

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**ESTUDIO DEL PROCESO DE DENSIFICACIÓN DE MADERA DE
*EUCALYPTUS GRANDIS***

por

Luciana GÓMEZ CARDOZO

Maximiliano LABORDA GONZÁLEZ

Trabajo final de grado presentado

como uno de los requisitos para

obtener el título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO

URUGUAY

2026

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora:

Ing. Quím. (Dra.) Marcela Ibañez

Codirectora:

Lic. Est. (Mag.) Natalia Berberian

Codirector:

Ing. Agr. (Mag.) Gastón Bruzzone

Tribunal:

Ing. Quím. (Dra.) Marcela Ibañez

Ing. Agr. (Mag.) Valentina Benítez

Ing. Quím. (Dr.) Leonardo Clavijo

Fecha:

10 julio de 2026

Estudiantes:

Luciana Gómez Cardozo

Maximiliano Laborda González

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por su apoyo incondicional y su incansable esfuerzo de estar siempre presentes a lo largo de todos estos años de formación.

A nuestros amigos y compañeros de la Facultad de Agronomía, por haber sido parte esencial de este continuo aprendizaje, desde el compañerismo, el intercambio y el aliento en cada momento.

A nuestros tutores, Marcela Ibañez, Natalia Berberian y Gastón Bruzzone, por su guía, compromiso y disponibilidad durante todo el proceso de este trabajo.

Al Dr. Leonardo Clavijo, responsable del grupo de Ingeniería de Procesos Forestales en el Instituto de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería por abrirnos las puertas de dicha institución, brindarnos los recursos necesarios y permitirnos desarrollar esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	11
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	11
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 EL SECTOR FORESTAL EN URUGUAY	12
2.2 GENERALIDADES DE LA ESPECIE <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i>	13
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA	14
2.3.1 <i>Propiedades físicas</i>	15
2.3.1.1 Humedad de la madera	15
2.3.1.2 Densidad	16
2.3.2 <i>Propiedades mecánicas</i>	16
2.4 PROCESO DE DENSIFICACIÓN DE LA MADERA	17
2.4.1 <i>Relevancia del proceso en la industria maderera</i>	17
2.4.2 <i>Objetivos del proceso densificación</i>	18
2.4.3 <i>Definición del proceso de densificación</i>	19
2.5 MÉTODOS DE DENSIFICACIÓN.....	19
2.5.1 <i>Densificación termo hidro mecánica (THM)</i>	20
2.5.2 <i>Densificación termomecánica (TM)</i>	20
2.5.3 <i>Compresión térmica viscoelástica (VTC)</i>	21
2.5.4 <i>Densificado por método NAS</i>	21
2.5.5 <i>Densificación masiva</i>	21
2.6 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN	22
2.6.1 <i>Factores de la madera</i>	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA.....	24
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	24
3.3 METODOLOGÍA.....	25

3.3.1 Instalación del ensayo de densificación termomecánica	25
3.3.2 Implementación del ensayo	26
3.3.4 Ensayos mecánicos.....	28
3.3.5 Determinación del contenido de humedad y densidad.....	29
3.4. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA.....	30
4. RESULTADOS	32
4.1 DENSIDAD ALCANZADA LUEGO DEL DENSIFICADO	32
4.2 CARGA MÁXIMA SOPORTADA LUEGO DEL DENSIFICADO	33
4.3 OBSERVACIONES MACROSCÓPICAS POST DENSIFICACIÓN	33
4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DENSIDAD MEDIA.....	35
4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PROPIEDADES MECÁNICAS.....	38
4.6 MODO DE FALLO EN COMPRESIÓN.....	40
5. DISCUSIÓN.....	41
6. CONCLUSIONES	44
7. BIBLIOGRAFÍA.....	45
8. ANEXO	49

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla no.

Tabla 1 Tratamientos aplicados, resultantes de la combinación de los distintos niveles de temperatura, tiempo y presión.....	25
Tabla 2 Densidad final promedio y diferencia respecto a la densidad inicial de probetas sin densificar.....	32
Tabla 3 Carga máxima soportada en compresión para cada tratamiento aplicado.	33
Tabla 4 Análisis de varianza del modelo factorial para Densidad final media	36
Tabla 5 Análisis de varianza del modelo factorial para Carga máxima.	39

Figura no.

Figura 1 Esquema general de una prensa hidráulica como la utilizada en la densificación masiva.....	21
Figura 2 Prensa hidráulica de laboratorio con doble plato calefaccionado (modelo CHY-600DG) utilizada en el proceso de densificación.....	26
Figura 3 Disposición de las probetas dentro de la prensa hidráulica previo al inicio del densificado	27
Figura 4 Sistema de aislamiento térmico en prensa hidráulica mediante cinta resistente al calor: frontal y lateral.....	27
Figura 5 Prensa universal (modelo Pilot 4, marca Controls): (a) vista general; (b) zona de ensayo	28
Figura 6 Ensayo de compresión perpendicular a la fibra	29
Figura 7 Efecto del tratamiento 6 sobre la superficie de contacto de probeta con las placas	34
Figura 8 Efecto del tratamiento 8 sobre la superficie de contacto de probeta con las placas	34
Figura 9 Deformación por efecto del tratamiento 6, vista del canto de la probeta.....	35
Figura 10 Efecto del densificado a 190°C durante 1h a una presión de 10 MPa	35
Figura 11 Interacción entre temperatura, presión y tiempo de prensado sobre la densidad media	37
Figura 12 Potencia estadística estimada en función del número de repeticiones por tratamiento.....	38
Figura 13 Medias ajustadas e intervalos de confianza (95 %) de la propiedad mecánica según presión aplicada	39

RESUMEN

La creciente demanda de productos forestales y la expansión de especies de rápido crecimiento han impulsado el desarrollo de tecnologías destinadas a mejorar las propiedades de la madera. En este contexto, la densificación termomecánica se presenta como una alternativa para incrementar la densidad y las propiedades mecánicas de maderas de rápido crecimiento, ampliando sus potenciales usos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del proceso de densificación termomecánica sobre la madera de *Eucalyptus grandis*, analizando el efecto de la temperatura, la presión y el tiempo de prensado sobre la densidad y la carga máxima en compresión perpendicular a la fibra. La madera utilizada se obtuvo de un bosque del departamento de Rivera Uruguay. El experimento se realizó bajo la configuración de un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2^3 , evaluando dos niveles de temperatura (160 °C y 190 °C), dos tiempos de prensado (1h y 3h) y dos niveles de presión (5 MPa y 10 MPa). La densificación se realizó mediante el prensado termomecánico en condiciones controladas. Posteriormente, se determinaron la densidad aparente y la carga máxima en compresión perpendicular a la fibra. Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA), considerando los efectos principales y sus interacciones. Los resultados mostraron un aumento de la densidad en todos los tratamientos, con incrementos entre 5 % y 35 %, mientras que las propiedades mecánicas presentaron respuestas variables, con aumentos marcados en algunos tratamientos. El análisis estadístico evidenció una interacción significativa entre los tres factores para la densidad, mientras que la presión fue el principal factor influyente sobre la carga máxima en compresión perpendicular a la fibra. Se concluye que la densificación termomecánica permite mejorar la calidad de la madera de *Eucalyptus grandis*, aunque el efecto sobre sus propiedades depende de la combinación de variables del proceso.

Palabras clave: densificación, *Eucalyptus grandis*, propiedades físicas, propiedades mecánicas

ABSTRACT

The increasing demand for forest products and the expansion of fast-growing species have promoted the development of technologies aimed at improving wood properties. In this context, thermomechanical densification has emerged as an alternative for increasing the density and mechanical properties of woods such as *Eucalyptus grandis*, expanding their potential applications. The objective of this study was to evaluate the effects of the thermomechanical densification process on *Eucalyptus grandis* wood, analyzing the influence of temperature, pressure and pressing time on density and maximum compression perpendicular to the grain. *Eucalyptus grandis* wood from a commercial plantation in Uruguay was used. The experiment was conducted under a completely randomized design with a 2^3 factorial arrangement, evaluating two levels of temperature (160 and 190 °C), two pressing times (1 and 3 h) and two pressure levels (5 and 10 MPa). Densification was performed by thermomechanical pressing under controlled conditions. Subsequently, apparent density and maximum load in compression perpendicular to the grain were determined. Data was analyzed using analysis of variance (ANOVA), considering the main effects and their interactions. The results showed an increase in density for all treatments, with increases ranging from 5 % to 35 %, while the mechanical properties showed variable responses, with significant increases in some treatments. Statistical analysis revealed a significant interaction among factors for density, while pressure was the main factor influencing the maximum load in compression perpendicular to the grain. It was concluded that thermomechanical densification can improve the quality of *Eucalyptus grandis* wood, although its effect on wood properties depends on the combination of process variables.

Keywords: densification, *Eucalyptus grandis*, physical properties, mechanical properties

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el sector forestal ha experimentado una transformación global asociada en cierta parte a la creciente demanda de productos derivados de la madera. A su vez se ha intensificado la búsqueda de alternativas sostenibles a los materiales tradicionales utilizados en la construcción como el acero, el cemento y los derivados del petróleo, impulsado por la necesidad de reducir su impacto ambiental. En este marco, los productos de ingeniería en base a madera han ganado relevancia como una buena alternativa. Entre ellos se destacan la madera laminada tarugada y la madera laminada cruzada tarugada, productos estructurales libres de adhesivos y clavijas metálicas, que a diferencia utilizan un ensamble mediante tarugos de madera. Estos tarugos pueden ser fabricados a partir de maderas comerciales uruguayas, mejorando sus propiedades a través de la densificación.

En Uruguay, la principal fuente de madera para la fabricación de estos tarugos proviene de plantaciones comerciales de especies de rápido crecimiento, entre las cuales *Eucalyptus grandis* ocupa un lugar destacado. Su doble propósito, producción de pulpa de celulosa y madera de calidad garantiza una amplia disponibilidad de materia prima en el país. Sin embargo, las especies de rápido crecimiento suelen presentar baja densidad aparente y propiedades mecánicas limitadas, características que pueden restringir su uso en productos de ingeniería de la madera.

En este contexto, surge la necesidad de implementar tecnologías que permitan mejorar las propiedades de la madera, incrementando su calidad y ampliando sus posibilidades de uso. Entre las distintas alternativas, los procesos de modificación de la madera han cobrado relevancia, destacándose la densificación termomecánica como una alternativa para aumentar la densidad y mejorar el comportamiento mecánico del material. Este proceso consiste en la aplicación simultánea de temperatura y presión durante un tiempo determinado, lo que genera cambios en la estructura interna de la madera. Sin embargo, el efecto del proceso depende en gran medida de las condiciones de tratamiento utilizadas. La interacción entre estas variables puede generar diferentes respuestas en las propiedades del material, por lo que resulta fundamental comprender la influencia de estas variables para optimizar el proceso.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la densificación termomecánica sobre la madera de *Eucalyptus grandis*, analizando la influencia de las principales variables del proceso sobre la densidad y la resistencia mecánica del material.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del proceso de densificación termomecánica sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis*.

1.1.2 Objetivos específicos

Identificar cómo influyen la temperatura, la presión y el tiempo durante el proceso de densificación, sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis*.

Estimar el efecto de la densificación sobre la densidad y la carga máxima en compresión perpendicular a la fibra de *Eucalyptus grandis*.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 EL SECTOR FORESTAL EN URUGUAY

Las plantaciones forestales en Uruguay han tenido un marcado crecimiento desde la implementación de la Ley Forestal de 1987. Según Uruguay XXI (2025), para el año 2025 estas se multiplicaron por siete. Actualmente, la superficie de bosque plantado estimada es de 1.161.815 hectáreas (Boragno, 2026). Esta superficie representa un 6,6 % del territorio nacional y cuenta con un fuerte componente de bosques de rendimiento, donde un 72 % de las plantaciones son de *Eucalyptus* y un 19 % de especies del género *Pinus* (Uruguay XXI, 2025). Para el año 2023, las especies con mayor presencia (superficie efectiva plantada) fueron *Eucalyptus grandis* con 408.079 ha., *Eucalyptus dunnii* con 348.914 ha. y *Pinus taeda* junto a *Pinus elliottii* con 131.158 ha. (Boragno, 2026).

Para Andreoni (2010), el aumento de la superficie dedicada a la forestación se debe a un impacto de los decretos de la Ley Forestal 15.939/87. La fuerte inversión de empresas extranjeras también puede explicar este aumento debido a su alta capacidad de uso intensivo del capital (Andreoni, 2010). Por su parte el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), definió áreas de prioridad forestal a partir de la aptitud de los suelos para la actividad forestal, conforme a lo establecido por la mencionada ley. Actualmente, estos suelos abarcan una superficie aproximada de cuatro millones de hectáreas, lo que representa el 25 % del total del área agropecuaria del país (Uruguay XXI, 2025).

Según el último boletín estadístico publicado por la DGF (Boragno, 2025), en el año 2024 se alcanzó un récord histórico de exportaciones del sector, totalizando 3.045 millones de dólares. Este valor representó un incremento del 20 % con respecto al año anterior (Boragno, 2025). Los principales destinos de los distintos productos primarios fueron Europa y Asia (Boscani & Faroppa, 2023). Estos dos mercados concentraron el 72 % del total exportado y, en ambos casos, la celulosa fue el principal producto comercializado (Uruguay XXI, 2025). En el año 2024, el sector aportó un valor bruto de producción de 4.100 millones de dólares, representando el 5,8 % del PIB del Uruguay (Sociedad de Productores Forestales [SPF], s.f.). Los empleos directos generados ascienden a 23.000, mientras que toda la actividad del sector ronda los 46.000 empleos (SPF, s.f.).

La producción de madera y celulosa impacta indirectamente en la economía a través de la cadena de valor, como señala Uruguay XXI (2025). La matriz insumo-producto evidencia una alta demanda en otros sectores, especialmente en servicios modernos y transporte, esenciales para el proceso exportador. Este efecto muestra cómo la actividad forestal se vincula con múltiples áreas de la economía, más allá del aporte directo en valor agregado y empleo (Uruguay XXI, 2025). El sector forestal posee uno de los mayores multiplicadores de impacto indirecto de la economía, superando el promedio general. La madera sólida registra el valor más alto (1,27), seguida por la celulosa (0,97) y la silvicultura (0,95), lo que evidencia una fuerte integración productiva y un elevado potencial de desarrollo, reafirmando la importancia estratégica del sector en el contexto económico nacional (Uruguay XXI, 2025).

2.2 GENERALIDADES DE LA ESPECIE *EUCALYPTUS GRANDIS*

El *Eucalyptus grandis* tiene su distribución natural en el este de la masa continental australiana (Brussa, 1994). En esta región el clima es templado a tropical, con temperaturas de entre 3 °C y 32 °C y precipitaciones medias anuales de entre 1.000 y 3.500 mm en la época estival (Boland et al., 2006). Asimismo, los autores describen a la especie como ejemplares muy altos, que alcanzan entre 45 m y 55 m de altura, con un DAP de entre 1,2 m y 2 m, y que prefieren suelos húmedos, profundos y bien drenados. Por su parte, Brussa (1994) describe una disminución marcada del crecimiento de la especie en suelos poco desarrollados y/o con drenaje imperfecto. El crecimiento también puede verse afectado en plantas jóvenes, ya que, por lo mencionado por Brussa (1994), no tolera la ocurrencia de heladas.

La albura de la madera es generalmente resistente a ataques de barrenadores, su duramen es de textura gruesa, sus fibras son rectas y de resistencia moderada, mientras que la densidad varía entre 545 y 955 kg m⁻³ (Boland et al., 2006). La densidad media puede rondar los 650 kg m⁻³ y presentar una resistencia a la flexión de 103 MPa (Paradis, 2011, como se cita en lejavs et al., 2021). En Uruguay, su cultivo se registra a lo largo de los años sesenta; su llegada se dio por medio de huertos semilleros provenientes de Sudáfrica (Brussa, 1994). En la actualidad, es una de las especies más empleadas en plantaciones comerciales por su conformación y su rápido crecimiento (Brussa, 1994).

El eucalipto se caracteriza por ser una de las especies arbóreas de crecimiento más acelerado a nivel mundial y, a su vez, la principal especie forestal implantada en Uruguay. Las rotaciones suelen rondar los 16 años para la producción de troncos para aserrío, con una tasa anual de crecimiento estimada de 30 m³ ha⁻¹ año⁻¹ para Uruguay, según Cubbage et al. (2010, como se cita en lejavs et al., 2021), mientras que Uruguay XXI (2021) indica que las rotaciones van de los 10 a los 12 años en modelos de producción de pulpa de celulosa y de los 18 a los 24 años cuando su destino es el aserrío.

Uruguay XXI (2023) muestra un incremento medio anual (IMA) variable según el grupo de suelo donde se realizan las plantaciones. Los mayores incrementos se dan en grupos de suelo 7 en el departamento de Rivera y Tacuarembó, pudiendo alcanzar los 33 m³ ha⁻¹ año⁻¹, mientras que los demás suelos forestales en el litoral y suroeste del país rondan entre los 20 y 32 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Uruguay XXI, 2023).

En cuanto a su uso, es conocido su doble propósito, donde una parte del volumen de madera tiene destino a pulpa de celulosa y otra como madera sólida de alta calidad en aserraderos (Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social [CERES], 2024). La demanda de la especie por las industrias es alta. Concretamente, por parte de la industria del aserrío Urufor, junto a Cofusa (Red Grandis), tiene un consumo anual de 325.000 m³, los cuales son destinados a productos de alta calidad como tablas secas en horno y clasificadas por norma NHLA y madera laminada, los cuales son utilizados en la industria de la construcción y mueblería. El 90 % de esta producción tiene como destino la exportación (Uruguay XXI, 2021). Otro actor importante en el consumo de la madera de *Eucalyptus grandis* es LUMIN, con una

demanda aproximada de 270.000 m³ destinados a la producción de tableros contrachapados.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El estudio de los componentes de la madera resulta fundamental para interpretar su comportamiento frente a distintos procesos, entre ellos la densificación; ya que dichas características están determinadas por su estructura anatómica y composición química, condicionando sus propiedades físicas y mecánicas. La madera es un material lignocelulósico que constituye estructuralmente el tronco de los árboles y está formada por un sistema organizado de células dispuestas principalmente en dirección longitudinal desde las raíces hasta la copa y en sentido radial desde la médula hacia la corteza. Dentro de esta organización se destaca el sistema conductor, compuesto por xilema o vasos leñosos, responsables del transporte de savia bruta desde las raíces hacia las hojas, y floema o vasos liberianos, encargados de distribuir la savia elaborada al resto de la planta (Umlandt et al., 2022).

Desde el punto de vista macroscópico, su estructura está vinculada al crecimiento del árbol, distinguiéndose la médula en la zona central y la formación de anillos de crecimiento generados por la actividad del cambium. Estos anillos están constituidos por leño temprano, con células de paredes más delgadas y mayor lumen, y leño tardío, el cual se caracteriza por mayor espesor de pared y menor lumen, diferencias que influyen en la densidad y en el comportamiento físico del material. Asimismo, con el transcurso del tiempo se diferencian albura y duramen, así como madera juvenil y adulta, presentando la madera juvenil menor peso específico, fibras más cortas y mayor ángulo microfibrilar, lo que incide en su resistencia y estabilidad dimensional (García Freire & Tarigo Scremini, 2006).

En términos estructurales y composicionales, la madera es un material poroso constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, además de extractivos cuya proporción varía según la especie. La orientación de sus células y la diferenciación de tejidos determinan su comportamiento anisotrópico, por lo que sus propiedades deben analizarse en las direcciones longitudinal, radial y tangencial (García Freire & Tarigo Scremini, 2006). En este marco, los estudios tecnológicos adoptan tres planos convencionales de corte para su análisis: el plano transversal, perpendicular al eje longitudinal del tronco; el plano radial, dispuesto perpendicularmente a la tangente de los anillos de crecimiento (atravesando la médula); y el plano tangencial, definido como tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular a los radios leñosos (Umlandt et al., 2022).

En especies frondosas como *Eucalyptus grandis*, la organización anatómica incluye fibras que aportan resistencia mecánica y parénquima dispuesto en sentido longitudinal y radial, asociado al almacenamiento y transporte de sustancias. A nivel microscópico, las paredes celulares están conformadas por microfibrillas de celulosa inmersas en una matriz de hemicelulosa y lignina, configuración que explica el comportamiento físico de la madera frente a sollicitaciones externas y procesos de modificación tecnológica (García Freire & Tarigo Scremini, 2006).

2.3.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la madera constituyen parámetros fundamentales para evaluar su calidad y aptitud tecnológica, ya que influyen directamente en su comportamiento frente a distintos usos y procesos industriales. Entre ellas, la densidad se destaca como uno de los indicadores más relevantes, debido a su estrecha relación con las propiedades mecánicas y con el desempeño estructural del material. En el caso de *Eucalyptus grandis*, especie ampliamente implantada en Uruguay y de importancia para la producción de madera aserrada, la densidad representa un atributo clave para la valoración tecnológica de la materia prima (Böthig, 2001).

En el presente trabajo, el análisis se centró específicamente en la densidad y el contenido de humedad, por su incidencia directa en el comportamiento de la madera durante el proceso de densificación.

2.3.1.1 Humedad de la madera

La humedad de la madera se define como la cantidad de agua contenida en el leño y constituye una propiedad física esencial, ya que influye directamente en sus características mecánicas y dimensionales (Umlandt et al., 2022). El agua presente en la madera se encuentra en diferentes formas: agua libre, que se localiza en el lumen de las células, es la primera en perderse durante el secado debido a que su retención se debe únicamente a fuerzas capilares débiles; el agua higroscópica o de impregnación, ligada a las paredes celulares mediante interacciones moleculares, se intercambia con el ambiente hasta alcanzar un equilibrio higroscópico, provocando cambios en las dimensiones y en la resistencia de la madera; y el agua de constitución, que forma parte de la pared celular y únicamente puede eliminarse mediante procesos de combustión (Umlandt et al., 2022).

Según su contenido de humedad, la madera se clasifica en madera verde (50–200 % respecto al peso seco), madera en servicio expuesta al exterior (12–17 %) y madera utilizada en ambientes interiores (8–13 %). Por su naturaleza higroscópica, la madera ajusta continuamente su contenido de agua en función de la humedad ambiental hasta alcanzar un equilibrio, generando variaciones dimensionales significativas que afectan sus propiedades fisicomecánicas y determinan su comportamiento en aplicaciones estructurales y de carpintería (Umlandt et al., 2022).

La madera presenta un comportamiento higroscópico, lo que implica que intercambia humedad con el ambiente. Como consecuencia de las variaciones en su contenido de humedad, se producen fenómenos de contracción e hinchamiento. Estos cambios no ocurren de manera uniforme, ya que la madera presenta un comportamiento anisotrópico, es decir, sus propiedades físicas varían según la dirección de las fibras. En este sentido, los valores de contracción difieren dependiendo de la orientación considerada. En general, la mayor contracción se observa en la dirección tangencial, donde puede alcanzar valores cercanos al 10 %, seguida por la contracción radial, aproximadamente del 6 %. En cambio, en la dirección longitudinal las variaciones son considerablemente menores, situándose entre 0,1 % y 0,3 % (Coronel, 1994, como se cita en García Freire & Tarigo Scremini, 2006).

Estos valores deben considerarse como aproximados, ya que la madera es un material heterogéneo y sus propiedades pueden variar según distintos factores. Este comportamiento puede generar deformaciones en piezas individuales y en estructuras compuestas, además de ocasionar defectos como rajaduras y torceduras durante el proceso de secado. Por esta razón, el conocimiento de las contracciones resulta fundamental, especialmente en procesos de secado artificial, donde se controlan variables como la temperatura y la humedad con el objetivo de reducir el contenido de humedad de la madera aserrada por debajo del 20 % (Coronel, 1994, como se cita en García Freire & Tarigo Scremini, 2006).

2.3.1.2 Densidad

La densidad de un material se define como la relación entre su masa y su volumen, expresándose en kilogramos por metro cúbico (kg m^{-3}). En el caso particular de la madera, esta propiedad presenta una característica distintiva respecto a otros materiales, ya que tanto la masa como el volumen se ven afectados por el contenido de humedad. Por lo tanto, la densidad no constituye un valor fijo, sino que depende del estado higroscópico del material (Forest Products Laboratory [FPL], 2021).

La densidad presenta variaciones significativas entre especies y constituye un parámetro fundamental para caracterizar su comportamiento físico y mecánico. Asimismo, dentro de una misma especie, pueden observarse diferencias asociadas a características anatómicas tales como la proporción de madera temprana y tardía, así como la distribución de albura y duramen, factores que inciden directamente en la estructura interna y, por ende, en la densidad final del material (FPL, 2021)

2.3.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la madera describen su capacidad para resistir los distintos esfuerzos a los que puede ser sometida durante su utilización, lo que permite orientar su uso de acuerdo con los requerimientos estructurales correspondientes (Rodríguez, 1998). Dentro de estas propiedades, la resistencia a la compresión constituye uno de los parámetros más relevantes para la caracterización tecnológica del material, y puede evaluarse en dos orientaciones principales: paralela y perpendicular a la dirección de las fibras (Puertas et al., 2013).

La resistencia a la compresión perpendicular a la fibra se define como la capacidad de la madera para soportar una carga aplicada en dirección normal a la orientación de sus fibras, sin que se produzca una deformación excesiva o falla del material (Puertas et al., 2013). Este tipo de esfuerzo es característico de situaciones estructurales en las que la madera recibe cargas transversales, como en el caso de durmientes, soleras o piezas sometidas a aplastamiento (FPL, 2021). A diferencia de la compresión paralela, la madera presenta una resistencia considerablemente menor en la dirección perpendicular a las fibras; en términos generales, se estima que la resistencia a la compresión paralela puede ser entre 15 y 17 veces superior a la obtenida en dirección perpendicular, lo que refleja el marcado carácter anisotrópico del material (Puertas et al., 2013).

Desde el punto de vista del comportamiento del material durante el ensayo, la compresión perpendicular no suele presentar una rotura brusca y bien definida como ocurre en la compresión paralela; en cambio, el material tiende a deformarse progresivamente mediante el aplastamiento de las paredes celulares, que colapsan de forma gradual bajo la carga aplicada. Por esta razón, en los ensayos de compresión perpendicular se registra generalmente la carga máxima soportada por la probeta, que corresponde a la fuerza en el punto de máxima resistencia antes de que se produzca el colapso estructural del material (FPL, 2021).

La relación entre la densidad aparente y la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra ha sido ampliamente estudiada. En términos generales, a mayor densidad del material, mayor es su capacidad para resistir esfuerzos de compresión, dado que una mayor proporción de material sólido por unidad de volumen incrementa la resistencia de las paredes celulares al aplastamiento (Coronel, 1996, como se cita en Cardoso Maciel & Castagna Du Pré, 2012). Esta relación resulta especialmente relevante en el contexto de la densificación termomecánica, proceso mediante el cual se busca precisamente incrementar la densidad aparente del material y, en consecuencia, mejorar su comportamiento frente a este tipo de solicitudes (Cabral et al., 2022).

Para *Eucalyptus grandis* proveniente de plantaciones del norte de Uruguay, Baptista et al. (2004) reportaron valores de resistencia mecánica en pequeñas probetas libres de defectos obtenidas de rodales del departamento de Rivera, incluyendo ensayos de compresión, lo que constituye una referencia de base para la caracterización tecnológica de la especie a nivel nacional.

2.4 PROCESO DE DENSIFICACIÓN DE LA MADERA

2.4.1 Relevancia del proceso en la industria maderera.

La creciente demanda de madera a nivel mundial ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a garantizar un uso más eficiente del recurso forestal. Por un lado, resulta fundamental aumentar la vida útil de los productos de madera para reducir la necesidad de reemplazo y el consumo de recursos, y por otro incrementar la productividad de las plantaciones gestionadas de forma sostenible. La expansión de especies de rápido crecimiento, como *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp., responde a estos objetivos productivos; sin embargo, priorizar el rendimiento da lugar a maderas con alta proporción de madera juvenil, anillos de crecimiento amplios y baja densidad, lo que limita su desempeño y sus aplicaciones industriales (Cantera Rosso, 2020).

Frente a estas limitaciones, los procesos de modificación de la madera adquieren especial relevancia para la industria maderera, ya que permiten compensar las deficiencias propias de la madera de rápido crecimiento. Estas tecnologías contribuyen a mejorar propiedades como la durabilidad y la estabilidad dimensional, ampliando los usos potenciales del material y reduciendo la necesidad de protección artificial adicional, lo que favorece un aprovechamiento más eficiente y sostenible del recurso forestal (Cantera Rosso, 2020).

Los procesos de densificación han despertado un creciente interés en la industria maderera debido a su potencial para mejorar las propiedades intrínsecas de la madera y ampliar sus posibilidades de uso sin comprometer su carácter renovable y ambientalmente sostenible. Estas tecnologías permiten modificar el material mediante la acción combinada de calor, humedad y fuerzas mecánicas, posibilitando la obtención de productos con propiedades y funcionalidades adaptadas a los requerimientos de la ingeniería y el diseño industrial (Sandberg et al., 2013).

Sotayo et al. (2020) encontraron alternativas a los productos de la ingeniería de la madera tradicionales como el CLT (Cross-Laminated Timber), que suele depender de adhesivos, los cuales resultan emisores de gases tóxicos que dificultan el reciclaje. Las alternativas sin adhesivos pueden ser los tableros como DLT (Dowel-Laminated Timber), y la madera densificada, productos libres de adhesivos que mejoran la sostenibilidad económica y ambiental. Sotayo et al. (2020) encontraron que el proceso de densificación termomecánico mejora claramente las propiedades mecánicas del material. También señalan que los elementos como el DLT pueden ofrecer una capacidad de carga de hasta un 15 % superior si se la compara con madera sin densificar. Se estima que estos materiales pueden reducir la huella de carbono en un 20 %, con respecto a materiales tradicionales.

En este marco, el proceso de densificación de la madera ha sido ampliamente estudiado como una alternativa para mejorar diversas propiedades del material, tales como la densidad, la resistencia mecánica y la humectabilidad. Diversos estudios reportan mejoras significativas en el desempeño físico y mecánico de la madera tratada (Pertuzzatti et al., 2018). Estas mejoras se asocian a la modificación de la estructura celular de la madera durante el proceso, particularmente a la reducción de la porosidad y al aumento de la densidad aparente del material.

En la actualidad, la madera densificada ha encontrado aplicaciones en sectores como la construcción, la fabricación de mobiliario y la decoración, llegando incluso a sustituir materiales de madera de alta resistencia. El desarrollo y la creciente adopción de estas tecnologías resultan relevantes no sólo para abordar el desequilibrio entre la oferta y la demanda de materiales de madera, sino también para promover el uso de materiales ambientalmente responsables y contribuir al desarrollo económico (Luan et al., 2022).

2.4.2 Objetivos del proceso densificación

Para Luan et al. (2022) el objetivo principal de la densificación mecánica es mejorar las propiedades de maderas de baja o media resistencia, con el fin de ampliar el campo de aplicación de la madera proveniente de especies de rápido crecimiento. Esto se logra reduciendo los poros y huecos (lúmenes) entre las paredes celulares según Sotayo et al. (2020).

La densificación generalmente produce un aumento de la densidad, lo que se traduce en mejoras en la rigidez y la resistencia a la flexión respecto a la madera no densificada, aunque el tratamiento térmico puede generar oscurecimiento superficial y modificaciones químicas en los componentes de la madera (Pertuzzatti et al., 2018).

Las propiedades mecánicas de la madera están directamente relacionadas con su densidad; por esto, aumentar la densidad permite mejorar la dureza y el desempeño mecánico del material. Sadatnezhad et al. (2017) afirman que existe una alta correlación entre la densidad de la madera y sus propiedades mecánicas, donde, a mayores densidades la resistencia mecánica es mayor y como consecuencia mayor es su dureza. Numerosos investigadores han desarrollado diversos procesos para densificar la madera, con el objetivo de transformar maderas de baja densidad y bajo interés comercial en productos de alta calidad (Kutnar & Sernek, 2007).

2.4.3 Definición del proceso de densificación

La madera puede ser modificada mediante métodos químicos, físicos, mecánicos o biológicos con el fin de alterar sus propiedades. Esta definición abarca prácticamente todos los cambios que pueden ocurrir en la madera una vez extraída del bosque. Según Hill (2006, como se cita en Sandberg et al., 2015), la modificación de la madera implica la acción de un agente químico, biológico o físico sobre el material para mejorar propiedades específicas durante la vida útil del producto.

El proceso de densificación de la madera se ha utilizado desde principios del siglo XX y siendo útil principalmente para mejorar sus propiedades estructurales. Por medio de las técnicas que el proceso incluye, se puede proporcionar a la madera mayor resistencia mecánica, dureza, resistencia a la abrasión y estabilidad dimensional en comparación con maderas no densificadas (Cabral et al., 2022).

Luan et al. (2022) indican que, la densificación por métodos mecánicos consiste en modificar la microestructura interna de la madera, reduciendo el volumen vacío. Esto se logra aplicando una carga sobre la madera y logra aumentar su densidad y llegar al objetivo de aumentar las propiedades mecánicas.

De acuerdo con Pertuzzatti et al. (2018), existen principalmente dos enfoques para la densificación: el llenado de los espacios vacíos mediante fluidos y la compresión radial del material mediante la aplicación conjunta de calor y presión, conocida como densificación termomecánica. Este proceso puede clasificarse en dos categorías principales: densificación en masa, que comprime las células de la madera a lo largo de todo el volumen de la sección, y densificación superficial, que afecta únicamente a las células cercanas a la superficie del material (Sotayo et al., 2020).

2.5 MÉTODOS DE DENSIFICACIÓN

Los procesos de densificación pueden aumentar la densidad de la madera de tres maneras: mediante compresión mecánica, que reduce los espacios vacíos; mediante la impregnación de sustancias en dichos espacios; o a través de la combinación de ambos métodos (Fang et al., 2012). Para Luan et al. (2022) los métodos de impregnación química a diferencia de la compresión mecánica son de costo muy elevado y eliminan las características ecológicas de la madera natural y causan contaminación ambiental. El presente estudio se concentró en procesos de densificación mecánica.

Comúnmente la madera es conocida como un material anisotrópico, y su comportamiento en la densificación, no está exento de esta característica. En esta línea, la madera puede comprimirse en los tres sentidos posibles, tangencial, longitudinal y radial. En sentido tangencial la madera tardía se comprime y deforma en forma de ondas, mientras que la compresión longitudinal produce pliegues provocando daños en la estructura microscópica (Sandberg et al., 2015). Es por esto por lo que, la densificación suele darse por una compresión en sentido radial, donde se evita la fractura del material durante la compresión (Sotayo et al., 2020).

Dada la compleja relación y la diferencia entre los distintos procesos de densificación mecánica, no existe una definición o clasificación clara. Sin embargo, Luan et al. (2022) indican que algunos estudios han clasificado los procesos en termo hidromecánico (THM) o termomecánico (TH), dependiendo de si se controla el contenido de humedad de la madera durante el proceso o no.

2.5.1 Densificación termo hidromecánica (THM).

Este método utiliza los efectos de tres factores; temperatura, humedad y presión. En este proceso de mejora y estabilización dimensional de la madera, se utiliza la inyección de vapor (antes o durante la compresión) para el ablandamiento de la matriz lignina-hemicelulosa. Además de la mejora en la estabilidad dimensional de la madera, el ablandamiento de la matriz lignina-hemicelulosa y el movimiento de las microfibrillas, disminuyen la pérdida de propiedades mecánicas y aumentan la dureza superficial de piezas de densificadas (Cabral et al., 2022; Inoue et al., 1993).

2.5.2 Densificación termomecánica (TM)

Cabral et al. (2022) definen la densificación termomecánica (TM) como una estabilización de la madera por medio del calentamiento. Welzbacher et al. (2004) caracterizan a la misma por tratarse de un prensado en caliente, utilizando prensas abiertas y sin posibilidad de controlar el contenido de humedad de la madera (CH), ni la humedad relativa del ambiente (HR%).

Ante la ausencia de control sobre HR% y el CH, resulta importante que la madera sea pretratada. Esto significa que debe ser precalentada y acondicionada, llevándola a un CH de 13 %, eliminando así el riesgo de daños durante la compresión. El precalentamiento aumenta la movilidad de la lignina dentro de la estructura celular, aliviando las tensiones internas de la madera durante el proceso (Seborg et al., 1956). Luego del precalentamiento, la madera se comprime en una prensa caliente a temperaturas que determinan la deformación. Este proceso también puede utilizar un sistema cerrado, el cual permite un control sobre las variables temperatura, contenido de humedad, presión y humedad relativa. Por su parte, Skyba et al. (2009) resaltan como el uso de humedad en las distintas etapas del tratamiento aporta en la hidrólisis de la celulosa, lo cual alivia tensiones de la madera. De esta manera la estabilidad dimensional y otras propiedades aumentan.

2.5.3 Compresión térmica viscoelástica (VTC)

La densificación VTC, aprovecha el comportamiento de los compuestos de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina), siendo estos viscosos y elásticos. Este proceso requiere de un sistema continuo que permita el calentamiento y acondicionamiento en simultáneo; el ablandamiento por descompresión por vapor; una compresión; un recocido que promueve la degradación térmica y relajación y un enfriamiento final (Rautkari et al., 2011).

Luan et al. (2022) a su vez definen dos tipos de clasificación del proceso de densificación, dependiendo de si el sistema adiciona o no vapor en el prensado; sin adición de vapor (NAS [Non-Adding Steam Densification]), y con adición de vapor (AS [Adding Steam]).

2.5.4 Densificado por método NAS.

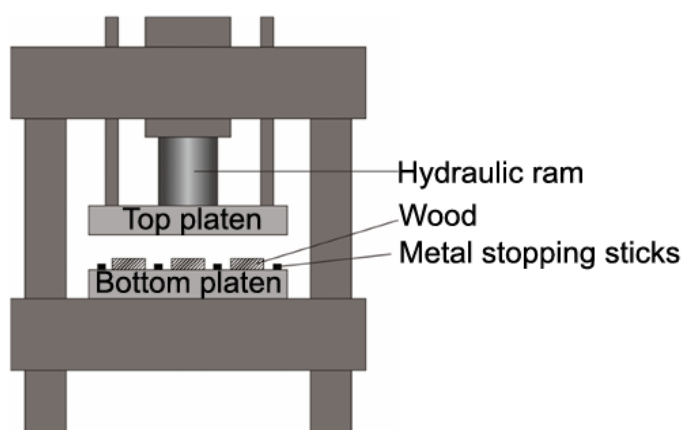
Esta técnica consiste en cuatro etapas o pasos: ablandamiento, plastificación, compresión y enfriamiento. Durante el proceso la madera se comprime y el espacio vacío entre las células y en el interior de ella se reduce. Dentro de este proceso, también existe una distinción dependiendo del grado de densificado de la madera, pudiendo ser masiva o no masiva. La densificación masiva, densifica completamente la pieza en la dirección de compresión mientras que, la no masiva solo densifica capas superficiales (Luan et al., 2022).

2.5.5 Densificación masiva

La densificación masiva, generalmente utiliza como equipo de prensado, una prensa hidráulica como la que se muestra en la Figura 1, esta consiste en una placa inferior y otra superior, con un sistema hidráulico y uno de control de temperatura (Luan et al., 2022). La pieza por densificar es colocada entre las dos placas previamente precalentadas con una presión mínima, cuando la temperatura interior alcanza una temperatura establecida, se comienza con la compresión (Pertuzzatti et al., 2018).

Figura 1

Esquema general de una prensa hidráulica como la utilizada en la densificación masiva



Nota. Tomado de Luan et al. (2022).

2.6 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN

Pertuzzatti et al. (2018) indicaron que la temperatura en el momento de la compresión debe ser mayor a la temperatura de transición vítrea, donde la madera puede pasar al estado termoplástico. Luan et al. (2022), señalan que la temperatura utilizada en la compresión fluctuó entre 100 °C y 230 °C, dependiendo de la especie arbórea.

Según lo reportado por Belleville et al. (2025), la compresión suele realizarse en prensas a temperaturas comprendidas entre 120 °C y 180 °C, bajo condiciones cuidadosamente controladas, tal como señalan Rautkari et al. (2011).

En cuanto a la dirección de compresión, Belleville et al. (2025) indican que la densificación se realiza mayoritariamente en sentido radial, ya que la compresión en dirección tangencial puede provocar deformaciones y daños en los anillos de crecimiento, especialmente en la madera tardía, generando patrones irregulares en la sección transversal del material densificado, de acuerdo con Sandberg et al. (2013, 2015) y Sotayo et al. (2020).

Finalmente, el perfil de densificación obtenido en madera sólida comprimida depende de múltiples factores propios del proceso, entre los que se incluyen el contenido de humedad inicial, la orientación de la veta, la temperatura y el tiempo de prensado. Adicionalmente, variables como la especie, las condiciones previas y posteriores al tratamiento, la relación de compresión, la presión aplicada y la velocidad de prensado influyen de manera significativa en la calidad final y en las propiedades mecánicas del material densificado (Belleville et al., 2025).

En este contexto, la etapa de compresión se lleva a cabo principalmente a temperaturas superiores a la temperatura de transición vítrea (T_g) de los componentes de la madera, alcanzando rangos en los que dichos componentes se encuentran suficientemente plastificados para permitir la deformación sin daño estructural. Este criterio de selección de temperatura es señalado por Belleville et al. (2025), en concordancia con lo propuesto por Sandberg et al. (2013).

Los resultados del proceso dependen en gran medida de parámetros como la temperatura y la presión aplicada. Temperaturas elevadas tienden a mejorar la estabilidad dimensional, aunque pueden afectar negativamente las propiedades mecánicas, mientras que presiones excesivas pueden provocar el colapso de la estructura celular (Kamke & Sizemore, 2008, como se cita en Pertuzzatti et al., 2018).

2.6.1 Factores de la madera

Durante el calentamiento de la madera, sus principales componentes lignina, hemicelulosa y celulosa presentan un comportamiento de ablandamiento diferencial, el cual depende tanto de la temperatura alcanzada como del contenido de humedad del material en sí mismo. Este comportamiento ha sido ampliamente descrito y es retomado por Salmén (1990, como se cita en Belleville et al., 2025) para explicar la respuesta termo viscoelástica de estos polímeros estructurales.

Como consecuencia de este comportamiento el grado de plastificación de la pared celular durante la compresión constituye un factor determinante en los procesos de densificación de la madera. Cuando la plastificación es adecuada, las células pueden comprimirse sin presentar fracturas, ya que las paredes celulares se deforman progresivamente en lugar de romperse por pandeo (Belleville et al., 2025).

En este sentido, el contenido de humedad, propio de la madera, juega un rol fundamental durante el proceso, ya que la humedad presente en las paredes celulares induce un efecto mecano absorbente que contribuye al ablandamiento del material, permitiendo su compresión sin generar daños estructurales significativos, tal como describen Bao et al. (2017, como se cita en Belleville et al., 2025).

En base a los antecedentes analizados, se evidencia que el comportamiento termo-viscoelástico de los componentes de la madera, así como su contenido de humedad, condicionan el grado de plastificación de la pared celular y, en consecuencia, la respuesta del material ante procesos de compresión. En este sentido, la adecuada combinación de variables como temperatura, presión y tiempo de aplicación resulta determinante para favorecer una deformación controlada de las células sin comprometer la integridad estructural.

El presente trabajo se propone evaluar el efecto del proceso de densificación termomecánica (TM) sobre la madera de *Eucalyptus grandis*, analizando específicamente la influencia de la temperatura, la presión y el tiempo de aplicación en la densidad y en la carga máxima en compresión perpendicular a la fibra. Si bien el contenido de humedad es reconocido como un factor relevante para el comportamiento del material, en este estudio no se consideró como variable de control del proceso; en cambio, se midió antes y después de la densificación para valorar su variación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA

La madera utilizada en este estudio provino de una plantación comercial de *Eucalyptus grandis*, ubicada en el departamento de Rivera (30°56'13" S, 55°33'35" O), en el noreste de Uruguay. La plantación estaba conformada por árboles de 22 años. Posteriormente, se seleccionaron tablas de dimensiones iguales a 89 × 36 × 1900 mm, previamente secadas en horno convencional. Las tablas presentaban pequeños nudos en las caras cercanas al eje neutro y/o deformaciones mínimas. El patrón de aserrado de las tablas fue tangencial. No se apreciaron anillos de crecimiento claramente definidos.

Al momento de seleccionar las probetas, se realizó una caracterización visual para garantizar que todas estuvieran libres de defectos macroscópicos, tales como nudos, grietas, presencia de médula, ataques biológicos o deformaciones. Únicamente se incluyeron piezas con apariencia estructuralmente íntegra, a fin de evitar variabilidad asociada a defectos y asegurar la validez de las comparaciones entre tratamientos. Las dimensiones finales de las mismas fueron 40 mm de espesor, 40 mm de ancho y 160 mm de largo, mientras que el sentido de corte fue tangencial. Adicionalmente, se registró su masa y se calculó su volumen con las dimensiones mencionadas, determinando así la densidad. Cada probeta se identificó mediante un código alfanumérico que correspondía al tratamiento asignado.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento se llevó a cabo bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2^3 , en el cual se evaluó el efecto de tres factores: temperatura, tiempo y presión de densificación, sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis*.

Los niveles de cada factor fueron los siguientes: temperatura (160 y 190 °C), tiempo de prensado (1 y 3 horas) y presión aplicada (5 y 10 MPa), generando un total de ocho combinaciones de tratamientos (Tabla 1). Para cada tratamiento se realizaron dos repeticiones independientes. Cada repetición estuvo conformada por un conjunto de cuatro probetas de 40 x 40 x 160 mm, que en conjunto constituyeron la unidad experimental.

Tabla 1

Tratamientos aplicados, resultantes de la combinación de los distintos niveles de temperatura, tiempo y presión

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Presión (MPa)
1	160	1	5
2	160	1	10
3	160	3	5
4	160	3	10
5	190	1	5
6	190	1	10
7	190	3	5
8	190	3	10

La unidad experimental estuvo constituida por cada repetición de tratamiento, conformada por un conjunto de cuatro probetas procesadas simultáneamente bajo las mismas condiciones de densificación. Estas probetas se consideraron submuestras dentro de cada unidad experimental, utilizadas para mejorar la precisión de las mediciones y representar la variabilidad del material. Se realizaron dos repeticiones por tratamiento, totalizando dieciséis unidades experimentales. Los datos obtenidos fueron utilizados para evaluar el efecto de los factores estudiados sobre las variables de respuesta (temperatura, presión y tiempo), considerando las posibles interacciones entre los mismos.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 Instalación del ensayo de densificación termomecánica

En el proceso de prensado se utilizó una prensa hidráulica de laboratorio con doble plato calefaccionado (modelo CHY-600DG), como se observa en la (Figura 2). El equipo empleó una capacidad máxima de 33 MPa y platos calefactores de 180 × 180 mm, con control de temperatura desde temperatura ambiente hasta 500 °C y precisión de 0,1 °C.

La prensa contaba con un sistema hidráulico con manómetro de doble escala para el control de la presión aplicada y un sistema de enfriamiento por agua para la disipación térmica durante el proceso y el mantenimiento de las condiciones definidas para cada tratamiento. Los ensayos se realizaron en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería de Procesos Forestales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Figura 2

Prensa hidráulica de laboratorio con doble plato calefaccionado (modelo CHY-600DG) utilizada en el proceso de densificación



La instalación del ensayo se diseñó de manera que todos los parámetros (principalmente tiempos de pre calentamiento y enfriamiento y aislamiento térmico) permanecieran constantes durante la aplicación de los tratamientos, garantizando la reproducibilidad y consistencia de los resultados. De este modo, las variaciones observadas en las propiedades de la madera pudieran atribuirse exclusivamente a las combinaciones de temperatura, presión y tiempo definidas en el diseño experimental.

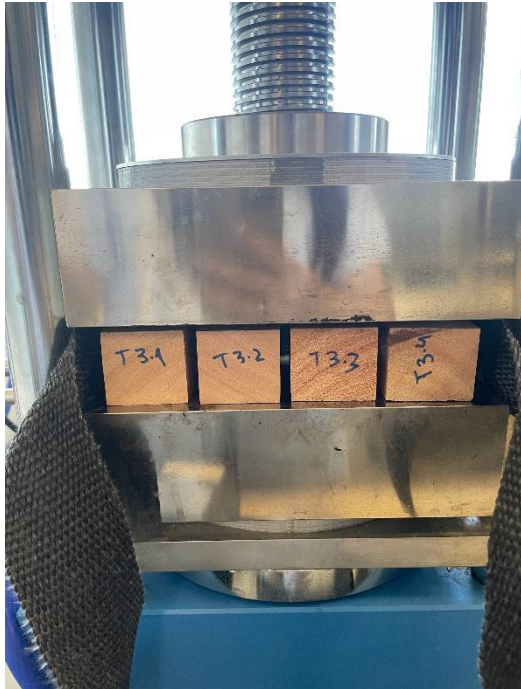
Los ensayos se realizaron empleando distintos equipos de medición y control, incluyendo balanzas, calibre, un xilohigrómetro para la determinación del contenido de humedad, un datalogger para el registro de variables.

3.3.2 Implementación del ensayo

Para cada proceso de densificación se colocaron cuatro probetas, combinando las condiciones de presión, temperatura y tiempo de acuerdo con el tratamiento asignado a cada probeta (Tabla 1). Las probetas se ubicaron de forma equidistante entre sí y respecto a los bordes de la plancha de la prensa, con el objetivo de asegurar la uniformidad del proceso (Figura 3).

Figura 3

Disposición de las probetas dentro de la prensa hidráulica previo al inicio del densificado

**Figura 4**

Sistema de aislamiento térmico en prensa hidráulica mediante cinta resistente al calor: frontal y lateral



La densificación se realizó mediante el prensado termomecánico de las probetas. Para ello, la prensa se precalentó a la temperatura indicada para cada tratamiento durante 20 minutos, con las probetas ya en posición, es decir, en contacto con la plancha superior e inferior, pero sin ejercer presión.

A su vez, con el fin de minimizar las pérdidas de calor y asegurar condiciones térmicas homogéneas durante el tratamiento, se colocó al inicio del precalentamiento una cinta de alta resistencia térmica alrededor de las planchas. Este aislamiento adicional permitió reducir los gradientes de temperatura entre las probetas ubicadas en la zona central y aquellas situadas en los bordes de la prensa, favoreciendo una mayor uniformidad en el proceso tal como se aprecia en la (Figura 4).

Una vez finalizado este período de pre-acondicionamiento, se aplicó la presión correspondiente y se mantuvo durante el tiempo establecido. Finalizado el tiempo de prensado, la temperatura de la prensa se redujo hasta 80 °C, manteniendo la presión constante. Posteriormente, las probetas fueron retiradas de la prensa (a 80 °C), pesadas y dimensionadas inmediatamente.

Una vez densificadas y aún calientes, las probetas fueron inmediatamente colocadas en un contenedor hermético para estabilizar su contenido de humedad y evitar variaciones dimensionales debidas a la exposición al ambiente. Posteriormente, se identificaron mediante un código según el tratamiento aplicado, y permanecieron en estas condiciones hasta la ejecución de los ensayos mecánicos.

3.3.4 Ensayos mecánicos

Posteriormente, se realizaron ensayos de compresión perpendicular a las fibras en probetas densificadas y no densificadas (control), con el objetivo de evaluar la influencia del proceso de densificación en la resistencia mecánica del material. Se realizaron 2 repeticiones por tratamiento

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo utilizando una máquina universal de ensayos (modelo Pilot 4, marca Controls), ubicada en el Instituto de Ensayos de Materiales (IEM) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, calibrada para una capacidad máxima de 100 kN (Figura 5).

Figura 5

Prensa universal (modelo Pilot 4, marca Controls): (a) vista general; (b) zona de ensayo



El procedimiento experimental se realizó conforme a lo establecido en la norma UNE 56542 (1988). Las probetas fueron cargadas de manera monotónica, a velocidad constante, hasta alcanzar la rotura del material o la carga máxima admisible por el equipo.

A partir del ensayo de compresión (Figura 6), se obtuvieron los valores de carga máxima en compresión de cada probeta, los cuales fueron utilizados para determinar y comparar la resistencia mecánica de las muestras densificadas y no densificadas.

Figura 6

Ensayo de compresión perpendicular a la fibra



3.3.5 Determinación del contenido de humedad y densidad

Una vez finalizados los ensayos mecánicos, se procedió a la determinación del contenido de humedad de las probetas, con el objetivo de interpretar adecuadamente los resultados obtenidos. Este procedimiento se aplicó tanto a las probetas densificadas como a las no densificadas.

Para ello, cada probeta fue seccionada en porciones de aproximadamente 3 cm², consideradas representativas del material previamente ensayado en la máquina universal. Esta sección permitió obtener muestras de menor tamaño, facilitando su manipulación y posterior procesamiento.

Cada muestra fue pesada inicialmente mediante una balanza de precisión, registrándose el peso húmedo (Ph), correspondiente a la masa total de la madera, incluyendo el agua contenida. Posteriormente, las probetas fueron colocadas en estufa a una temperatura de 103 ± 2 °C durante un período de 48 horas, tiempo previamente verificado como suficiente para alcanzar el estado anhidro. Este procedimiento asegura la eliminación del agua libre y del agua higroscópica presente en el material.

Una vez finalizado el secado, las probetas se pesaron nuevamente en dos mediciones consecutivas. El peso seco (Ps) se consideró alcanzado cuando la variación entre ambas mediciones fue inferior al 0,1 %, confirmando que se había alcanzado masa constante. El contenido de humedad se determinó mediante la siguiente expresión (1):

$$CH (\%) = (Ph - Ps) / Ps \times 100 \quad (1)$$

Además, se determinó la densidad aparente de cada probeta, variable fundamental para la evaluación del material. La densidad (ρ) expresada en g/cm³, se calculó como (2):

$$\rho = m/V \quad (2)$$

donde m es la masa (g) y V es el volumen (cm³).

3.4. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

Para evaluar el efecto de los factores experimentales sobre las variables de respuesta, se ajustó para cada variable analizada (densidad media y carga máxima en compresión) un modelo factorial completo considerando como efectos fijos la temperatura, el tiempo y la presión, así como todas sus interacciones.

El modelo utilizado fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + C_i + T_j + P_k + (CT)_{ij} + (CP)_{ik} + (TP)_{jk} + (CTP)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (3)$$

donde:

- Y_{ijkl} : representa el valor observado de la variable respuesta (densidad media o propiedad mecánica) correspondiente a la l -ésima unidad experimental sometida al nivel i de temperatura, nivel j de presión y nivel k de tiempo de prensado.
- μ : media general del experimento
- C_i : efecto del i -ésimo nivel de temperatura ($i=160, 190$)
- P_k : efecto del k -ésimo nivel de presión ($j=5, 10$)
- T_j : efecto del j -ésimo nivel de tiempo de tratamiento ($k=1, 3$)
- $(CT)_{ij}$: efecto de la interacción entre temperatura y tiempo para los niveles i y j
- $(CP)_{ik}$: efecto de la interacción entre temperatura y presión para los niveles i y k
- $(TP)_{jk}$: efecto de la interacción entre presión y tiempo para los niveles j y k
- $(CTP)_{ijk}$: efecto de la interacción triple entre temperatura, tiempo y presión
- ε_{ijkl} : error aleatorio asociado a la observación Y_{ijkl} , asumido independiente e idénticamente distribuido con media cero y varianza constante σ^2

Los efectos de los factores se evaluaron a través de análisis de varianza (ANOVA) tipo II. Dado el reducido número de repeticiones por tratamiento; la verificación de los supuestos se efectuó de forma gráfica mediante el análisis de residuos, en lugar de pruebas formales de normalidad y homogeneidad de varianzas, las cuales presentan baja potencia en muestras pequeñas.

Cuando se detectaron interacciones significativas entre los factores, la interpretación de los resultados se centró en el análisis gráfico de las interacciones, con el fin de identificar patrones de respuesta asociados a las distintas combinaciones de los tres factores principales. Se construyeron gráficos de interacción de tres vías, considerando diferentes configuraciones de ejes y paneles para facilitar la visualización del comportamiento conjunto de los factores.

Debido al carácter exploratorio del estudio y al número limitado de repeticiones por tratamiento, los resultados se interpretaron como evidencia preliminar orientada a identificar tendencias y posibles combinaciones de factores de interés. En este marco, se realizó adicionalmente un análisis de potencia estadística mediante simulaciones, con el objetivo de estimar el tamaño de muestra mínimo necesario para detectar interacciones de magnitud relevante con una potencia estadística cercana al 80 % en futuros ensayos. Este análisis se basó en el modelo ajustado y en escenarios de tamaño de efecto plausibles desde el punto de vista experimental.

Todos los análisis estadísticos se realizaron en el entorno R (R Core Team versión 4.4.x), utilizando para el ajuste y análisis de los modelos el paquete car (Fox & Weisberg, 2019) y para las representaciones gráficas el paquete ggplot2 (Wickham, 2016).

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del experimento factorial diseñado para evaluar el efecto del proceso de densificación termomecánica sobre la madera de *Eucalyptus grandis*. En primer lugar, se exponen los resultados correspondientes a la densidad media y, posteriormente, los asociados a las propiedades mecánicas evaluadas. Luego se describen las observaciones macroscópicas posteriores al proceso de densificación.

4.1 DENSIDAD ALCANZADA LUEGO DEL DENSIFICADO

Tabla 2

Densidad final promedio y diferencia respecto a la densidad inicial de probetas sin densificar

Tratamiento	Densidad final (kg m ⁻³)	Diferencia (%) *
1	509	5,2
2	623	23,1
3	707	25,8
4	667	33,9
5	563	17,8
6	625	21,9
7	645	26,7
8	747	34,8

Nota. (*) diferencia porcentual respecto a la densidad promedio inicial de probetas sin densificar. La densidad final representa el promedio de las 8 probetas para cada tratamiento.

En todos los tratamientos, se observó un aumento de la densidad (Tabla 2), tanto en el promedio general por tratamiento como en cada una de las probetas. El tratamiento 1 presentó el menor aumento con un 5,2 % siendo este el menos agresivo en cuanto a las condiciones del prensado mientras que, el tratamiento 8 que fue el más agresivo, registró el valor más alto, tanto en kg m⁻³ como en % respecto a la densidad inicial, seguido por el tratamiento 4 con un aumento del 33,9 %. Los demás tratamientos presentaron un aumento de entre 17 y 27 % respecto a la densidad inicial.

4.2 CARGA MÁXIMA SOPORTADA LUEGO DEL DENSIFICADO

Tabla 3

Carga máxima soportada en compresión para cada tratamiento aplicado

Tratamiento	Carga máxima (kN)	Diferencia (%) *
1	27,1	8,4
2	49,0	96
3	27,0	8
4	50,7	103
5	24,3	-0,8
6	80,5	222
7	23,4	-6,4
8	72,1	188

Nota. (*) diferencia porcentual respecto a la carga máxima promedio inicial de probetas sin densificar. La carga máxima representa el promedio de las 8 probetas ensayadas por tratamiento.

La Tabla 3 muestra un efecto variado en la propiedad carga máxima donde, se observó un efecto negativo (disminución de la carga máxima soportada medida en kN), en los tratamientos 5 y 7. En el tratamiento 5 el densificado casi no tuvo efecto sobre esta propiedad donde se observó una disminución del 0,8 % respecto al valor registrado en las probetas sin densificar mientras que para el tratamiento 7 la carga máxima disminuyó un 6,4 %. Por su parte el tratamiento 6 presentó el mayor aumento con un 222 % respecto a la media registrada para las probetas control, donde se obtuvo un valor promedio de 24,9kN (Tabla A9). Los tratamientos 8 y 4 obtuvieron un aumento de 188 % y 103 % respectivamente, seguidos del tratamiento 2 con un 96 %. Por su parte el tratamiento 1 y 3 registraron un leve aumento en la propiedad medida, rondando el 8 %. Como se discute luego, el aumento en las propiedades medidas no siempre significó una valoración positiva a pesar de ser registros mayores a los de referencia en muestras sin densificar.

4.3 OBSERVACIONES MACROSCÓPICAS POST DENSIFICACIÓN

Luego del proceso de densificación, las probetas fueron evaluadas visualmente con el objetivo de identificar modificaciones macroscópicas asociadas a las distintas combinaciones de temperatura, presión y tiempo aplicadas en los ocho tratamientos.

En general, se observó un oscurecimiento de la madera, cuya intensidad aumentó con la agresividad del tratamiento. En algunos casos, el oscurecimiento no fue uniforme, presentando gradientes de color a lo largo de la probeta, lo que sugiere una distribución no homogénea del calor durante el proceso (Figura 7).

Este efecto fue más evidente en probetas sometidas a mayores niveles de temperatura, (Figura 8) donde se registraron zonas con tonalidades oscuras e incluso áreas localizadas con carbonización superficial.

Figura 7

Efecto del tratamiento 6 sobre la superficie de contacto de probeta con las placas



Figura 8

Efecto del tratamiento 8 sobre la superficie de contacto de probeta con las placas



Asimismo, se identificaron marcas de prensado y cambios en la textura superficial, especialmente en los tratamientos con mayor presión aplicada. Estas modificaciones se manifiestan como zonas más densificadas visualmente, con una apariencia más compacta en comparación con la madera no tratada.

En relación con la estabilidad geométrica, algunas probetas presentaron deformaciones longitudinales leves, así como indicios de recuperación parcial de espesor luego del proceso (Figura 9 y 10). Estas deformaciones fueron más frecuentes en combinaciones de alta temperatura y presión, lo que indica una respuesta diferencial del material frente a condiciones más severas de densificación.

Adicionalmente, se observaron fisuras superficiales y, en algunos casos, fisuración longitudinal, particularmente en probetas con mayor grado de modificación térmica (Figura 10). Estas fisuras podrían estar asociadas a tensiones internas generadas durante el proceso de compresión y enfriamiento, así como a la degradación parcial de la estructura celular en condiciones de alta temperatura.

En términos generales, las observaciones realizadas evidencian que el proceso de densificación termomecánica induce cambios visibles en la madera, cuya magnitud

y tipo dependen de la combinación específica de los factores experimentales. Estas modificaciones macroscópicas permiten complementar la interpretación de los resultados físicos y mecánicos, proporcionando información relevante sobre el comportamiento del material frente al tratamiento aplicado.

Figura 9

Deformación por efecto del tratamiento 6, vista del canto de la probeta



Figura 10

Efecto del densificado a 190°C durante 1h a una presión de 10 MPa



4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DENSIDAD MEDIA

Previo a la interpretación de los efectos de los factores experimentales, se evaluó la adecuación del modelo propuesto mediante el análisis gráfico de residuos. Los diagramas de residuos versus valores ajustados y el QQ-plot no evidenciaron desviaciones importantes respecto a los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Debido al reducido número de repeticiones por tratamiento, la verificación de supuestos se realizó de forma gráfica en lugar de aplicar pruebas formales, cuya potencia es limitada en muestras pequeñas.

El análisis de varianza evidenció una interacción triple significativa entre temperatura, presión y tiempo de prensado (p -valor = 0,012), lo que indica que la respuesta de la densidad media depende de la combinación conjunta de los tres factores (Tabla 4).

Tabla 4*Análisis de varianza del modelo factorial para Densidad final media*

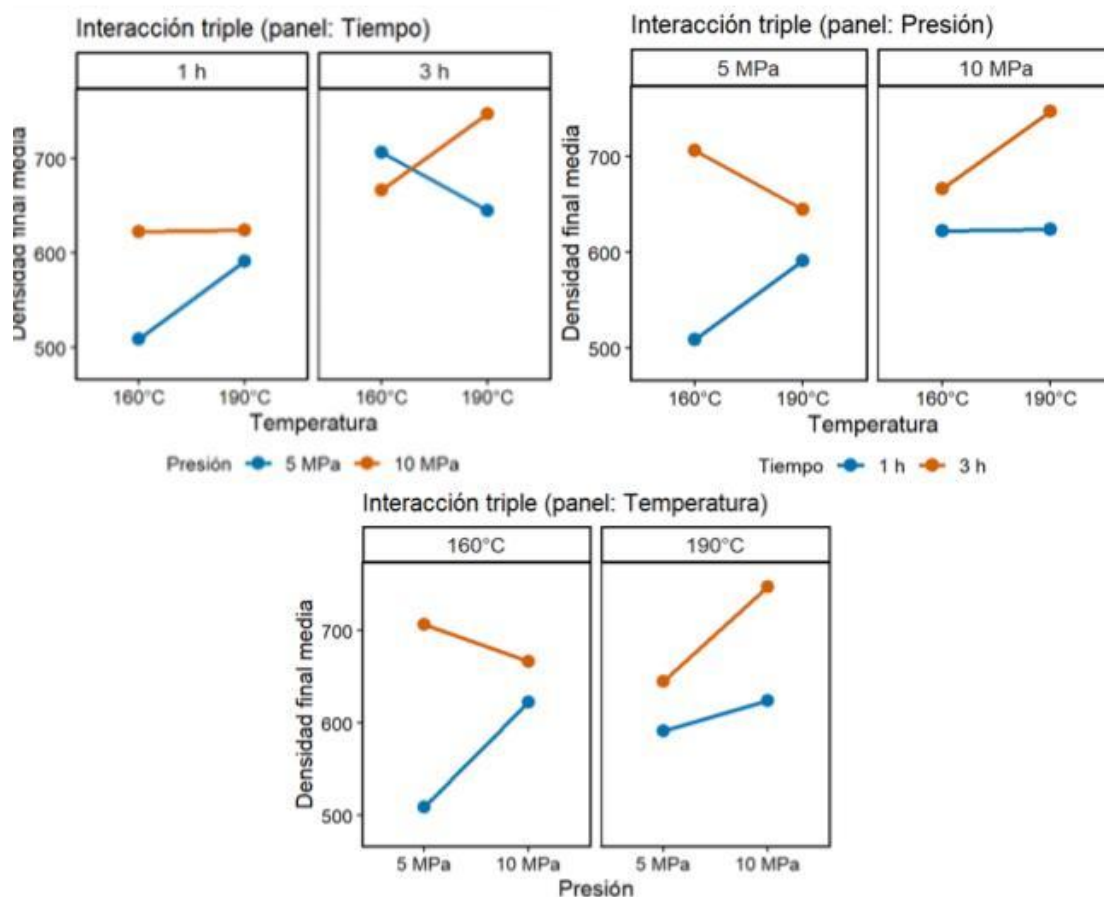
F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	p-valor
C	1	2.678	2.678	2,236	0,173
T	1	43.786	43.786	36,562	0,001*
P	1	10.868	10.868	9,075	0,0168
CT	1	1.073	1.073	0,896	0,372
CP	1	977	977	0.816	0,393
TP	1	1.785	1.785	1,491	0,257
CTP	1	12.488	12.488	10,428	0,012*
Error	8	9.580	1.197,5		

Nota. F.V.: fuentes de variación, G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrados medios. p-valores con asterisco (*) indican significancia al 1 %.

En presencia de una interacción de tercer orden significativa, la interpretación aislada de los efectos principales y de las interacciones dobles pierde sentido, ya que estos quedan condicionados por la interacción entre los tres factores. Por este motivo, el análisis se centró en la exploración gráfica de la interacción triple, con el fin de describir el comportamiento de la densidad media frente a las distintas combinaciones de temperatura, presión y tiempo de prensado. La Figura 11) presenta la interacción triple en un arreglo de tres paneles, lo que permite visualizar el comportamiento de la densidad media bajo las diferentes combinaciones de factores.

Figura 11

Interacción entre temperatura, presión y tiempo de prensado sobre la densidad media

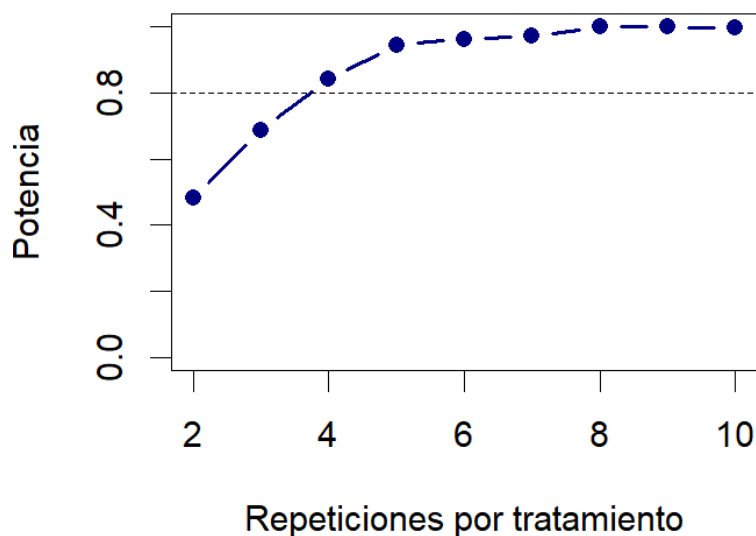


El análisis gráfico evidenció que el efecto de la temperatura sobre la densidad media no fue uniforme, y que depende simultáneamente del nivel de presión aplicado y del tiempo de tratamiento. Al comparar los tiempos de prensado se observaron cambios en la magnitud de la respuesta asociados a las combinaciones de temperatura y presión. En algunos casos se registraron variaciones en la escala de respuesta entre tratamientos, mientras que en otros se observaron modificaciones en el orden relativo de las medias, lo que confirma la presencia de una interacción entre los tres factores del proceso. Estos resultados indican que la respuesta del material al proceso de densificación no puede describirse adecuadamente considerando los factores de forma aislada, sino que depende de su combinación específica dentro del rango experimental evaluado.

Con el objetivo de dimensionar la capacidad del diseño para detectar efectos de interés, se realizó un análisis exploratorio de potencia estadística basado en los efectos estimados. Este análisis permitió evaluar cómo varía la potencia del ensayo en función del número de repeticiones por tratamiento. La (Figura 12) muestra la relación entre el número de repeticiones y la potencia estadística estimada para el efecto considerado.

Figura 12

Potencia estadística estimada en función del número de repeticiones por tratamiento



Con dos repeticiones por tratamiento, la potencia del ensayo se sitúa en torno al 50 %. Al incrementar el número de repeticiones, la potencia aumenta de forma progresiva: con tres repeticiones se aproxima al 70 % y con cuatro repeticiones supera el umbral del 80 %. A partir de cinco repeticiones por tratamiento, la potencia estimada se mantiene por encima del 90 %, mostrando incrementos más graduales a medida que continúa aumentando el tamaño muestral. Este resultado señaló la necesidad de aumentar el número de repeticiones en futuros experimentos, donde los resultados arrojarían conclusiones más fundadas a la hora del análisis y eventualmente detectar mayores efectos por parte de las variables temperatura, presión y tiempo.

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PROPIEDADES MECÁNICAS

Luego de ajustar el modelo factorial completo propuesto para la variable propiedades mecánicas (Ec. 3), se evaluó la adecuación del modelo mediante el análisis gráfico de los residuos. Los gráficos de residuos versus valores ajustados y los diagramas cuantificó no evidenciaron desviaciones importantes respecto de los supuestos de normalidad ni de homogeneidad de varianzas. En consecuencia, se consideró apropiado aplicar un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar los efectos de temperatura, tiempo de prensado y presión sobre la propiedad mecánica media.

El ANOVA indicó que la presión fue el único factor con efecto significativo sobre la propiedad mecánica media (p -valor = 0,0196), mientras que los efectos principales de temperatura y tiempo, así como todas las interacciones de dos y tres vías, no resultaron significativos (p -valores > 0,19 en todos los casos (Tabla 5). La ausencia de interacciones significativas sugiere que el efecto de la presión fue consistente a través de los niveles de temperatura y tiempo evaluados, lo que habilita la interpretación directa de su efecto principal.

Tabla 5*Análisis de varianza del modelo factorial para Carga máxima*

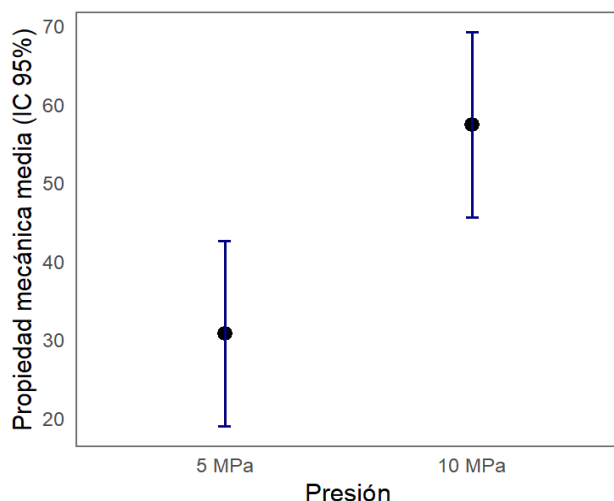
Fuente de Variación	G.L.	S.C	C.M	valor F	p-valor
Temperatura	1	678,6	678,6	2,015	0,1935
Tiempo	1	9,6	9,6	0,029	0,87
Presión	1	2851,6	2851,6	8,468	0,0196*
Temperatura: tiempo	1	1,2	1,2	0,004	0,9537
Temperatura: presión	1	130	130	0,386	0,5517
Tiempo: presión	1	0,2	0,2	0,001	0,981
Temperatura: tiempo: presión	1	5,1	5,1	0,015	0,9054
Residuales	8	2694,1	336,8		

Nota. G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrados medios. p-
valores con asterisco (*) indican significancia al 1 %.

En función de estos resultados, se procedió a comparar las medias marginales estimadas para los dos niveles del factor presión. La presión de 10 MPa produjo valores medios de propiedad mecánica superiores a los observados con 5 MPa. La media estimada para 5 MPa fue 30.71 (IC_{95 %}: 18,88 – 42,54), mientras que para 10 MPa fue 57,41 (IC_{95 %}: 45,58 – 69,24). Dado que el factor presión presenta únicamente dos niveles, no fue necesario realizar comparaciones múltiples adicionales. Estos resultados se presentan en la Figura 13, donde se muestran las medias ajustadas y sus intervalos de confianza al 95 %.

Figura 13

Medias ajustadas e intervalos de confianza (95 %) de la propiedad mecánica según presión aplicada



La separación entre las medias estimadas y la amplitud de los intervalos de confianza evidencian un incremento de la propiedad mecánica al aumentar la presión de prensado dentro del rango experimental considerado. Asimismo, la ausencia de interacciones significativas indica que este patrón se mantuvo de forma similar en las distintas combinaciones de temperatura y tiempo evaluadas, lo que refuerza la interpretación del efecto de la presión como un factor dominante en la respuesta mecánica del material bajo las condiciones del experimento.

Si bien el número de repeticiones por tratamiento fue reducido, la consistencia del efecto de la presión y la ausencia de interacciones sugieren que el diseño experimental permitió detectar de manera estable el patrón general de respuesta de la propiedad mecánica frente a este factor. No obstante, los resultados deben interpretarse dentro del alcance exploratorio del estudio y constituyen una primera evidencia del efecto de la presión en las condiciones evaluadas, que podrá ser estimado con mayor precisión en futuros ensayos con mayor número de repeticiones.

4.6 MODO DE FALLO EN COMPRESIÓN

Durante los ensayos de compresión, las probetas presentaron un comportamiento caracterizado principalmente por el aplastamiento progresivo del material, acompañado por la formación de bandas de compresión, típicas de la madera bajo carga de compresión.

En las probetas densificadas, el inicio de la falla tendió a ser más localizado, desarrollándose en regiones específicas de la probeta y propagándose posteriormente en la dirección de la fibra. Este comportamiento se asocia a una mayor rigidez del material densificado, lo que limita la distribución de deformaciones y favorece la concentración de tensiones. Asimismo, en algunos casos se observaron fisuras longitudinales durante el proceso de carga, las cuales contribuyeron al desarrollo de la falla. Estas fisuras se propagaron de forma progresiva, condicionando el modo de rotura y evidenciando un comportamiento más frágil en comparación con la madera no densificada.

Por el contrario, las probetas no densificadas mostraron un comportamiento más gradual y distribuido, con deformaciones más homogéneas a lo largo de la sección y sin una localización marcada del daño en etapas iniciales de carga.

En conjunto, los resultados indican que el proceso de densificación modifica el mecanismo de falla del material, promoviendo respuestas más localizadas y una menor capacidad de redistribución de tensiones bajo carga de compresión.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el proceso de densificación termomecánica aplicado a la madera de *Eucalyptus grandis* incrementa la densidad aparente del material, las cuales dependen de la combinación de temperatura, presión y tiempo de prensado. La interacción triple significativa detectada en el análisis de varianza indica que la respuesta del material frente al proceso de densificación no puede explicarse considerando cada factor de manera independiente, sino que emerge de la interacción conjunta entre las variables de proceso evaluadas.

Desde el punto de vista tecnológico, este comportamiento es consistente ya que durante el prensado termomecánico, la aplicación simultánea de presión y temperatura produce la compresión de la estructura celular y el colapso parcial de los lúmenes, lo que genera una reducción del volumen del material y, en consecuencia, un aumento en su densidad aparente. Sin embargo, el grado en que ocurre esta compactación depende de las condiciones de procesamiento, particularmente del equilibrio entre la temperatura, la presión aplicada y el tiempo de prensado, que determinan el grado de plastificación y colapso de la estructura celular.

Considerando lo observado en nuestro trabajo, estos resultados son consistentes con lo reportado por Pertuzzatti et al. (2018) en estudios de densificación termomecánica sobre *Eucalyptus grandis*, el cual evidencia que la respuesta del material depende de la combinación de los factores de proceso, particularmente la temperatura y el tiempo de tratamiento. Dicho autor señala que, si bien el incremento de la temperatura y del tiempo puede favorecer la plastificación de los componentes de la pared celular y facilitar la compactación, condiciones más severas pueden inducir procesos de degradación, especialmente de las hemicelulosas, afectando el comportamiento final del material.

En relación con los valores obtenidos, la densidad inicial promedio de las probetas sin densificar fue de 510 kg m^{-3} , lo cual es consistente con los rangos reportados para *Eucalyptus grandis* de plantaciones comerciales en la región. Los incrementos de densidad registrados en el presente estudio, que oscilaron entre el 5 % y el 35 % según el tratamiento aplicado, son comparables con los obtenidos por Pertuzzatti et al. (2018) para la misma especie en Brasil, quienes reportaron densidades cercanas a 1000 kg m^{-3} en los tratamientos más intensivos, aunque bajo condiciones de proceso diferentes a las evaluadas en este trabajo. Cabe destacar que Pertuzzatti et al. (2018) observaron que los mejores resultados en términos de densidad aparente y propiedades mecánicas para *E. grandis* se obtuvieron con tratamientos a temperaturas más bajas, de $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con tiempos de exposición más cortos, de 30 minutos.

En este sentido, los cambios de tendencia observados en el presente trabajo bajo diferentes combinaciones de temperatura, presión y tiempo podrían estar asociados a un equilibrio entre los mecanismos de plastificación y degradación térmica. Esto refuerza la importancia de considerar la interacción conjunta entre los factores de proceso para la optimización de la densificación, en lugar de analizar cada variable de forma independiente.

Este resultado mantiene un lineamiento con la relación encontrada y documentada entre densidad y resistencia mecánica en la madera; donde los tratamientos a 190 °C no siempre produjeron los mayores incrementos en la carga máxima soportada, evidenciando que temperaturas elevadas pueden comprometer las propiedades mecánicas del material aun cuando incrementen la densidad aparente.

A medida que aumenta la presión durante el proceso de densificación, se incrementa el grado de compactación de la estructura celular, lo que se traduce en una mayor cantidad de material sólido por unidad de volumen y, en consecuencia, en una mayor capacidad del material para resistir esfuerzos mecánicos.

Un aspecto que merece atención particular es el comportamiento de los tratamientos 5 y 7, correspondientes a 190 °C con 5 MPa durante 1 y 3 horas respectivamente, los cuales registraron una disminución de la carga máxima soportada respecto a las probetas control, con reducciones del 0,8 % y 6,4 % respectivamente. Este resultado, aparentemente contradictorio con el objetivo del proceso de densificación, puede interpretarse a la luz del comportamiento termo-viscoelástico de los componentes de la madera. A temperaturas de 190 °C, que superan ampliamente la temperatura de transición vítrea de las hemicelulosas, estos polímeros estructurales comienzan a degradarse, reduciendo su contribución a la resistencia mecánica del material (Belleville et al., 2025).

En *E. grandis* específicamente, Pertuzzatti et al. (2018) señalan que las hemicelulosas de esta especie, principalmente compuestas por unidades de xilosa, presentan una degradación térmica más rápida que las de otras especies, lo que se traduce en pérdida de masa y deterioro de las propiedades mecánicas a temperaturas elevadas. En este sentido, la presión de 5 MPa aplicada en los tratamientos 5 y 7 habría resultado insuficiente para compensar mediante compactación celular el deterioro estructural inducido por la temperatura, generando un balance desfavorable entre los mecanismos de plastificación y degradación. Esto también se evidencia con las observaciones macroscópicas registradas en esos tratamientos, donde se evidenció oscurecimiento pronunciado y en algunos casos carbonización superficial localizada, siendo estos indicadores visuales de degradación térmica que afectan negativamente la integridad estructural del material.

En contraste, cuando la presión aplicada fue de 10 MPa a la misma temperatura de 190 °C tratamientos 6 y 8 los incrementos en la carga máxima fueron los más elevados de todo el experimento, con aumentos del 222 % y 188 % respectivamente, lo que evidencia que a temperaturas elevadas la presión aplicada debe ser suficientemente alta para lograr una compactación que supere el efecto negativo de la degradación térmica.

En el marco del trabajo experimental realizado, los tratamientos que combinaron una presión de 10 MPa con temperatura de 190 °C independientemente del tiempo de prensado produjeron los mayores incrementos tanto en densidad como en carga máxima soportada, lo que los posiciona como las combinaciones más prometedoras para una eventual aplicación orientada a mejorar el desempeño mecánico del material. Sin embargo, la presencia de carbonización superficial y fisuras observadas en algunos de estos tratamientos indica que las condiciones de 190 °C representan un límite térmico

crítico para la especie, por encima del cual el riesgo de degradación estructural se incrementa significativamente.

Cabe mencionar que el diseño experimental incluyó dos repeticiones por tratamiento, por lo que los resultados deben interpretarse como una primera aproximación al comportamiento del proceso en las condiciones estudiadas. El experimento permitió detectar la presencia de interacción entre los factores del proceso y establecer tendencias en la respuesta de la densidad media frente a las combinaciones evaluadas. En este sentido, los resultados constituyen una base experimental preliminar para orientar ensayos posteriores con mayor número de repeticiones, destinados a confirmar los patrones observados y avanzar hacia la identificación de condiciones de procesamiento que optimicen las propiedades de la madera densificada.

En conjunto, estos resultados indican que el diseño con dos repeticiones por tratamiento posee una capacidad limitada para la detección confirmatoria de efectos, pero resulta adecuado como etapa exploratoria para identificar patrones de respuesta y posibles interacciones entre los factores del proceso. Aun con este tamaño muestral reducido, el experimento permitió detectar tendencias consistentes y relaciones entre temperatura, presión y tiempo de prensado, aportando información valiosa sobre el comportamiento del sistema dentro del rango experimental evaluado.

Desde esta perspectiva, el estudio constituye una base empírica útil para la planificación de ensayos posteriores. En particular, los resultados del análisis de potencia sugieren que un diseño con al menos cuatro repeticiones por tratamiento permitiría alcanzar niveles de potencia cercanos al 80 % bajo condiciones experimentales similares, fortaleciendo así la capacidad de contrastación estadística en futuras etapas orientadas a la optimización del proceso.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el efecto del proceso de densificación termomecánica sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis*, considerando la influencia de tres variables de proceso: temperatura, presión y tiempo de prensado.

En relación con el primer objetivo específico, los tres factores evaluados no actúan de forma independiente sobre las propiedades del material. El análisis estadístico mostró una interacción significativa entre temperatura, presión y tiempo para la densidad aparente, lo que indica que el efecto de cada variable sobre esta propiedad no se manifiesta de forma aislada, sino a partir de su combinación dentro del rango experimental considerado. Para la carga máxima en compresión perpendicular a la fibra, la presión de prensado fue el único factor que mostró un efecto significativo, manteniéndose este patrón de forma consistente a través de los distintos niveles de temperatura y tiempo evaluados, sin evidencia de interacciones significativas para esta variable.

En cuanto al segundo objetivo específico, el proceso de densificación termomecánica produjo un incremento de la densidad aparente en la totalidad de los tratamientos evaluados, con aumentos que oscilaron entre el 5 % y el 35 % respecto a la densidad inicial promedio de 510 kg m^{-3} . Respecto a la carga máxima en compresión perpendicular a la fibra, las probetas sometidas a una presión de 10 MPa presentaron valores de resistencia superiores a aquellas tratadas con 5 MPa. Sin embargo, no todos los tratamientos produjeron una mejora mecánica respecto al control: los tratamientos a 190°C con 5 MPa registraron una disminución de la carga máxima soportada, lo que evidencia que temperaturas elevadas combinadas con presiones insuficientes pueden comprometer la integridad estructural del material, probablemente como consecuencia de la degradación térmica de los componentes de la pared celular.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la presión constituye un factor determinante en la mejora de la respuesta mecánica del material, mientras que la densidad resultante del proceso se encuentra condicionada por la interacción entre las tres variables de proceso evaluadas. La temperatura de 190°C representa un límite térmico crítico para la especie: combinada con presiones de 10 MPa produce los mayores incrementos en ambas propiedades, pero aplicada con presiones de 5 MPa genera un efecto perjudicial sobre la resistencia mecánica, lo que refuerza la importancia de considerar la interacción entre los factores al momento de optimizar el proceso.

Si bien el estudio presenta un carácter exploratorio debido al número limitado de repeticiones por tratamiento, los resultados aportan evidencia experimental original sobre el comportamiento de la madera de *Eucalyptus grandis* nacional sometida a densificación termomecánica y proporcionan una base para el desarrollo de futuros ensayos orientados a confirmar los patrones observados y a optimizar las condiciones de procesamiento para su aplicación en usos estructurales e industriales de mayor valor agregado.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Andreoni, M. (2010). *Evaluación del incremento generado, en la cadena foresto industrial, por el uso de materiales genéticos mejorados de Eucalyptus grandis para producción de celulosa* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/23462>
- Baptista, P., Voulminot, C., Acle, B., Iraola, P., Ohta, S., O'Neill, H., Tarigo, F., de Castro, R., Silva, D., & Gatto, F. (2004). *Propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis H. del norte de Uruguay*. MGAP; SPF; LATU. https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=558
- Belleville, B., Wood, K. C., & Fehrmann, J. (2025). Effect of a thermo-mechanical densification process on selected properties of densified wood of Tasmanian oak and Eucalyptus nitens. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83, Artículo e140. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02289-x>
- 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* (5th ed.). CSIRO.
- Boragno, L. (2025). *Sector Forestal de Uruguay: Extracción, producción, exportaciones, importaciones, consumo y mano de obra*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/Boletin%20Estadistico%20DGF%202025.pdf>
- Boragno, L. (2026). *Superficie forestal del Uruguay (Bosques plantados): Período 1975-2025*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2026-05/Superficie%20Plantado%20Informe%202026.pdf>
- Boscana, M., & Faroppa, C. (2023). *Estadísticas forestales 2023: Extracción - producción – consumo – mano de obra – comercio exterior*. DGF. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2023-07/DGF%20Boletin%20Estadistico_2023.pdf
- Böthig, S. (2001). *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. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Cabral, J. P., Kafle, B., Subhani, M., Reiner, J., & Ashraf, M. (2022). Densification of timber: A review on the process, material properties, and application. *Journal of Wood Science*, 68. Artículo e20. <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>
- Cantera Rosso, L. (2020). *Thermal modification of Eucalyptus grandis and Pinus taeda wood* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/25953>

- Cardoso Maciel, A., & Castagna Du Pré, A. (2012). *Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de una población de Eucalyptus bosistoana cultivado en Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/9759>
- Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social. (2024). *La producción de madera en Uruguay: Un sector con presente y futuro para impulsar el desarrollo*. https://ceres.uy/admin/uploads/slides/archivo_1728334680.pdf
- Fang, C. H., Blanchet, P., Cloutier, A., & Barbuta, C. (2012). Engineered wood flooring with a densified surface layer for heavy-duty use. *BioResources*, 7(4), 5843-5854. <https://doi.org/10.15376/biores.7.4.5843-5854>
- Forest Products Laboratory. (2021). *Wood handbook: Wood as an engineering material*. USDA. <https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/62200.pdf>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R companion to applied regression* (3rd ed.). Sage.
- García Freire, G., & Tarigo Scremini, J. (2006). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera en dos plantaciones de Eucalyptus grandis Hill (Ex Maiden)* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29255>
- Iejavs, J., Podnieks, M., & Uzuls, A. (2021). Some physical and mechanical properties of wood of fast-growing tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *Agronomy Research*, 19(2), 434-443. <https://doi.org/10.15159/AR.21.038>
- Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M., & Rowell, R. M. (1993). Steam or heat fixation of compressed wood. *Wood and Fiber Science*, 25(3), 224-235. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/288>
- Kutnar, A., & Sernek, M. (2007). Densification of wood. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*, 82, 53-62. <https://dirros.openscience.si/Dokument.php?id=9540&lang=eng>
- Luan, Y., Fang, C. H., Ma, Y. F., & Fei, B. H. (2022). Wood mechanical densification: A review on processing. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(4), 359-371. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.2016816>
- Pertuzzatti, A., Missio, A. L., Cademartori, P. H. G., Santini, E. J., Haselein, C. R., Berger, C., Gatto, D. A., & Tondi, G. (2018). Effect of process parameters in the thermomechanical densification of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* fast-growing wood. *BioResources*, 13(1), 1576-1590. <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1576-1590>
- Puertas, P. S., Guevara Salnicov, C., & Espinoza Linares, M. (2013). *Manual de transformación de la madera*. AIDER; MA; ITTO.

- Rautkari, L., Laine, K., Laflin, N., & Hughes, M. (2011). Surface modification of Scots pine: The effect of process parameters on the through-thickness density profile. *Journal of Materials Science*, 46(14), 4780-4786. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5388-9>
- Rodríguez, S. (1998). Antecedentes tecnológicos de Canelo (*Drimys winteri* Forst.). *Bosque*, 19(1), 91-99. <https://doi.org/10.4206/bosque.1998.v19n1-10>
- Sadatnezhad, S. H., Khazaeian, A., Sandberg, D., & Tabarsa, T. (2017). Continuous surface densification of wood: A new concept for large-scale industrial processing. *BioResources*, 12(2), 3122-3132. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3122-3132>
- Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2013). Thermo hydro and thermo hydro mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering*, 8(1), 64-88. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
- Sandberg, D., Kutnar, A., & Mantanis, G. (2015). Wood modification technologies: A review. *iForest*, 10(6), 895-908. <https://doi.org/10.3832/for2380-010>
- Seborg, R. M., Millett, M. A., & Stamm, A. J. (1956). *Heat-stabilized compressed wood (Staypak)*. USDA. <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/7p88cm315>
- Skyba, O., Schwarze, F., & Niemz, P. (2009). Physical and mechanical properties of Thermo-hygro-mechanically (THM) - Densified wood. *Wood Research*, 54(2), 1-18. <https://www.woodresearch.sk/wr/200902/01.pdf>
- Sociedad de Productores Forestales (s.f.). *El sector forestal*. <https://www.spf.com.uy/es/el-sector-forestal>
- Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeiri, I., Harte, A. M., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Haller, P., Namari, S., Makradi, A., Belouettar, S., Bouhala, L., Deneufbourg, F., & Guan, Z. (2020). Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment*, 1, Artículo e100004. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>
- Umlandt, M., Jiménez, V., Benítez, F., Pan, E., Medina, J. C., Ruiz, A., Fernández, L., & Ludeña, A. (2022). *Fundamentos teóricos-prácticos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera: Propiedades físicas*. Universidad Nacional de Santiago del Estero. <https://fcf.unse.edu.ar/index.php/portfolio/sd-47-fundamentos-teoricos-practicos-de-las-propiedades-fisicas-y-mecanicas-de-la-madera/>
- Uruguay XXI. (2021). *Sector forestal en Uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>
- Uruguay XXI. (2023). *Sector forestal en Uruguay*. <https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2024/06/Infores-forestal-Uruguay-2023.pdf>

- Uruguay XXI. (2025). *Sector forestal en Uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-forestal-en-uruguay/#>
- Welzbacher, C., Heger, F., Girardet, F., Navi, P., & Rapp, A. (2004, 22-23 de marzo). *Decay resistance of thermo-hydro-mechanically densified wood* (Ponencia). Final Workshop COST Action E22 'Environmental Optimisation of Wood Protection', Lisboa, Portugal. https://www.researchgate.net/publication/255576500_DECAY_RESISTANCE_OF_THERMO-HYDRO-MECHANICALLY_DENSIFIED_WOOD
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis* (2nd ed.). Springer.

8. ANEXO

Figura A1

Evaluación gráfica de homogeneidad de varianzas de los residuos del modelo para densidad final media

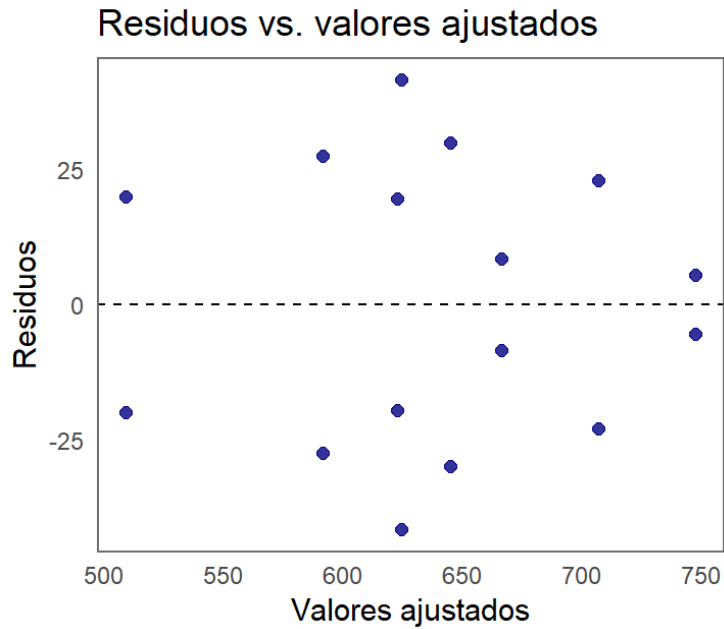
**Figura A2**

Gráfico QQ-plot para evaluar la normalidad de los residuos del modelo para densidad final media

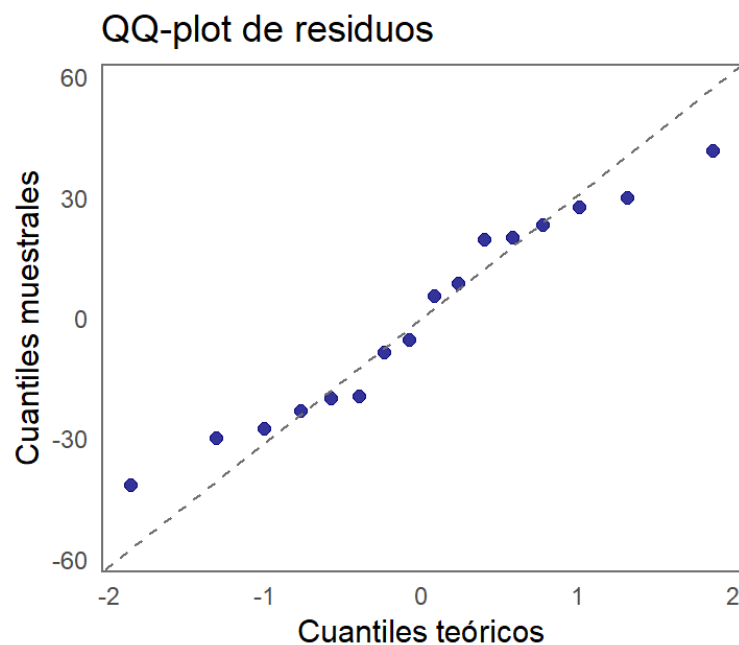


Figura A3

Evaluación gráfica de homogeneidad de varianzas de los residuos del modelo para propiedades mecánicas

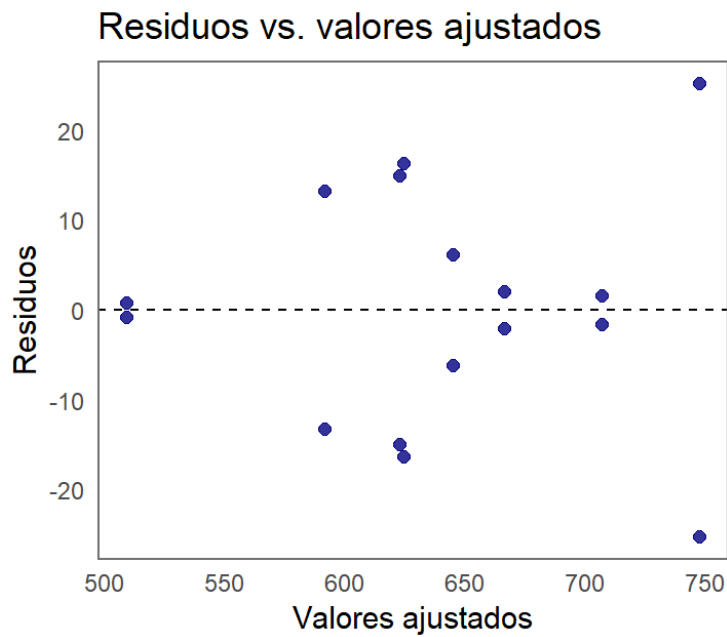
**Figura A4**

Gráfico QQ-plot para evaluar la normalidad de los residuos del modelo para propiedades mecánicas

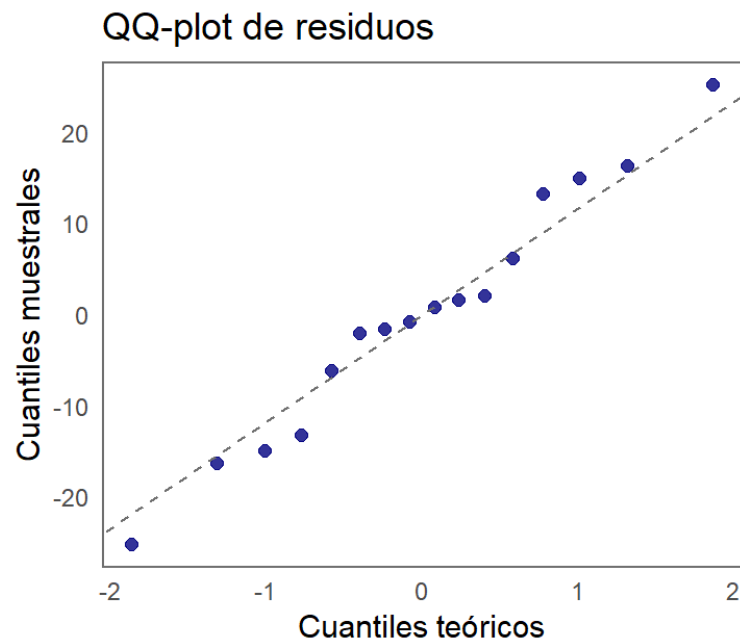


Tabla A1*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 1*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	16	4	4	127,25	10,3	497	521	4,3	-
Probeta 2	16	3,6	3,9	91,52	10,3	407	430	4,2	15,8
Probeta 3	15,9	3,7	3,6	133,52	10,3	630	661	4,2	37,6
Probeta 4	15,8	3,6	4	108,98	10,3	479	506	4,1	25,5
Probeta 5	15,8	4	3,5	91,43	10,3	413	433	4,1	-
Probeta 6	15,8	4	3,6	108,84	10,2	478	501	4,3	30,6
Probeta 7	15,9	3,9	3,6	108,8	10,5	487	515	4,2	29,6
Probeta 8	15,9	4	3,6	109,9	10,1	480	507	4,2	23,5
Promedio							509		27,1
Desvío							66		7,4

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A2*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 2*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	16	4	4	91,06	10,6	356	437	4,2	15,4
Probeta 2	15,8	3,6	4	105,92	10,4	466	574	4,3	28,5
Probeta 3	16,1	3,8	3,6	139,77	10	635	783	4,8	-
Probeta 4	16,1	3,6	3,9	142,01	10,8	628	773	4,2	58,0
Probeta 5	15,9	4	3,5	116,24	10,1	522	642	4,3	46,4
Probeta 6	15,9	4	3,6	109,92	10,1	480	590	4,1	100,0
Probeta 7	15,9	4	3,5	118,24	10,6	531	655	4,4	-
Probeta 8	15,9	4	3,5	94,73	10,5	426	525	4,2	45,6
Promedio							623		49,0
Desvío							110		29,2

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A3*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 3*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	16,2	3,6	3,2	132,4	10,2	709	888	3,4	30,3
Probeta 2	16,1	3,9	4	142,84	10,6	569	719	3,0	37,5
Probeta 3	16	4	3,6	113,35	10,8	492	622	3,8	18,0
Probeta 4	15,9	4	3,6	92,6	10	404	506	3,2	-
Probeta 5	16,1	3,9	3,5	130,04	10,3	592	740	3,2	-
Probeta 6	16,1	3,9	3,6	141,31	10,6	625	782	3,4	29,2
Probeta 7	16,1	3,9	3,6	129,7	9,8	574	725	3,6	22,9
Probeta 8	16,1	3,9	3,6	119,86	10,5	530	670	3,1	24,0
Promedio							707		27,0
Desvío							105		6,8

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A4*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 4*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	16,2	3,6	3,7	117,5	9,6	545	727	3,6	-
Probeta 2	15,9	4	3,9	125,76	9,7	507	681	3,1	67,0
Probeta 3	16,2	3,9	4,1	119,92	9,6	463	622	3,3	45,2
Probeta 4	16	3,6	3,6	104,49	9,8	504	672	3,2	35,4
Probeta 5	15,9	3,9	3,5	91,21	10,6	420	561	3,4	34,3
Probeta 6	15,9	4	3,6	107,18	10,9	468	625	3,3	72,0
Probeta 7	15,9	4	3,5	121,85	10,4	547	735	3,1	-
Probeta 8	15,9	4	3,6	121,51	10,6	531	713	3,1	50,5
Promedio							667		50,7
Desvío							57		15,8

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A5*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 5*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	15,9	4	3,6	116,5	9,9	509	601	3,7	28,8
Probeta 2	15,9	4	3,6	91,05	9,6	398	467	4,4	14,9
Probeta 3	16,2	3,9	3,6	132,4	9,7	582	683	4,1	28,9
Probeta 4	16,2	3,9	3,6	139,75	9,4	614	725	3,7	-
Probeta 5	15,9	4	3,6	104,34	10,8	456	538	3,8	25,0
Probeta 6	15,9	4	3,6	106,79	11	466	551	3,9	25,6
Probeta 7	15,9	4	3,6	117,7	10,4	514	604	3,9	-
Probeta 8	15,9	4	3,6	109,78	10,7	479	563	3,7	22,3
Promedio							591		24,3
Desvío							77		5,2

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A6*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 6*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	15,7	4	3,6	112	10,2	495	601	3,9	100,0
Probeta 2	15,9	4	3,6	107,7	9,8	470	576	3,4	100,0
Probeta 3	16	4	3,6	124,23	10	539	660	4,0	100,0
Probeta 4	15,9	4	3,6	93,84	9,8	410	497	3,6	-
Probeta 5	15,9	4	3,6	123,5	10,6	539	654	3,7	50,4
Probeta 6	16	4	3,5	122,31	10,5	546	662	3,4	58,4
Probeta 7	16	4	3,6	125,66	10,8	545	668	3,5	-
Probeta 8	16	4	3,5	124,78	11	557	682	3,8	74,2
Promedio							625		80,5
Desvío							59		22,7

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A7*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 7*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	15,9	4	3,6	106,5	9,7	465	586	3,0	19,7
Probeta 2	15,9	4	3,6	113,25	10	495	630	2,9	-
Probeta 3	16,2	3,8	3,6	144,68	9,7	653	831	2,9	28,7
Probeta 4	16,2	3,9	3,6	117,97	9,8	519	654	2,8	22,4
Probeta 5	15,9	3,9	3,6	119,9	10,6	537	677	2,7	28,4
Probeta 6	15,9	3,9	3,6	106,7	10,5	478	603	2,9	24,3
Probeta 7	15,9	4	3,6	119,52	10,8	522	665	2,9	16,7
Probeta 8	15,9	4	3,6	92,87	11	406	516	3,0	-
Promedio							645		23,4
Desvío							85		4,8

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A8*Dimensión y propiedades de cada probeta para el tratamiento 8*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH inicial (%)	Densidad inicial (kg m ⁻³)	Densidad final (kg m ⁻³)	CH final (%)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	16,2	3,8	3,6	130,17	9,9	587	788	3,5	75,4
Probeta 2	15,9	3,8	3,6	109,29	10	502	680	3,4	100,0
Probeta 3	15,9	4	3,5	116,22	9,5	522	707	3,3	100,0
Probeta 4	16,2	3,8	3,6	131	9,6	591	793	3,3	-
Probeta 5	16,3	3,9	3,8	133,71	10,1	554	742	3,2	74,8
Probeta 6	16,2	3,8	3,7	128,78	10,5	565	758	3,2	-
Probeta 7	16,2	3,7	3,6	115,61	10,3	536	725	3,4	57,4
Probeta 8	16,2	3,8	3,7	132,02	10,6	580	785	3,4	24,9
Promedio							747		72,1
Desvío							39		28,4

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.

Tabla A9*Dimensiones y propiedades de las probetas registradas como control*

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Peso inicial (g)	CH (%)	Densidad (kg m ⁻³)	Carga máx. (kN)
Probeta 1	15,9	4	3,6	100,09	10,1	437	18
Probeta 2	16,1	3,8	3,7	132,76	10,2	586	30
Probeta 3	16,1	3,8	3,7	118,12	10,1	522	30
Probeta 4	15,9	4	3,6	91,34	10,4	399	17
Probeta 5	15,9	4	3,7	121,56	10,2	517	26
Probeta 6	15,9	4	3,6	119,82	10,6	523	25
Probeta 7	16,1	3,9	3,6	133,18	10,1	589	29
Promedio						510	25
Desvío						66	5

Nota. CH: contenido de humedad. kN: kilo Newton. kg m⁻³: kilogramo por metro cúbico.