberto Gatto, D. (2017). Dimensões das fibras e sua relação com a idade de transição entre lenho juvenil e adulto de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Ciência Florestal*, 27(4), 1385-1393.
- Tuset, R., Durán, F., Mantero Alvarez, C., Baillod, G., Aber, A., Böthig, S., & Ono, A. (2008). *Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización*. Hemisferio Sur.
- Uruguay XXI. (2023a). *Informe anual comercio exterior*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/3fda643c80b4c3ca697cba33a4b1a26cdcc12af5.pdf>
- Uruguay XXI. (2023b). *Sector forestal en Uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/70ef14bbc9637d1efb63bd99ff38fc077178dc00.pdf>
- Verocay, D. (2022). *Caracterización anatómica de la madera de Eucalyptus grandis W. Hill proveniente del este uruguayo* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Villegas, M. S., & Rivera, S. M. (2002). Revisión xilológica de las principales especies del género *Eucalyptus* L'Herit. cultivadas en Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 105(1), 9-28.
- Walker, J. (2006). *Primary Wood Processing: Principles and practice* (2nd ed.). Springer.

- Winck, R., Barth, S., Fassola, H., Crechi, E., & Keller, A. (2016). Relación entre la densidad básica y proporción del duramen de la madera de *Eucalyptus grandis* de Misiones y Corrientes, Argentina. En *XVII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales: Acta de conferencias y resúmenes* (pp. 390-392). Facultad de Ciencias Forestales; INTA. https://www.fcf.unam.edu.ar/modules/uploads/2017/03/Acta_de_Resumenes_XVII_Jotefa_2016.pdf
- Winck, R., Fassola, H., Barth, S., Keller, A., & Crechi, E. (2014). Densidad básica de *Eucalyptus grandis* H para diferentes edades y zonas agroecológicas de la región mesopotámica. En *XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales* (pp. 60-67). Universidad Nacional Autónoma de México; INTA. <https://www.fcf.unam.edu.ar/modules/uploads/2017/03/Actas-Conferencias-JOTEFA-2014.pdf>
- Wood handbook: Wood as an engineering material*. (2010). USDA. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>
- Zhan, N., Shang, X., Wang, Z., Xie, Y., Liu, G., & Wu, Z. (2022). Screening cellulose synthesis related genes of EgrEXP and EgrHEX in *Eucalyptus grandis*. *Gene*, 824, Artículo e146396. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2022.146396>
- Zhou, F., Zhang, H., Chen, S., & Fan, C. (2024). Transcriptome analysis of the transition from primary to secondary growth of vertical stem in *Eucalyptus grandis*. *BMC Plant Biology*, 24(1), Artículo e96. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04731-3>